

А. А. ЧУНИХИН

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

ОБЩИЙ КУРС

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ,
ПЕРЕРЕБОТАННОЕ
И ДОПОЛНЕННОЕ

*Допущено Министерством высшего
и среднего специального образова-
ния СССР в качестве учебника для
студентов электротехнических и
электроэнергетических специаль-
ностей вузов*

Revised by Evgeny Chemodanov
2009



ЭНЕРГИЯ · МОСКВА · 1975

6П2.1.08
УДК 621.312
Ч-91

Чунихин А. А.

Ч-91 Электрические аппараты (общий курс). Учебник
для энергетических и электротехнических институ-
тов и факультетов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.,
«Энергия», 1975.
648 с. с ил.

Во втором, переработанном издании книги изложены кратко осно-
вы электроаппаростроения. Описаны устройства и принцип работы
аппаратов распределительных устройств высокого и низкого напряже-
ний и аппаратов автоматики, а также конструкции узлов аппаратов,
режимы их работы и эксплуатационные характеристики. Рассмотрены
принципы действия бесконтактных аппаратов, использующих полупро-
водниковые приборы и сердечники с прямоугольной петлей гистерезиса.
Даны рекомендации по выбору электрических аппаратов.

Первое издание вышло в 1967 г.

Книга предназначена для студентов электротехнических и энерге-
тических вузов и факультетов. Книга может быть полезна инженерно-
техническим работникам, проектирующим и эксплуатирующим установ-
ки, использующие аппараты высокого и низкого напряжения.

Ч $\frac{30307-429}{051(01)-75}$ 144-75

6П2.1.08

© Издательство «Энергия», 1975 г.

Предисловие

Настоящий учебник представляет собой дополненную и частично переработанную книгу, изданную в 1967 г.

Первое издание книги в основном предполагалось использовать по курсу электрические аппараты на факультете электрификации и автоматизации производственных процессов и транспорта. Однако охват книгой электрических аппаратов как низкого, так и высокого напряжения позволил широко использовать эту книгу для специальностей: электрические машины, электрооборудование самолетов и автомобилей, электротехнические материалы и кабели, полупроводниковые приборы и др. Книга также широко использовалась на вечерних факультетах.

Настоящий учебник написан в соответствии с программами общего курса электрические аппараты, утвержденными Минвузом СССР для специальностей: электрические машины, электропривод, автоматизация машиностроения, автоматизация строительных работ, автоматизация горнорудных работ и др.

Во втором издании учтены замечания и пожелания специалистов Ленинградского политехнического института, Киевского политехнического института, Всесоюзного заочного политехнического института и Ивановского энергетического института, которым автор приносит большую благодарность.

В первом разделе дополнительно введены две главы: механизмы электрических аппара-

тов и изоляция электрических аппаратов. Шесть глав этого раздела дополнены примерами расчетов.

Второй раздел учебника дополнен главами: муфты с электрическим управлением и датчики. Значительно переработана и расширена глава, посвященная бесконтактным электрическим аппаратам.

При изложении материала особое внимание уделяется освещению физических процессов, происходящих в аппаратах, устройству аппаратов, регулировочным характеристикам и выбору.

Автор считает своим долгом выразить благодарность всем сотрудникам кафедры электроаппаратостроения МЭИ за ценные предложения по второму изданию книги.

Автор выражает искреннюю благодарность проф. Г. А. Кукекову за большой труд по рецензированию книги и ценные замечания и предложения, которые учтены при работе над рукописью.

За большую работу по редактированию книги автор глубоко признателен доценту А. Г. Годжелло. Автор также благодарен проф. В. В. Афанасьеву за ценные указания по проспекту 2-го издания книги.

Все замечания и пожелания автор просит прислать по адресу: 113114, Москва, Шлюзовая набережная, д. 10, Издательство «Энергия».

Автор

ВВЕДЕНИЕ

Классификация электрических аппаратов и требования, предъявляемые к ним

Электрический аппарат — это электротехническое устройство, которое служит для управления электрическими и неэлектрическими объектами, а также для их защиты при ненормальных режимах работы.

Понятие электрический аппарат очень широкое, так как в него входят всевозможные бытовые и промышленные устройства и установки.

В настоящей книге рассматриваются основы теории, конструкция и эксплуатационные характеристики аппаратов, которые применяются в электрических системах, в схемах электроснабжения промышленных предприятий и автоматизации производственных процессов и электропривода.

Классификация электрических аппаратов может быть проведена по ряду признаков: назначению (основной функции, выполняемой аппаратом), области применения, принципу, используемому в аппарате, роду тока, исполнению защиты от воздействия окружающей среды, конструктивным особенностям и др. Основной является классификация по назначению.

В зависимости от назначения аппараты можно разделить на следующие большие группы.

1. Коммутационные аппараты распределительных устройств. Эти аппараты служат для включения и отключения электрических цепей. К этой группе относятся рубильники, пакетные выключатели, выключатели нагрузки, выключатели высокого напряжения, разъединители, отделители, короткозамыкатели, автоматические выключатели, предохранители. Характерным для этой группы является относительно редкое их включение и отключение, хотя могут быть и случаи, когда аппарат довольно часто совершает операции (например, выключатель высокого напряжения, питающий электрические печи).

2. *Ограничивающие аппараты.* Эти аппараты предназначены для ограничения токов короткого замыкания (реакторы) и перенапряжений (разрядники). Режимы короткого замыкания и перенапряжений редки, эти аппараты мало подвергаются наибольшим нагрузкам.

3. *Пускорегулирующие аппараты,* предназначенные для пуска, регулирования частоты вращения, напряжения и тока электрических машин или для пуска и регулирования какого-либо другого потребителя электрической энергии. К этой группе относятся контроллеры, командоконтроллеры, контакторы, пускатели, резисторы и реостаты. Для этой группы являются характерными частые включения и отключения. В современных приводах число включений в час достигает 1500.

4. *Контролирующие аппараты.* Основной функцией этих аппаратов является контроль заданных электрических или неэлектрических параметров. К этой группе относятся реле и датчики. Если при плавном изменении входной (контролируемой) величины выходной сигнал аппарата изменяется скачком, то мы имеем дело с реле. Выходной сигнал обычно воздействует на схему автоматики. Датчик преобразует непрерывное изменение входной величины в изменение какой-либо электрической величины, являющейся выходной. Датчики могут контролировать как электрические, так и неэлектрические величины. Как правило, датчики производят плавное преобразование величины, хотя возможно и скачкообразное изменение выходного сигнала при плавном изменении входного (реле-датчики).

5. *Аппараты для измерений.* Эти аппараты изолируют цепи первичной коммутации (главного тока) от цепей измерительных и защитных приборов. Они преобразуют измеряемую величину до стандартного значения, удобного для измерений. К ним относятся трансформаторы тока, напряжения, конденсаторные делители напряжения.

6. *Регулирующие аппараты* предназначены для регулирования заданного параметра по определенному, наперед заданному закону. В частности, регуляторы служат для поддержания на неизменном уровне напряжения, тока, температуры, частоты вращения и других величин.

В данном курсе электрические регуляторы не рассматриваются, так как принцип их действия и характеристики тесно связаны с теорией автоматического регулирования, которая в настоящей книге не излагается.

Разделение аппаратов по областям применения более условно. Аппараты, обслуживающие электрические системы и электроснабжение, объединяют в группу аппаратов распределительных устройств низкого и высокого напряжения.

Большую группу аппаратов, применяющихся для схем автоматического управления электроприводами и для автоматизации производственных процессов, удобно объединить в группу аппаратов управления. Однако одни и те же аппараты могут находиться и среди аппаратов распределительных устройств, и среди аппаратов управления, например рубильники, пакетные выключатели, контакторы, автоматы, трансформаторы тока, реле и др.

По номинальному напряжению электрические аппараты разделяются на две группы: аппараты низкого напряжения $U_n \leq 1000$ В и высокого напряжения $U_n > 1000$ В.

Для защиты персонала от соприкосновения с токоведущими или подвижными частями и защиты аппарата от попадания в него инородных тел устанавливаются специальные оболочки.

Согласно ГОСТ 14254-69 защитные свойства оболочки обозначаются буквами IP и двумя цифрами. Первая цифра обозначает степень защиты от прикосновения персонала к опасным деталям аппарата, вторая характеризует защиту от попадания внутрь аппарата жидкостей.

Ниже приводятся защитные свойства оболочек некоторых исполнений по ГОСТ 14254-69.

IP00. Открытое исполнение. Защита персонала от соприкосновения с токоведущими или подвижными частями отсутствует. Иностранные тела могут попадать внутрь аппарата.

IP20. Защищенное исполнение. Оболочка таких аппаратов предохраняет от случайного прикосновения к токоведущим или подвижным частям или от проникновения внутрь аппарата посторонних предметов. Оболочка не должна давать возможность соприкосновения с деталями аппарата металлическим шупом (диаметр 12 мм, длина 80 мм), шарик Ø 12 мм не должен проскакивать внутрь аппарата.

IP22. В дополнение к свойствам исполнения IP20 оболочка защищает от вредного воздействия капель жидкости, падающих на стенку оболочки, наклоненную к вертикали под углом в пределах 15°.

IP23. В дополнение к свойствам исполнения IP20 оболочка защищает от дождя, падающего под углом 60° к вертикали.

IP40. Оболочка аппарата защищает от попадания внутрь аппарата мелких предметов (диаметр более 1 мм).

IP42. В дополнение к свойствам исполнения IP40 оболочка защищает от воздействия капель жидкости, так же как IP22.

IP44. В дополнение к свойствам исполнения IP40 оболочка защищает от вредного воздействия брызг жидкости, падающей под любым углом к стенкам оболочки.

IP50. Оболочка аппарата защищает от вредного воздействия пыли (допускается попадание внутрь небольшого количества тальковой пудры, не нарушающего нормальной работы аппарата).

IP60. Пылезащищенное исполнение. Оболочка полностью препятствует попаданию пыли (тальковой пудры).

IP65. Пылеводозащищенное исполнение. В дополнение к свойствам исполнения IP60 оболочка защищает от воздействия струи воды, падающей под любым углом к ее поверхности.

IP66. Пылеводонепроницаемое исполнение. В дополнение к свойствам исполнения IP60 оболочка обеспечивает полную защиту от попадания воды внутрь аппарата при воздействии струи под любым углом к поверхности (морское исполнение).

IP67. Герметическое исполнение. В дополнение к свойствам исполнения IP60 оболочка обеспечивает полную герметичность аппарата.

Классификация аппаратов по принципу действия, роду тока, времени действия, конструктивным особенностям дается в главах, посвященных их устройству и характеристикам.

Требования к электрическим аппаратам весьма разнообразны и зависят от назначения, условий эксплуатации, необходимой надежности. Однако для всех аппаратов существуют общие требования, которым они должны удовлетворять.

1. Аппараты, включенные в цепь последовательно (выключатели, автоматы, контакторы), обтекаются током этой цепи. При номинальном режиме температура токоведущих элементов аппарата не должна превосходить значений, рекомендуемых соответствующим стандартом.

При коротком замыкании токоведущая цепь аппарата подвергается значительным термическим и динамическим нагрузкам, вызываемым большим током. Эти нагрузки не должны вызывать остаточных явлений, препятствующих дальнейшей нормальной работе аппарата.

2. Аппараты, которые по условиям работы могут включать и отключать токи короткого замыкания, должны иметь контакты, рассчитанные на этот режим работы.

Аппараты, предназначенные для частого включения и отключения номинального тока нагрузки, должны иметь высокую механическую и электрическую износостойкость.

3. Изоляция электрических аппаратов должна быть рассчитана из условия возможных перенапряжений, которые имеют место при работе установки, с некоторым запасом, учитывающим ухудшение свойств изоляции в эксплуатации вследствие осаждения пыли, грязи и влаги.

4. К каждому аппарату предъявляется ряд специфических требований, обусловленных его назначением. Так, например, выключатель высокого напряжения должен отключать ток короткого замыкания за малое время (0,04—0,06 с). Трансформатор тока должен давать токовую и угловую погрешности, не превышающие определенного значения. Контактор должен иметь высокую механическую и электрическую износостойкость.

5. В связи с широкой автоматизацией производственных процессов, применением сложных схем автоматики увеличивается число аппаратов, участвующих в работе, повышаются требования к надежности аппаратов.

6. Все без исключения аппараты должны иметь возможно малую массу, стоимость, габариты. На их установку и обслуживание должно затрачиваться немного времени. Аппараты должны иметь конструкцию, позволяющую широко внедрять автоматизацию производственных процессов при их изготовлении.

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Глава первая

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ СИЛЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТАХ

1-1. Общие сведения

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

Электродинамической стойкостью аппарата называется его способность противостоять силам, возникающим при прохождении токов короткого замыкания. Эта величина может выражаться либо непосредственно амплитудным значением тока $i_{дин}$, при котором механические напряжения в деталях аппарата не выходят за пределы допустимых значений, либо кратностью этого тока относительно амплитуды номинального тока

$$k_{дин} = i_{дин} / \sqrt{2} I_n.$$

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

1-2. Методы расчета электродинамических усилий (э. д. у.) и направление их действия

а) **Методы расчета.** Для расчета э. д. у. используются два метода. В первом — сила рассматривается как результат взаимодействия проводника с током и магнитного поля.

Если элементарный проводник $d\mathbf{l}$, м, с током i , А, находится в магнитном поле с индукцией \mathbf{B} , Т, создаваемой другими проводниками (рис. 1-1, а), то сила $d\mathbf{F}$, Н, действующая на этот элемент, равна:

$$d\mathbf{F} = i d\mathbf{l} \times \mathbf{B} = iB dl \sin \beta,$$

где i — ток; β — угол между векторами элемента $d\mathbf{l}$ и индукции \mathbf{B} , измеряемый углом поворота вектора $d\mathbf{l}$ до век-

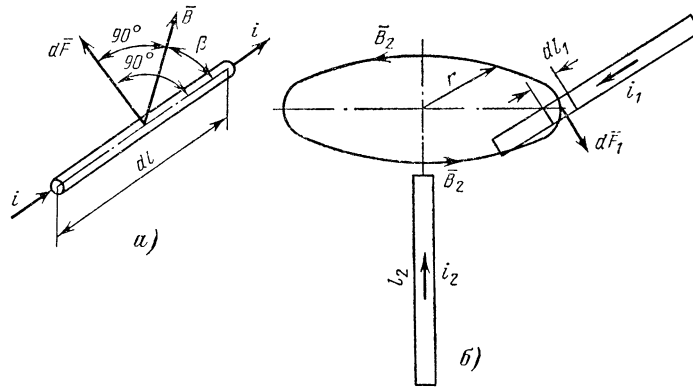


Рис. 1-1. Направление э. д. у., действующего на элемент с током.

тора \mathbf{B} по кратчайшему расстоянию. За направление $d\mathbf{l}$ принимается направление тока в элементе. Направление индукции \mathbf{B} , создаваемой другим проводником, определяется по правилу буравчика, а направление силы — по правилу левой руки [Л. 1-1].

Для определения полной силы, действующей на проводник длиной l , необходимо просуммировать силы, действующие на все его элементы:

$$F = \int_0^l dF = \int_0^l Bi \sin \beta dl. \quad (1-1)$$

В случае любого расположения проводников в одной плоскости $\beta = 90^\circ$ и уравнение (1-1) упрощается:

$$F = \int_0^l Bi dl. \quad (1-2)$$

Описанный метод рекомендуется применять тогда, когда можно аналитически найти индукцию в любой точке проводника, для которого необходимо определить силу. Индукцию определяют, используя закон Био-Савара-Лапласа [Л. 1-1].

Второй метод основан на использовании энергетического баланса системы проводников с током [Л. 1-1]. Если пренебречь электростатической энергией системы и принять, что при деформации токоведущих контуров или при их перемещении под действием э. д. у. токи во всех контурах остаются неизменными, то силу можно найти по уравнению

$$F = \partial W / \partial x, \quad (1-3)$$

где W — электромагнитная энергия;

x — возможное перемещение в направлении действия силы.

Таким образом, сила равна частной производной от электромагнитной энергии данной системы по координате, в направлении которой действует сила. При расчете э. д. у., действующих при коротком замыкании величины токов в контурах можно считать неизменными [Л. 1-2].

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

$$W = \frac{1}{2} L_1 i_1^2 + \frac{1}{2} L_2 i_2^2 + M i_1 i_2, \quad (1-4)$$

где L_1 и L_2 — индуктивности контуров;

i_1 и i_2 — токи, протекающие в них;

M — взаимная индуктивность.

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

Уравнение (1-4) дает возможность рассчитать как силы, действующие в изолированном контуре, так и силу взаимодействия контура со всеми остальными.

Для определения сил внутри одного независимого контура пользуемся уравнением

$$F = \frac{\partial W}{\partial x} = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L}{\partial x}. \quad (1-5)$$

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

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

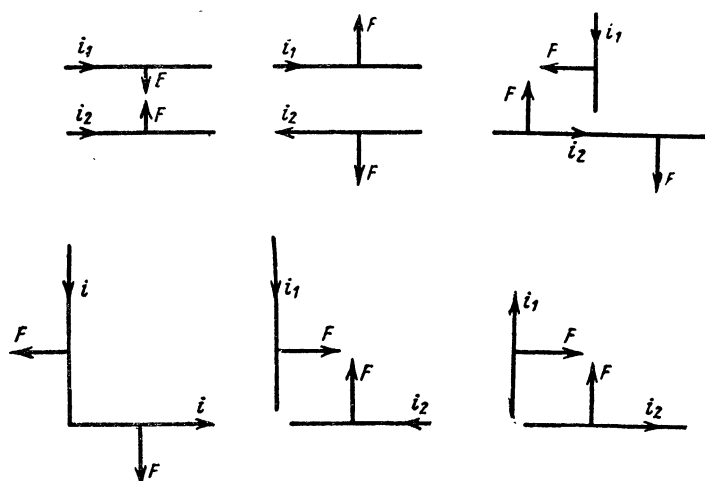


Рис. 1-2. Направление э. д. у. при различном расположении проводников.

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

б) **Направление действия э. д. у.** Найдем направление силы, действующей на элемент dl_1 с током i_1 (рис. 1-1, б). Линия индукции B_2 , создаваемой током i_2 , является окружностью с радиусом r , лежащей в плоскости, перпендикулярной l_2 . Направление силы dF_1 определяется по правилу левой руки и показано на рис. 1-1, б.

Для плоской задачи, когда все проводники лежат в одной плоскости, результирующая суммарная индукция, действующая на проводник, всегда перпендикулярна к этой плоскости, а сила лежит в плоскости. Направления э. д. у. для некоторых случаев расположения проводников в одной плоскости показаны на рис. 1-2.

В том случае, когда для определения э. д. у. пользуются энергетической формулой, направление силы находят из следующих соображений. Согласно (1-3) положительному направлению силы соответствует возрастание энергии системы $\partial W/\partial x > 0$.

Таким образом, сила, действующая на токоведущие части, направлена так, чтобы электромагнитная энергия системы возрастала.

Для кольцевого контура (рис. 1-8)

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

где Ψ — потокосцепление;

Φ — поток;

w — число витков в контуре.

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

В случае двух витков (рис. 1-9) или катушек с разными направлениями токов сила F направлена так, чтобы отбросить витки друг от друга, так как потокосцепление увеличивается с ростом расстояния h . Минимальное потокосцепление будет иметь место при $h=0$. Если токи текут в одинаковом направлении, то витки притягиваются.

1-3. Силы между параллельными проводниками

Рассмотрим вначале задачу для бесконечно тонких проводников конечной длины (рис. 1-3). В этом случае легко аналитически найти индукцию в любой точке пространства. Поэтому для определения силы воспользуемся первым методом.

Согласно закону Био — Савара — Лапласа [Л. 1-1] элементарная индукция от элемента тока $i_1 dy$ в месте расположения элемента dx равна:

$$dB = d\mu_0 H = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{i_1 dy}{r^2} \sin \alpha, \quad (1-6)$$

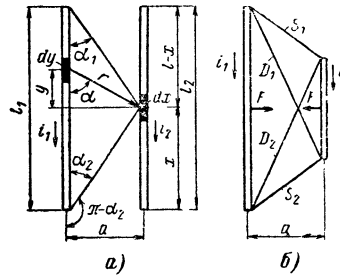


Рис. 1-3. Электродинамические усилия между параллельными проводниками.

где μ_0 — абсолютная магнитная проницаемость воздуха, равная $0,4 \pi \cdot 10^{-6}$ Г/м;
 α — угол между током i_1 и лучом r от dy к рассматриваемому dx .

Полная индукция от проводника l_1 в той точке, где расположен элемент dx , равна:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} i_1 \int_0^{l_1} \frac{\sin \alpha}{r^2} dy. \quad (1-7)$$

Перейдем к новой переменной

$$y = \frac{a}{\tan \alpha}; \quad r = \frac{a}{\sin \alpha}; \quad dy = -\frac{a}{\sin^2 \alpha} d\alpha.$$

После подстановки y ; r и dy в (1-7) получим:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} i_1 \int_{\pi-\alpha_2}^{\alpha_1} \left(-\frac{\sin \alpha}{a} \right) d\alpha = \frac{\mu_0}{4\pi} i_1 \frac{\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2}{a}. \quad (1-8)$$

Сила взаимодействия между проводником l_1 и элементом dx

$$dF_x = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2}{a} i_1 i_2 dx. \quad (1-9)$$

Для определения полной силы, действующей на проводник l_2 , подставим (1-8) в (1-1).

Переменной интегрирования теперь является x — координата на проводнике l_2 . Углы α_1 и α_2 для каждой точки x выражаются следующим образом:

$$\cos \alpha_1 = \frac{l-x}{\sqrt{(l-x)^2 + a^2}}; \quad \cos \alpha_2 = \frac{x}{\sqrt{x^2 + a^2}};$$

тогда

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

Если $l_1 = l_2 = l$, то

$$F_x = 10^{-7} i_1 i_2 \frac{2l}{a} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{a}{l} \right)^2} - \frac{a}{l} \right], \text{ Н.} \quad (1-10)$$

Произведение $\frac{2l}{a} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{a}{l}\right)^2} - \frac{a}{l} \right]$ зависит только от размеров проводников и их расположения. Назовем его геометрическим фактором. Тогда

$$F_x = 10^{-7} i_1 i_2 k_r. \quad (1-11)$$

Если расстояние между проводниками значительно меньше их длины, т. е. $\frac{a}{l} \ll 1$, то k_r можно принять равным $2l/a$ (случай бесконечно длинных шин). При $a/l \leq 0,1$ расчет по формуле

$$F_x = 10^{-7} i_1 i_2 \frac{2l}{a} \quad (1-12)$$

дает погрешность не более 5% (в сторону увеличения). Для двух параллельных проводников разной длины, расположенных с любым сдвигом, Г. Б. Холявский [Л. 1-2] получил удобную для расчета формулу (рис. 1-3, б)

$$k_r = \frac{\Sigma D - \Sigma S}{a} = \frac{(D_1 + D_2) - (S_1 + S_2)}{a}, \quad (1-13)$$

где ΣD — сумма диагоналей трапеции, построенной на взаимодействующих проводниках;
 ΣS — сумма боковых сторон этой трапеции;
 a — расстояние между проводниками.

Следует отметить, что при параллельных отрезках проводников различной длины, как угодно расположенных друг относительно друга, силы, действующие на оба проводника, одинаковы. В общем случае (рис. 1-4) равнодействующая э.д.у. не приложена к середине проводника. Точку приложения равнодействующей можно найти графоаналитическим путем [Л. 1-2]. Интересующий нас отрезок I раз-

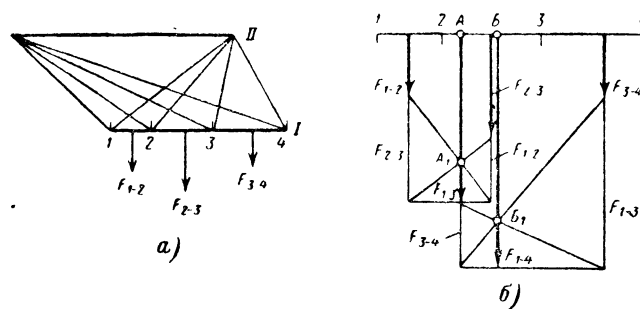


Рис. 1-4. Определение точки приложения равнодействующей силы.

бывается на участки (рис. 1-4, а). Там, где ожидается большая удельная э.д.у., длина участка берется меньше. Находятся э.д.у. F_{1-2} ; F_{2-3} ; F_{3-4} между этими участками и проводником II. Эти силы прикладываем посредине участков 1—2, 2—3, 3—4; затем силы суммируем (рис. 1-4, б). Сначала складываем F_{1-2} и F_{2-3} . Для этого F_{1-2} дополняем F_{2-3} , а $F_{2-3}-F_{1-2}$ и строим прямоугольник. Соединяем конец вектора F_{1-2} с нижней правой вершиной, а конец вектора F_{2-3} с нижней левой вершиной. Из точки пересечения A_1 проводим прямую, параллельную F_{1-2} . Эта точка определит положение вектора $F_{1-3}=F_{1-2}+F_{2-3}$. Аналогично находим положение результирующего вектора F_{1-4} .

При нахождении электродинамических сил мы считали, что сечение проводников бесконечно мало и весь ток идет по их геометрической оси. В действительности сечение проводников всегда конечно. Можно показать [Л. 1-8], что для проводников круглого и трубчатого сечений форма сечения не оказывает влияния на электродинамическую силу. В этом случае при расчетах можно принять, что ток идет по геометрической оси. Следует отметить, что поверхностный эффект в проводниках круглого сечения не сказывается на э. д. у., а эффект близости, смещающий оси токов в проводниках, оказывает влияние, вызывая увеличение силы при встречных токах и уменьшение при согласных токах [Л. 1-9].

Для шин прямоугольного сечения форма сечения влияет на электродинамическую силу [Л. 1-3]. В этом случае можно пользоваться уравнением (1-11) с учетом формы сечения проводника:

$$F = 10^{-7} i_1 i_2 k_r k_\phi.$$

Кривые для коэффициента формы k_ϕ приведены на рис. 1-5.

1-4. Силы и моменты, действующие на перемычку

В электрических аппаратах очень часто встречается расположение частей токоведущего контура под прямым углом (рис. 1-6, а). Ради упрощения задачи при расчете принимаем, что ток течет по геометрической оси проводников и вертикальный проводник уходит в бесконечность.

Сила, действующая на элемент перемычки dx , равна:

$$dF_x = iB_x dx.$$

Индукция B_x от полубесконечного проводника в точке на расстоянии x от его оси равна:

$$B_x = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{i}{x}. \quad (1-14)$$

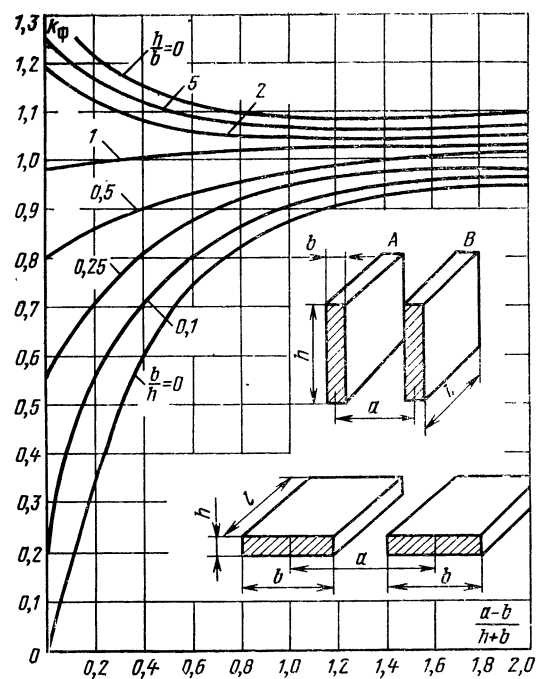


Рис. 1-5. Кривые, учитывающие форму сечения проводника.

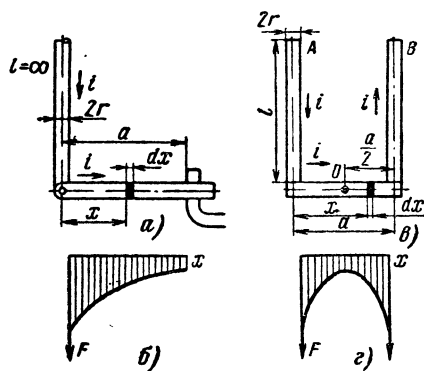


Рис. 1-6. Электродинамические усилия между проводниками, расположенными под углом.

Указанный закон изменения индукции справедлив во всех точках пространства, за исключением $x < r$ [Л. 1-1].

Сила на участке x равна $F_x = 10^{-7} i^2 \ln \frac{x}{r}$. Тогда полная сила F , действующая на перемычку на длине от r до a , будет равна:

$$F = \frac{\mu_0}{4\pi} i^2 \ln \frac{a}{r} = 10^{-7} i^2 \ln \frac{a}{r}. \quad (1-15)$$

Если длина вертикального проводника конечна, то индукция в действительности меньше, чем это следует из уравнения (1-14), а реальная сила, действующая на перемычку, меньше, чем дает уравнение (1-15). Соответствующие формулы и их вывод даны в [Л.1-3].

Распределение силы вдоль перемычки представлено на рис. 1-6, б. По мере удаления от оси вертикального проводника индукция уменьшается, что ведет к уменьшению силы.

В масляных выключателях и других аппаратах токоведущая цепь может иметь вид «петли» (рис. 1-6, в). На перемычку в этом случае действует сила как от правого, так и от левого вертикального проводников, т. е. сила будет вдвое больше той, которую получаем по формуле (1-15). Если «петля» выполнена из проводников круглого сечения, то силу можно найти, воспользовавшись энергетическим методом.

Известно, что индуктивность П-образной петли равна:

$$L = \frac{\mu_0}{\pi} l \left(\ln \frac{a}{r} + 0,25 \right). \quad (1-16)$$

Дифференцируя (1-16) по l и подставляя в (1-5), получаем:

$$\begin{aligned} F &= \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dl} = \frac{1}{2} i^2 \frac{\mu_0}{\pi} \left(\ln \frac{a}{r} + 0,25 \right) = \\ &= 2 \cdot 10^{-7} i^2 \left(\ln \frac{a}{r} + 0,25 \right), \text{ Н.} \end{aligned} \quad (1-17)$$

Формула (1-17) учитывает и силу, возникающую в месте перехода тока из одного проводника в другой.

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

шей конечную длину вертикального проводника [Л.1-3]:

$$F = 2 \cdot 10^{-7} i^2 \left[\ln \frac{2a}{r \left(1 + \sqrt{\left(\frac{a}{l} \right)^2 + 1} \right)} + 0,25 \right], \text{ Н.} \quad (1-18)$$

Следует отметить, что силы, действующие на вертикальные проводники и на горизонтальный проводник, в общем случае, когда длины проводников разные, неодинаковы [Л.1-2].

При расчете электродинамической стойкости необходимо определять момент э. д. у. относительно точки вращения подвижного контакта либо относительно точки крепления. Рассчитаем изгибающий момент, создаваемый э. д. у. в точке O крепления траверсы к тяге (рис. 1-6, в). При выводе положим, что вертикальные проводники бесконечны и что ток проходит по их геометрическим осям.

Элементарный момент, Н·м, в сечении, отстоящем на расстоянии x от левого проводника, равен:

$$dM = dM_1 + dM_2,$$

где dM_1 — элементарный момент от левого проводника:

$$dM_1 = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{i^2}{x} \left(x - \frac{a}{2} \right) dx = 10^{-7} \frac{i^2}{x} \left(x - \frac{a}{2} \right) dx,$$

а dM_2 — элементарный момент от правого проводника:

$$dM_2 = 10^{-7} \frac{i^2}{a-x} \left(x - \frac{a}{2} \right) dx.$$

После интегрирования получим:

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

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

$$M_0 = 10^{-7} i^2 \frac{a}{2} \left(\ln \frac{a}{4r} + \frac{2r}{a} + 0,25 \right). \quad (1-19)$$

В практике приходится очень часто сталкиваться со сложными токоведущими контурами, состоящими из большого числа проводников. Расчет результирующей силы, действующей на отрезки конту-

ра, по аналитическим формулам получается очень сложным, а часто просто невозможным. В этом случае рекомендуется производить расчет с помощью приближенного метода, пригодного даже для случая расположения проводников в разных плоскостях [Л. 1-2]. Сущность

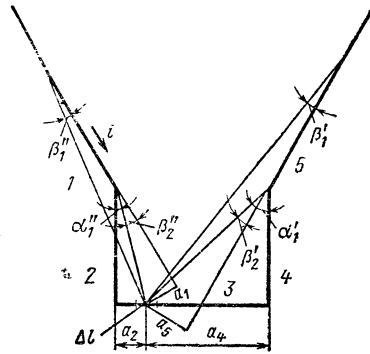


Рис. 1-7. Графоаналитическое определение э. д. у.

метода состоит в том, что проводник, для которого определяются э. д. у., разбивается на несколько равных участков. С помощью (1-8) определяется результирующая индукция от всех остальных токоведущих частей. Когда все проводники лежат в одной плоскости, векторы индукции в данной точке от любых проводников лежат на одной прямой, перпендикулярной к этой плоскости. Результирующая индукция находится путем алгебраического сложения отдельных составляющих.

Сила, действующая на участок длиной Δl , равна:

$$f_{\text{уч}} = B_{\text{уч.ср}} i \Delta l, \quad (1-20)$$

где $B_{\text{уч.ср}}$ — индукция в середине участка Δl от всех остальных частей контура;

i — значение тока в участке Δl .

Аналогичный расчет проводится для всех участков проводника.

Используем этот метод для расчета сил, действующих на траверсу масляного выключателя (рис. 1-7). Разбиваем траверсу на несколько частей и рассматриваем силу, действующую на каждый участок. Индукция в середине участка Δl равна:

$$B_{\text{уч.ср}} = -|B_1| + |B_2| + |B_4| + |B_5|,$$

где $|B_1|$, $|B_2|$, $|B_4|$, $|B_5|$ — модули индукций, создаваемых проводниками 1, 2, 4, 5.

Индукции от всех проводников можно найти, воспользовавшись (1-8):

$$B_1 = 10^{-7} i \frac{1}{a_1} [\cos \beta_1'' + \cos (\pi - \beta_2'')];$$

$$B_2 = 10^{-7} i \frac{1}{a_2} \cos \alpha_1'' \text{ и т. д.}$$

Подобный расчет производится для всех участков проводника 3, после чего строится эпюра распределения силы вдоль траверсы. Результирующая сила равна сумме сил, действующих на участки. Точку приложения равнодействующей находим, пользуясь методикой § 1-3, или по [Л. 1-9].

Указанный метод расчета э. д. у. дает приближенное распределение силы вдоль проводника. Изгибающий момент, создаваемый э. д. у. относительно любой точки, может быть легко определен по известным правилам механики.

1-5. Силы, действующие в витке, катушке и между катушками

а) **Расчет э. д. у. в витке.** Рассмотрим расчет силы в круговом витке рис. 1-8. Индуктивность, Γ , такого витка с точностью до 1% (при условии, что $r/R \leq 0,25$) выражается формулой

$$L = \mu_0 R \left(\ln \frac{8R}{r} - 1,75 \right). \quad (1-21)$$

Поскольку известна аналитическая зависимость индуктивности от размеров витка, при определении э. д. у.

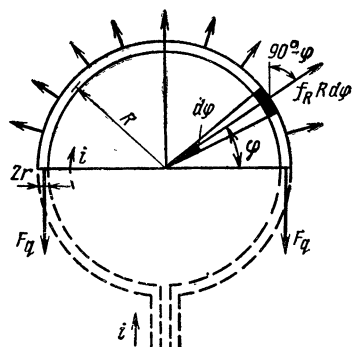


Рис. 1-8. Электродинамические усилия в кольце.

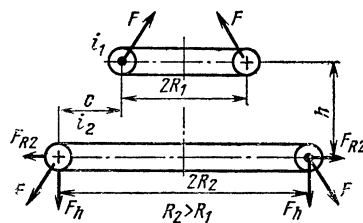


Рис. 1-9. Электродинамические усилия между витками.

целесообразно воспользоваться энергетическим методом. Сила, действующая в витке, направлена по радиусу; с ростом радиуса возрастает индуктивность, а следовательно, электромагнитная энергия проводника (1-5). Эта сила, H , равна:

$$F_R = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dR}. \quad (1-22)$$

Из уравнений (1-21) и (1-22) получим:

$$F_R = \frac{\mu_0}{2} i^2 \left(\ln \frac{8R}{r} - 0,75 \right).$$

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

Для определения F_q рассмотрим уравнение равновесия полувитка.

Очевидно, что

$$F_q = \int_0^{\frac{\pi}{2}} f_R R d\varphi \sin \varphi, \quad (1-23)$$

где f_R — сила, действующая на единицу длины, равная $F_R/2\pi R$.

После интегрирования получим:

$$F_q = 10^{-7} i^2 \left(\ln \frac{8R}{r} - 0,75 \right). \quad (1-24)$$

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

б) Электродинамические силы в цилиндрической катушке направлены таким образом, чтобы возрастало ее потокоцепление. Поэтому при прохождении тока в обмотке возникают силы, стремящиеся сжать обмотку по высоте и толщине и увеличить средний диаметр.

Для расчета сил, действующих в различных точках катушки, определяют индукцию в этих точках и силу рассчитывают с помощью уравнения (1-2) [Л. 1-4].

в) Сила взаимодействия между витками и катушками. Рассмотрим силу взаимодействия двух круговых витков (рис. 1-9). Если расстояние между витками соизмеримо с их диаметрами и последние мало отличаются друг от друга, то взаимная индуктивность, Γ , может быть выражена простой формулой

$$M = \mu_0 R_1 \left[\ln \frac{8R_1}{\sqrt{h^2 + c^2}} - 2 \right], \quad (1-25)$$

где $c = R_2 - R_1$.

Рассмотрим силу, действующую на контур с током i_2 .

Вертикальная составляющая силы согласно (1-3) есть

$$F_h = \frac{dW}{dh} = i_1 i_2 \frac{dM}{dh} = \mu_0 i_1 i_2 \frac{R_1 h}{h^2 + c^2}. \quad (1-26)$$

Горизонтальная составляющая равна:

$$F_{R2} = \frac{dW}{dR_2} = \frac{1}{2} i_2^2 \frac{dL_2}{dR_2} + i_1 i_2 \frac{dM}{dR_2}. \quad (1-26a)$$

В уравнениях (1-26) и (1-26a) надо учитывать направления токов i_1 и i_2 .

Первое слагаемое — сила, возникающая в контуре за счет тока i_2 , второе — в результате воздействия витка с током i_1 . Зависимости сил F_h и F_{R2} от расстояния h показаны на рис. 1-10.

Расчет э. д. у. между витками для любого отношения $R_1 : R_2$ и h приведен в [Л. 1-5].

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

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

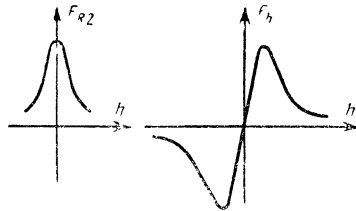


Рис. 1-10. Зависимость F_h и F_{R2} от h .

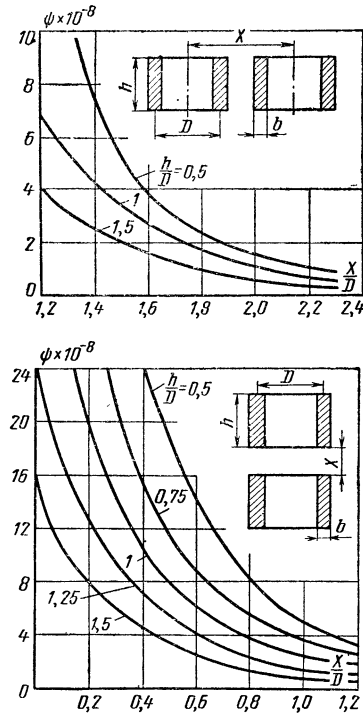


Рис. 1-11. К определению э. д. у. между катушками.

Согласно [Л. 1-4] производная $\partial M / \partial x$ равна:

$$\frac{\partial M}{\partial x} = \omega_1 \omega_2 \psi, \quad (1-27)$$

где ω_1, ω_2 — число витков катушек; ψ — Г/м. Коэффициент ψ зависит от размеров катушек и их расположения и определяется с помощью семейства кривых Двайта, пред-

ставленных на рис. 1-11 [Л. 1-4]. Эти кривые справедливы для катушек, у которых $1,5 \geq h/D \geq 0,5$ и $b/D = 1/6$. Для плоских катушек, у которых $h/D < 0,5$, коэффициент ψ можно найти по кривым Хака, приведенным в [Л. 1-4].

1-6. Электродинамические усилия в месте изменения сечения проводника

При изменении сечения проводника линии тока искривляются, в результате сила F , действующая на линию тока, получает продольную F_2 и поперечную F_1 составляющие. Продольная составляющая стремится разорвать место перехода вдоль оси проводника (рис. 1-12) и направлена в сторону большего сечения:

$$F_2 = \frac{\mu_0}{4\pi} i^2 \ln \frac{r_2}{r_1} = 10^{-7} i^2 \ln \frac{r_2}{r_1}. \quad (1-28)$$

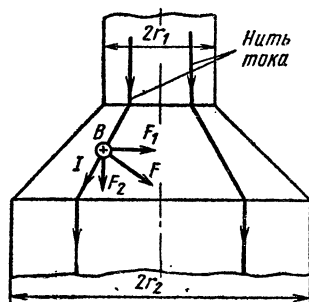


Рис. 1-12. Электродинамические усилия в месте изменения сечения проводника.

Электродинамическая сила, возникающая при изменении сечения, зависит только от отношения конечного и начального радиусов и не зависит от формы перехода при осесимметричном проводнике. Подробный вывод формулы для расчета этих сил приведен в [Л. 1-5].

В электрическом контакте при переходе тока из одного контакта в другой происходит искривление линий тока, аналогичное рассмотренному. Для односточечного контакта (рис. 3-2) соприкосновение контактов происходит по площадке касания $\pi r_k^2 = \pi a^2$. Если положить, что эта площадка находится в центре цилиндрических проводников, то сила, действующая на каждый полукontakt, может быть рассчитана по формуле

$$F = \frac{\mu_0}{4\pi} i^2 \ln \frac{r}{r_k} = 10^{-7} i^2 \ln \frac{r}{r_k}, \quad (1-29)$$

где r — радиус цилиндрического контакта;
 r_k — радиус круглой площадки касания.

Для того чтобы контакт был устойчивым в динамическом отношении, сила нажатия контактов F_k должна быть больше силы отброса.

1-7. Электродинамические усилия при наличии ферромагнитных частей

Рассмотрим проводник с током вблизи ферромагнитной стенки с бесконечной магнитной проницаемостью. При приближении проводника к стенке магнитная проводимость, а следовательно, и поток

увеличиваются, так как сокращается путь потока по воздуху. На проводник действует сила, притягивающая его к стенке:

$$F = \frac{dW}{dx} = \frac{1}{2} I \frac{d\Phi}{dx}.$$

Магнитное поле не изменится, если ферромагнитную стенку отбросить, а вместо нее симметрично расположить второй проводник с током (рис. 1-13). Длина магнитной линии возрастет в 2 раза и

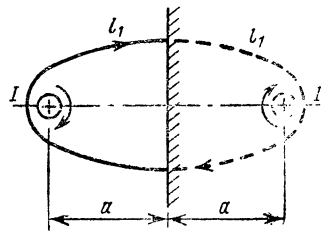


Рис. 1-13. Электродинамические усилия между проводником и ферромагнитной стенкой.

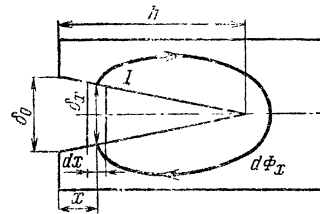


Рис. 1-14. Электродинамические усилия, действующие на дугу в стальной решетке.

намагничивающая сила также возрастет в 2 раза [Л. 1-3]. Тогда сила, действующая на проводник, может быть рассчитана по формуле (1-10).

В дугогасительных камерах аппаратов низкого и высокого напряжения применяется решетка из набора ферромагнитных пластин с пазом.

Электрическая дуга, возникающая между контактами аппарата, является своеобразным проводником с током. Взаимодействие этого проводника с решеткой создает электромагнитную силу,двигающую дугу.

Рассмотрим силу, действующую на проводник (дугу), симметрично расположенный в пазу клиновидного сечения (рис. 1-14). Дуга находится левее координаты $x+dx/2$. При расчете пренебрегаем магнитным сопротивлением стали и потоками рассеяния, выходящими из торца решетки.

Сила, действующая на проводник (дугу), согласно (1-3) равна:

$$F_x = \frac{dW}{dx} = \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{2} i \Psi \right) = \frac{1}{2} i \frac{d\Psi}{dx} = \frac{1}{2} I \frac{d\Phi}{dx}. \quad (1-30)$$

Определим элементарный поток $d\Phi$, связанный с проводником, находящимся на расстоянии x от устья решетки:

$$d\Phi_x = I dG = I \mu_0 \frac{l dx}{\delta_x}, \quad (1-31)$$

где dG — магнитная проводимость промежутка длиной δ_x и сечением $l dx$;

l — активная длина решетки.

Воспользовавшись (1-30) и (1-31), получим:

$$F_x = \frac{1}{2} I \frac{d\Phi_x}{dx} = \frac{1}{2} \mu_0 I^2 \frac{l}{\delta_x} = \frac{1}{2} \mu_0 I^2 \frac{lh}{\delta_0(h-x)} =$$

$$= 2\pi \cdot 10^{-7} I^2 \frac{lh}{\delta_0(h-x)}, \text{ Н}, \quad (1-32)$$

где $\delta_x = \delta_0 \frac{h-x}{h}$ — зазор, соответствующий координате x .

По мере роста x величина силы возрастает, а при $x=h$ сила достигает бесконечно большого значения.

В действительности по мере уменьшения δ_x будет возрастать падение магнитного потенциала в стали.

Уравнением (1-32) можно пользоваться только тогда, когда падение магнитного потенциала в стали невелико (не более 10% общей магнитодвижущей силы).

Сила, действующая на дугу, может значительно искажаться ее формой. После расхождения контактов дуга имеет форму части окружности. Это, конечно, приводит к тому, что сначала в решетку входит средняя часть дуги, а потом крайние ее части. Поэтому проведенный расчет носит ориентировочный характер.

1-8. Электродинамические усилия при переменном токе. Механический резонанс

а) **Однофазная цепь.** Пусть ток не имеет апериодической составляющей и изменяется по закону

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

где I_m — амплитудное значение тока; ω — угловая частота.

Если токи в проводниках имеют одинаковое направление, то проводники притягиваются и сила будет равна:

$$F = 10^{-7} k_r I_m^2 \sin^2 \omega t = \frac{F_m}{2} (1 - \cos 2\omega t), \quad (1-33)$$

где F_m — максимальное значение силы, равное $10^{-7} k_r \times I_m^2$.

Таким образом, сила имеет постоянную составляющую $F_m/2$ и переменную составляющую двойной частоты $(F_m/2) \cos 2\omega t$. Среднее значение силы за период

$$F_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T F dt = \frac{F_m}{2} = 10^{-7} k_r I^2, \quad (1-34)$$

где I — действующее значение тока.

Изменение силы во времени при переменном токе показано на рис. 1-15. Характерно, что в однофазной цепи сила, меняясь во времени, не изменяет своего знака. На этом рисунке $c=10^{-7} k_r$.

При включении на существующее короткое замыкание может возникнуть аperiodическая составляющая тока, величина которой зависит от момента замыкания цепи относительно нулевого значения переменной составляющей установившегося тока.

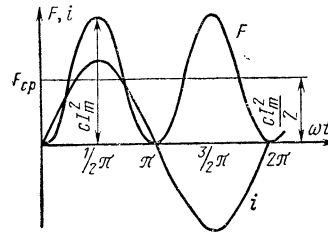


Рис. 1-15. Зависимость $F(t)$ при синусоидальном токе.

При расчете э. д. у. берется наиболее тяжелый случай, когда аperiodическая составляющая тока максимальна. В большинстве случаев можно положить, что в процессе короткого замыкания ток изменяется по закону

$$i = I_m (e^{-tR/L} - \cos \omega t) = I_m (e^{-t/T_a} - \cos \omega t), \quad (1-35)$$

где R — активное сопротивление цепи короткого замыкания;

L — индуктивность этой цепи;

$T_a = \frac{L}{R}$ — постоянная времени аperiodической составляющей.

Через время $t = \pi/\omega$ в цепи наступает ударный ток, равный:

$$i_{уд} = I_m \left(1 + e^{-\frac{R}{L} \frac{\pi}{\omega}} \right) = k_{уд} I_m; \quad k_{уд} = 1 + e^{-\pi/\omega T_a}. \quad (1-36)$$

Ударный коэффициент $k_{уд}$ зависит от постоянной времени T_a . Чем больше индуктивность L и меньше активное сопротивление R , тем больше $k_{уд}$. При прочих равных условиях с ростом мощности установки уменьшается сопротивление и увеличивается $k_{уд}$. При расчетах принимают $k_{уд} = 1,8$. При наличии аperiodической составляющей тока сила во времени меняется по уравнению

$$F = 10^{-7} k_r I_m^2 (e^{-t/T_a} - \cos \omega t)^2 \quad (1-37)$$

и представлена на рис. 1-16.

$$F=10^{-7} k_r k_{y_d}^2 I_m^2 = 3,24 \cdot 10^{-7} k_r I_m^2. \quad (1-38)$$

$$F = 10^{-7} k_{\Gamma} k_{y_{\Gamma}}^2 I_m^2 = 3,24 \cdot 10^{-7} k_{\Gamma} I_m^2. \quad (1-38)$$

$\uparrow F, L$

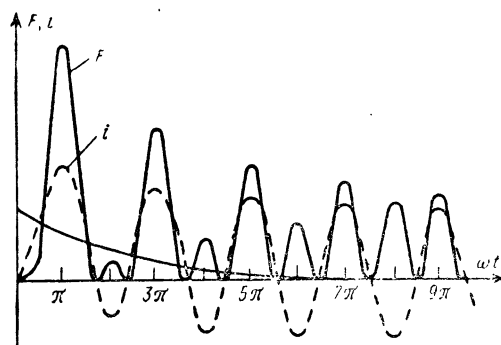


Рис. 1-16. Зависимость $F(t)$ при наличии аperiodической составляющей тока.

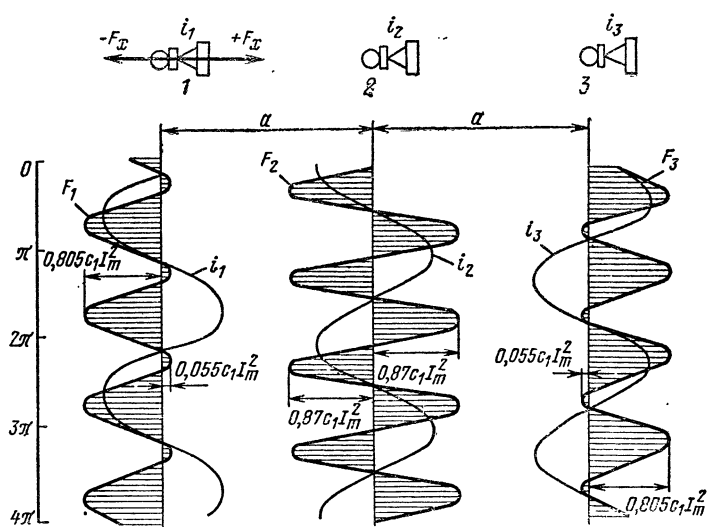


Рис. 1-17. Электродинамические усилия, действующие в трехфазной цепи.

б) **Электродинамические силы в трехфазной цепи при отсутствии апериодической составляющей тока.** Определим э. д. у., действующие на параллельные проводники трехфазной системы, расположенные в одной плоскости (рис. 1-17). Для простоты расчетов положим, что расстояние между шинами мало по сравнению с их длиной, а токи проходят по геометрическим осям проводников. За положительное направление силы примем направление оси x . Мгновенные значения токов, текущих в проводниках, будут:

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

Сила, действующая на проводник фазы 1, равна:

$$F_1 = F_{12} + F_{13},$$

где F_{12} — э. д. у. между проводниками фаз 1 и 2;

F_{13} — э. д. у. между проводниками фаз 1 и 3.

При принятых выше допущениях

$$F_{12} = c_1 I_m^2 \sin \omega t \sin (\omega t - 2\pi/3), \quad (1-39)$$

где $c_1 = 10^{-7} 2l/a$ (l — длина проводника; a — расстояние между осями);

$$F_{13} = \frac{1}{2} c_1 I_m^2 \sin \omega t \sin (\omega t - 4\pi/3); \quad (1-40)$$

$$F_1 = c_1 I_m^2 \sin \omega t \left[\sin \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right) + \frac{1}{2} \sin (\omega t - 4\pi/3) \right]. \quad (1-41)$$

Произведя исследование (1-41) на максимум, получим, что максимальное значение отталкивающей силы равно:

$$F_{\text{1отт. макс}} = -0,805 c_1 I_m^2; \quad F_{\text{1прит. макс}} = 0,055 c_1 I_m^2. \quad (1-42)$$

Мгновенное значение силы, действующей на среднюю фазу, равно:

$$\begin{aligned} F_2 &= F_{21} + F_{23} = c_1 I_m^2 (\sin \omega t - 2\pi/3) \times \\ &\times [\sin \omega t + \sin (\omega t - 4\pi/3)]. \end{aligned} \quad (1-43)$$

Исследование уравнения (1-43) показывает, что мак-

симальное значение притягивающей силы равно максимальному значению отталкивающей силы:

$$F_{2\text{отт.макс}} = F_{2\text{прит.макс}} = 0,87 c_1 I_m^2. \quad (1-44)$$

Проведя аналогично расчет э. д. у. для третьей фазы, получим:

$$F_{3\text{отт.макс}} = -F_{1\text{отт.макс}}; F_{3\text{прит.макс}} = -F_{1\text{прит.макс}}. \quad (1-45)$$

Наглядное представление о силах, возникающих в трехфазной системе, дает рис. 1-17.

Наибольшее усилие действует на проводник средней фазы. Этот случай принимается за расчетный:

$$F_{\text{макс.расч}} = 0,87 c_1 I_m^2. \quad (1-46)$$

Для трехфазной системы характерным является изменение знака э. д. у. В трехфазной системе токи сдвинуты на 120° . Если в какой-то момент времени произведение мгновенных значений токов двух соседних фаз положительно, то вследствие фазового сдвига 120° в другой момент времени произведение мгновенных значений токов может быть отрицательным.

Изолятор фазы 1 работает как на сжатие, так и на растяжение, причем растягивающее усилие значительно больше, чем сжимающее. Изолятор фазы 2 работает как на сжатие, так и на растяжение, причем максимальные растягивающие и сжимающие усилия одинаковы. Изолятор фазы 3 испытывает как сжимающие, так и растягивающие усилия, причем сжимающие усилия значительно больше растягивающих. Для фарфоровых изоляторов растягивающие усилия более опасны, чем сжимающие, так как фарфор плохо работает на растяжение. Если на рис. 1-17 изоляторы расположить вертикально, то они работают в более легких условиях, так как деформация растяжения заменяется изгибом.

в) Расчет электродинамических сил в трехфазной системе при наличии апериодической составляющей тока. В однофазной системе теоретически возможен случай короткого замыкания, при котором апериодическая составляющая тока будет равна нулю.

В трехфазной системе при одновременном замыкании всех трех фаз апериодическая составляющая тока появляется обязательно, так как ни в какой момент времени все три тока не могут быть равны нулю. Наличие этой

составляющей в токе короткого замыкания влияет на величины э. д. у., действующих на проводники.

Максимальное значение сил, возникающих в этом случае, зависит как от момента включения относительно амплитуды периодической составляющей тока, так и от времени [Л. 1-3]. Решение этого вопроса связано с большими трудностями. Поэтому расчет э. д. у. с учетом апериодической составляющей можно проводить по упрощенной методике, которая дает результаты с погрешностью в сторону запаса. Эта методика полагает, что во всех трех фазах проходит симметричный ток с амплитудой, равной ударному току. Тогда максимальное отталкивающее усилие, действующее на провод фазы I , будет равно:

$$F_{\text{Iотт.макс}} = 0,805c_1 (k_{\text{уд}} I_m)^2. \quad (1-47)$$

Максимальная сила, действующая на провод средней фазы, согласно (1-46) равна:

$$F_{2\text{макс}} = 0,87c_1 (k_{\text{уд}} I_m)^2. \quad (1-48)$$

г) **Электродинамическая стойкость аппаратов.** Механическая прочность материала зависит не только от значения силы, но и от ее направления, длительности ее воздействия, от крутизны нарастания. К сожалению, в настоящее время сведения о работе проводников и изоляционных материалов в динамическом режиме крайне ограничены. Поэтому расчет прочности конструкции, как правило, ведется исходя из максимального значения силы, хотя действует эта сила кратковременно.

В однофазных установках расчет э. д. у. ведется по ударному току короткого замыкания.

Если короткое замыкание произошло вблизи генератора, то за расчетную величину берется амплитуда сверхтрехфазного короткого замыкания.

Для трехфазного аппарата за расчетный ток берется

$$i_{\text{уд}} = k_{\text{уд}} I_{m3}, \quad (1-49)$$

где ток I_{m3} — амплитуда периодической составляющей трехфазного короткого замыкания.

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

Для проводниковых материалов рекомендуется не превышать следующих значений механических напряжений: для меди МТ 140 МПа, для алюминия АТ 70 МПа.

Изоляция электрических аппаратов и элементов распределительных устройств может работать как в открытом распределительном устройстве, так и внутри помещения. В первом случае она подвергается воздействию как э. д. у., так и дополнительной нагрузки — действию ветра, гололеда, тяжению подводящих проводников. Во втором — только действию э. д. у. Поэтому в первом случае результирующая нагрузка на изоляторы и изоляционные детали берется в 3 раза меньше разрушающей. Во втором случае коэффициент запаса может быть уменьшен до 1,5—1,7.

д) **Механический резонанс.** При расчете электродинамической стойкости аппарата нельзя упускать из виду возможность появления резонанса между гармонически меняющейся электродинамической силой и собственными механическими колебаниями деталей токоведущей цепи аппарата.

В случае, когда частота переменной составляющей силы близка к собственной частоте механических колебаний, даже при сравнительно небольших силах возможно разрушение аппарата вследствие явлений резонанса. Для шин прямоугольного и круглого сечения эту частоту можно определить приближенно с помощью формулы

$$f = \frac{k}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{\gamma g q}}, \quad (1-50)$$

где γ — плотность материала шины, кг/м³;
 $g = 9,81$ м/с² — ускорение свободного падения;
 l — пролет между изоляторами, м;
 E — модуль упругости материала шин, Па;
 J — момент инерции сечения шины, м⁴;
 q — сечение шины, м²;
 k — коэффициент, зависящий от характера крепления шин ($k = 11,2$ при жестком креплении шин и изоляторов, $k = 7,8$ при свободном креплении на одной опоре и жестком на другой; $k = 4,9$ для шин, свободно лежащих на опорах).

Из формулы (1-50) видно, что для шин заданной формы и сечения собственная частота легко может изменяться за счет изменения пролета. Если не удастся по каким-либо причинам получить собственную частоту ниже основной частоты силы, то выбирают собственную частоту механических колебаний выше двойной частоты силы.

При гибком креплении проводников собственная частота механических колебаний снижается. Благодаря эластичной подвеске энергия электродинамических сил только частично тратится на деформацию токоведущих частей. Другая часть энергии тратится на перемещение проводников и связанных с ними гибких подвесов. При этом механические напряжения в материале шин уменьшаются. Вопрос расчета динамической стойкости с учетом явлений резонанса освещен в [Л. 1-7, 1-8].

1-9. Пример расчета электродинамических сил

Определить силу и вращающий момент, действующие на нож разъединителя, имеющего токоведущую цепь, аналогичную рис. 1-6, а.

Ток короткого замыкания $I_{к.з} = 70$ кА.

Радиус вертикального стержня $r = 1,75 \cdot 10^{-2}$ м.

Расстояние между проводниками $a = 28 \cdot 10^{-2}$ м.

Длина вертикального проводника $l = 50 \cdot 10^{-2}$ м.

Расчетный (ударный) ток

$$i_{уд} = 1,8 \sqrt{2} I_{к.з} = 1,8 \sqrt{2} \cdot 70 \cdot 10^3 = 178,5 \cdot 10^3 \text{ А.}$$

Поскольку длина токоведущих стержней l невелика, то расчет силы ведем по формуле (1-18):

$$F = \frac{1}{2} \mu_0 \frac{i_{уд}^2}{\pi} \left[\ln \frac{2a}{r \left(1 + \sqrt{\frac{a^2}{l^2} + 1} \right)} + 0,25 \right] = 18\,650 \text{ Н.}$$

Расчет по формуле (1-17) дает силу $F = 20\,200$ Н, т. е. завышает результат на 8,6%.

Поскольку разница между результатами невелика, то расчет момента M_{01} (относительно точки вращения ножа) произведем, воспользовавшись более простой формулой (1-14):

$$M_{01} = i^2 \int_r^a \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{x dx}{x} + i \int_r^{a-r} \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{x}{a-x} dx = \frac{\mu_0}{4\pi} i^2 \left(r + a \ln \frac{a-r}{r} \right).$$

С учетом силы, возникающей в месте перехода тока из ножа в проводник, имеем:

$$\begin{aligned} M_{01} &= 10^{-7} i^2 \left[r + a \left(0,25 + \ln \frac{a-r}{r} \right) \right] = \\ &= 10^{-7} \cdot 178^2 \cdot 10^6 \left[0,0175 + 0,28 \left(0,25 + \ln \frac{0,28-0,07}{0,0175} \right) \right] = 2680 \text{ Н} \cdot \text{м.} \end{aligned}$$

Механизм разъединителя должен быть рассчитан, чтобы надежно выдержать этот момент.

НАГРЕВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

2-1. Общие сведения

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

При увеличении температуры происходит ускоренное старение изоляции проводников и уменьшение их механической прочности. Так, например, если при данной допустимой длительной температуре θ_n срок службы изоляции проводников равен t_n , то при возрастании длительной температуры всего лишь на 8°C срок службы сокращается в 2 раза: $t'_n = t_n/2$.

При увеличении температуры меди со 100 до 250°C механическая прочность снижается на 40% . Следует иметь в виду, что при коротком замыкании, когда температура может достигать предельных значений (200 — 300°C), токоведущие части подвержены воздействию больших электродинамических сил.

Работа контактных соединений также сильно зависит от температуры.

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

2-2. Активные потери энергии в аппаратах

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

Энергия, выделяющаяся в проводнике, равна:

$$W = \int_0^t i^2 R dt,$$

где W — энергия, Дж;
 i — ток в цепи, А;
 R — сопротивление, Ом;
 t — длительность протекания тока, с.

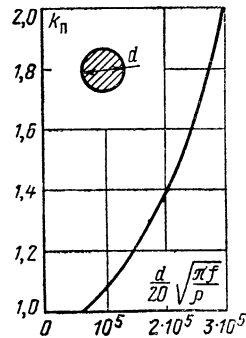


Рис. 2-1. Определение k_n для сплошного круглого проводника.

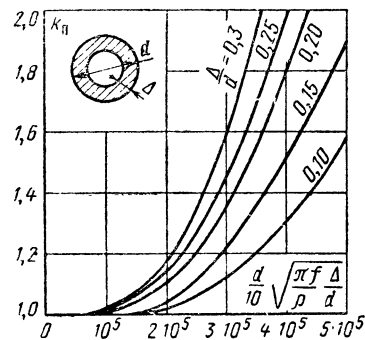


Рис. 2-2. Определение k_n для полого круглого проводника.

Для однородного проводника сопротивление R легко найти, зная свойства материала, длину и сечение проводника.

При переменном токе активное сопротивление проводника отличается от сопротивления при постоянном токе из-за возникновения поверхностного эффекта и эффекта близости [Л. 1-1].

Сопротивление при переменном токе R_{\sim} определяется равенством

$$R_{\sim} = R_{=} k_n, \quad (2-1)$$

где $R_{=}$ — сопротивление при постоянном токе;

k_n — коэффициент добавочных потерь, вызванных поверхностным эффектом и эффектом близости.

Известно, что чем больше частота тока, тем больше поверхностный эффект.

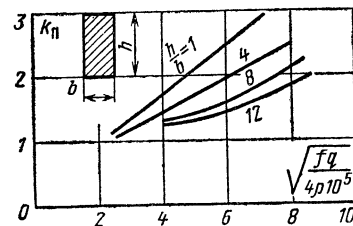


Рис. 2-3. Определение k_n для шины прямоугольного сечения.

В ферромагнитных материалах поверхностный эффект резко возрастает из-за увеличения магнитной проницаемости проводников. Существенную роль играют форма и размеры проводника, чем больше его диаметр, тем больше поверхностный эффект.

При использовании проводников большого сечения из-за поверхностного эффекта внутренняя часть сечения не обтекается током и фактически не используется. В этом случае применяется токоведущая цепь трубчатого или коробчатого сечений. Следует отметить, что коробчатое сечение по сравнению с круглым является более предпочтительным, так как увеличивается поверхность охлаждения при том же сечении, возрастает механическая прочность. Коробчатая шина выполняется в виде двух половин, между которыми вводится зазор, что обеспечивает охлаждение внутренней поверхности шинопровода. Коэффициент k_n для коробчатого сечения приведен в [Л. 2-1].

Расчет коэффициента добавочных потерь от поверхностного эффекта k_n производится по специальным кривым рис. 2-1 — 2-3. При пользовании кривыми рис. 2-1 и 2-2 диаметр d берется в миллиметрах, частота f в герцах и удельное сопротивление ρ в Ом·мм (10^6 Ом·мм²/м) при температуре проводника.

При использовании графика рис. 2-3 сечение q берется в мм², а ρ — в мкОм·м. Отношение активного сопротивления проводника, находящегося в магнитном поле других проводников, к сопротивлению единичного проводника называется коэффициентом эффекта близости:

$$k_b = R_{\sim} / R_{\sim \text{уд.}} \quad (2-2)$$

Аналогично поверхностному эффекту эффект близости растет с частотой тока, проводимостью материала и зависит от формы и взаимного расположения проводников. Чем ближе расположены проводники друг к другу, тем сильнее магнитное поле от соседнего проводника и тем больше эффект близости.

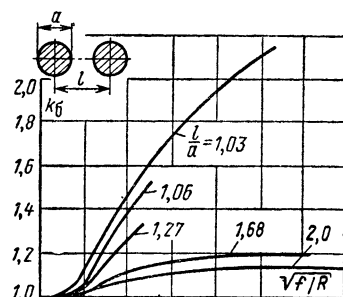


Рис. 2-4. Коэффициент близости k_b для проводников круглого сечения.

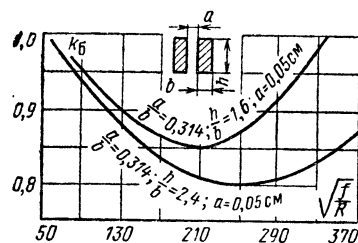


Рис. 2-5. Коэффициент близости для шин прямоугольного сечения.

В отличие от коэффициента поверхностного эффекта k_n коэффициент близости k_b может быть и меньше единицы, так как за счет магнитного поля соседних проводников возможно выравнивание плотности тока по сечению. Коэффициент близости зависит также и от направления тока в соседних проводниках.

Обычно коэффициент близости находят с помощью кривых рис. 2-4 и 2-5*. Для трехфазной системы проводников картина влияния соседних фаз значительно усложняется. Однако можно указать те минимальные расстояния между соседними фазами, при которых эффект близости практически ничтожен. Так, при цилиндрических проводниках $k_6=1$, если расстояние между фазами $l \geq 6d$, где d — диаметр проводника. Для прямоугольных шин в трехфазной системе $k_6=1$, если $l \geq 3a$, где a — наибольший размер поперечного сечения.

Используя (2-1) и (2-2), получаем коэффициент добавочных потерь:

$$k_d = \frac{R_{\sim}}{R_{\equiv}} = \frac{R_{y\epsilon d} k_6}{R_{\equiv}} = k_n k_6. \quad (2-3)$$

Если токоведущая часть выполнена из ферромагнитного материала (стали), то поверхностный эффект резко увеличивается. Дело в том, что магнитная проницаемость стали на много порядков выше, чем у меди или алюминия. Это в свою очередь увеличивает поток, пронизывающий проводник и токи, вызываемые этим потоком.

Коэффициент добавочных потерь k_d для стального провода небольшого диаметра ($d=16$ мм) находится в пределах 4—8 и изменяется от тока примерно так же, как проницаемость μ зависит от напряженности H [Л. 1-9].

Ввиду резкого увеличения k_d у ферромагнитных материалов при больших токах они не применяются для изготовления токоведущих элементов.

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

Рассмотрим прохождение переменного магнитного потока вдоль оси массивного цилиндрического стержня.

Под действием потока в элементарных цилиндрических слоях появляются э. д. с. и вихревые токи таких направлений, при которых создаваемые ими потоки противодействуют изменению основного потока (правило Ленца). Из-за размагничивающего действия этих токов магнитный поток по сечению распределяется неравномерно, причем магнитная индукция имеет наименьшее значение в центре стержня.

Примерное распределение индукции и плотности тока вдоль радиуса представлено на рис. 2-6. Без большой погрешности можно положить, что на глубине a от внешней поверхности индукция остается постоянной. При дальнейшем приближении к центру она резко падает до нуля. Толщина слоя a , на протяжении которого индукция постоянна, называется глубиной проникновения потока. Эффект этот аналогичен поверхностному эффекту у проводников. Расчеты и исследования показывают, что в большинстве практических случаев толщина слоя a составляет несколько миллиметров и значительно меньше, чем радиус стержня.

* На рис. 2-4 и 2-5 даны сопротивления R в омах при длине 100 м, частота f в герцах. Токи в проводниках имеют противоположные направления.

Расчет глубины проникновения и мощности потерь подробно рассмотрен в [Л. 2-1]; здесь приводим окончательное решение:

$$a = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_a}}, \quad (2-4)$$

где a — глубина проникновения, м;
 ρ — удельное сопротивление, Ом·м;
 ω — круговая частота, с;
 μ_a — абсолютная проницаемость материала, Г/м.

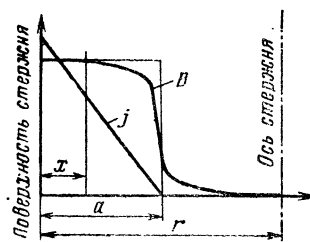


Рис. 2-6. Распределение индукции B и плотности тока j в ферромагнитном цилиндре при прохождении переменного потока вдоль оси.

Чем меньше удельное сопротивление сердечника, чем выше частота потока и магнитная проницаемость, тем сильнее эффект вытеснения потока.

Кроме потерь от вихревых токов, возникают дополнительные потери на перемагничивание за счет гистерезиса.

Для уменьшения потерь в магнитопроводах аппаратов они выполняются шихтованными из листов электротехнической стали толщиной 0,2—0,5 мм, тщательно изолированных друг от друга. Сталь должна иметь малые потери на вихревые токи и гистерезис.

Полные потери в магнитопроводе $P_{ж}$ могут быть найдены с

помощью формулы

$$P_{ж} = (\kappa_r B_m^{1,6} + \kappa_v f B_m^2) f G_T,$$

где B_m — максимальное значение индукции, Т;
 f — частота, Гц;
 κ_r и κ_v — коэффициенты потерь от гистерезиса и вихревых токов;
 G_T — масса магнитопровода, кг.

Для трансформаторных сталей (Э41—Э43) $\kappa_r = 1,9 \div 2,6$, $\kappa_v = 0,4 \div 1,2$.

Подробные данные о свойствах электротехнических сталей приведены в [Л. 2-2, 2-3].

Для уменьшения потерь в массивных деталях применяются следующие методы:

а) введение немагнитных зазоров на пути потока (уменьшается поток за счет роста магнитного сопротивления цепи);

б) на массивный магнитопровод надевается короткозамкнутый виток (ток, возникающий в короткозамкнутом витке, уменьшает поток, что ведет к снижению потерь);

в) при больших номинальных токах (выше 1000 А) конструкционные детали изготавливаются из немагнитных материалов: силумина, дюралюминия, бронзы, немагнитного чугуна и др.

Методика измерения активных потерь в аппаратах рассмотрена в [Л. 2-4].

В аппаратах переменного тока высокого напряжения, помимо потерь в проводниковых и ферромагнитных материалах, необходимо учитывать потери, возникающие в изоляции. Эти потери определяются формулой

$$P = 2\pi fCU^2 \operatorname{tg} \alpha, \quad (2-5)$$

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

Изоляция аппарата нагревается как за счет потерь в токоведущей цепи, так и за счет потерь в диэлектрике.

2-3. Способы передачи тепла внутри нагретых тел и с их поверхности

Различают три вида теплообмена: теплопроводность, конвекцию и тепловое излучение.

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

Математически этот процесс описывается уравнением Фурье

$$d^2Q = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} dS dt. \quad (2-6)$$

В этом уравнении:

d^2Q — количество тепла, передаваемого в направлении x за счет теплопроводности;

λ — удельная теплопроводность материала, через который идет передача тепла;

θ — температура;

dS — поверхность, через которую протекает тепло;

dt — время, в течение которого протекает тепло d^2Q .

Величина $\partial \theta / \partial x$ называется градиентом температуры и характеризует скорость изменения температуры в направлении x , перпендикулярном площадке dS .

Из уравнения (2-6) следует:

$$\lambda = \frac{d^2Q}{-\frac{\partial \theta}{\partial x} dS dt}. \quad (2-7)$$

Таким образом, удельная теплопроводность λ есть количество тепла, проходящее через еди-

ницу поверхности в 1 с при градиенте температуры $1^\circ\text{C}\cdot\text{м}^{-1}$.

Отрицательный знак правой части (2-6) обусловлен тем, что тепловая энергия распространяется от точек с большей температурой к точкам с меньшей температурой, т. е. в направлении, противоположном градиенту температуры.

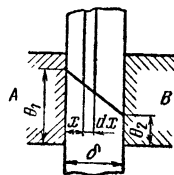


Рис. 2-7. К расчету перепада температуры в плоской стенке.

Температурное поле может быть трехмерным. Поэтому, рассматривая тепло, передаваемое в направлении x , мы берем частную производную от температуры по координате x .

В качестве примера используем (2-6) для отыскания распределения температур в стенке, разделяющей две среды, которые имеют различные температуры θ_1 и θ_2 (рис. 2-7).

Преобразуя (2-6), будем иметь:

$$\frac{d^2Q}{dS dt} = -\lambda \frac{d\theta}{dx} = \Phi_0; \quad (2-8)$$

$\frac{d^2Q}{dS dt} = \Phi_0$ — количество тепла, проходящее через поверхность в 1 м^2 за 1 с, называемое плотностью теплового потока. Для установившегося режима эта величина постоянна:

$$\Phi_0 = -\lambda \frac{d\theta}{dx}. \quad (2-9)$$

Проведя интегрирование (2-9), получим:

$$\int_{\theta_1}^{\theta_2} -d\theta = \theta_1 - \theta_2 = \Delta\theta = \frac{\Phi_0 x}{\lambda} \Big|_0^\delta = \frac{\Phi_0 \delta}{\lambda}. \quad (2-10)$$

Таким образом, падение температуры вдоль координаты x происходит по линейному закону.

Иногда для удобства расчетов вводится понятие теплового сопротивления R_t .

Поток, проходящий в 1 с через всю поверхность, равен:

$$\Phi = \Phi_0 S. \quad (2-11)$$

Воспользовавшись (2-10) и (2-11), получим:

$$\Delta\theta = \frac{\Phi_0\delta}{\lambda} = \frac{\Phi\delta}{\lambda S} = \Phi R_T, \quad (2-12)$$

где R_T — тепловое сопротивление стенки.

Уравнение (2-12) аналогично уравнению (закону) Ома для электрической цепи и называется тепловым законом Ома: падение температурного потенциала равно произведению потока на тепловое сопротивление. Тепловое сопротивление пропорционально длине пути потока δ и обратно пропорционально сечению и удельной теплопроводности. Из (2-12) можно получить:

$$\Phi = \Delta\theta/R_T. \quad (2-13)$$

Количество тепла Φ , отводимое в 1 с от тела за счет теплопроводности, прямо пропорционально перепаду температуры $\Delta\theta$ и обратно пропорционально тепловому сопротивлению R_T того тела, через которое передается тепло.

Если тепловой поток проходит через ряд стенок с толщиной δ_i теплопроводностью λ_i , то тепловое сопротивление равно:

$$R_T = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} = \frac{1}{S} \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n} \right).$$

Данные по удельной теплопроводности материалов приведены в [Л. 2-1].

б) **Конвекция** — это перенос тепла связанный с перемещением микрообъемов нагретого газа или жидкости. При естественной конвекции движение охлаждающего газа или жидкости происходит за счет разницы плотностей нагретых и холодных объемов газа или жидкостей.

При искусственной конвекции движение охлаждающей среды производится с помощью вентиляторов или насосов. Количество тепла, отдаваемое телом за счет конвекции, определяется в простейшем случае из уравнения

$$\Phi_K = \alpha_K (\theta_2 - \theta_1) S, \quad (2-14)$$

где Φ_K — тепло, отводимое в 1 с с поверхности S , Вт;

α_k — коэффициент теплоотдачи при конвекции — тепло, которое снимается за 1 с с поверхности в 1 м² при разности температур поверхности и охлаждающей среды 1°С, Вт/(м²·°С);

θ_2 — температура охлаждаемой поверхности, °С;

θ_1 — температура охлаждающей среды, °С;

S — охлаждаемая поверхность, м².

Коэффициент теплоотдачи α_k является сложной функцией многих факторов, в том числе:

а) температуры, вязкости и плотности охлаждающей среды;

б) вида охлаждаемой поверхности и ее расположения относительно потока охлаждающей среды и поля тяготения;

в) скорости вынужденного движения среды.

В большинстве случаев коэффициент α_k определяется по эмпирическим формулам [Л. 2-5].

Количество тепла, отводимое за счет конвекции, нелинейно зависит от перепада температур, так как коэффициент α_k также представляет собой нелинейную функцию этого перепада.

Для горизонтальных круглых проводников диаметром от 1 до 8 см

$$\alpha_k = 3,5 \left(\frac{1}{d} \right)^{1/4} (\theta_2 - \theta_1)^{1/4}.$$

Для установленных на ребро шин

$$\alpha_k = 1,5 (\theta_2 - \theta_1)^{0,35}.$$

Горизонтальная плоскость, обращенная нагретой поверхностью вверх,

$$\alpha_k = 3,25 (\theta_2 - \theta_1)^{0,25}.$$

Вертикальная поверхность в трансформаторном масле

$$\alpha_k = 43 (\theta_2 - \theta_1)^{1/4}.$$

Горизонтальный цилиндр в трансформаторном масле

$$\alpha_k = 160 (\theta_2 - \theta_1)^{0,3}.$$

Вертикальная шероховатая стенка в потоке воздуха, движущегося со скоростью v , м/с,

$$\alpha_k = 6 + 4,2v.$$

Более точно коэффициент теплоотдачи α_k может быть рассчитан с помощью теории подобия [Л. 1-9, 2-1].

В связи с тенденцией увеличения номинального (длительного) тока аппаратов весьма перспективным является применение искусственной конвекции. Это позволяет снизить размеры аппаратов, облегчить контакты, увеличить быстродействие и уменьшить затраты цветных металлов [Л. 2-6].

в) Лучеиспускание. Часть тепла нагретое тело отдает в окружающее пространство путем излучения электромагнитных колебаний (ультрафиолетовых, световых и инфракрасных лучей). Этот способ теплоотдачи называется лучеиспусканием или радиацией. Тепло, потерянное телом за счет лучеиспускания, может быть определено с помощью уравнения Стефана — Больцмана

$$\Phi_{\text{л}} = c_0 \epsilon \left[\left(\frac{T_2}{1000} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{1000} \right)^4 \right] S, \quad (2-15)$$

где $\Phi_{\text{л}}$ — тепло (Вт), отдаваемое в 1 с с поверхности S (м²) при температуре тела T_2 (К) и окружающей температуре вдали от тела T_1 (К); c_0 — коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела и ϵ — степень черноты излучающего тела.

Значение c_0 принимается равным $5,7 \cdot 10^4$ Вт·м⁻²К⁻⁴, а значения ϵ приведены в [Л. 2-1].

Таким образом, тепло, отдаваемое телом за счет лучеиспускания, зависит от разности значений абсолютных температур нагретой поверхности и окружающих его тел, взятых в четвертой степени.

Из уравнений (2-14) и (2-15) следует, что суммарное количество тепла, отдаваемое телом всеми видами теплоотдачи, нелинейно зависит от температуры, что сильно затрудняет расчет. Поэтому в каждом конкретном случае необходимо произвести оценку всех видов теплоотдачи и расчет вести то тому из них, который имеет основное значение. Так, например, для длинных шин теплопроводностью можно пренебречь и принимать в расчет только лучеиспускание и конвекцию. Если проводники погружены в масло, то основным видом теплоотдачи является конвекция. Для проведения приближенных расчетов пользуются следующей методикой.

Введем понятие превышения температур θ_2 и окружаю-

Таблица 2-1

Коэффициенты теплоотдачи

Поверхность и ее характеристика	$k_T, \text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	
	В воздухе при естественной конвекции	В масле при естественной конвекции
Горизонтальные стержни круглой меди диаметром 1—6 см	13—8,5	—
Плоские шины красной меди, поставленные на ребро	6—9	—
Медные и алюминиевые коробчатые шины, расположенные горизонтально, охлаждающая поверхность которых принята равной их наружной поверхности	9—12,5	—
Чугунная, стальная или железная поверхность, тонко ошпаклеванная и покрытая лаковой краской	10—14	—
Любая поверхность, покрытая лаком	12—16	—
Фарфоровые цилиндры, погруженные в бак с маслом	—	50—150
Обмотка с бумажной изоляцией	10—12,5	25—36
Пакет листовой стали	10—12,5	70—90

щей среды θ_1 . Количество тепла ($\text{Вт}/\text{м}^2$), отдаваемое телом за 1 с с 1 м^2 поверхности при $\tau=1^\circ\text{C}$, равно:

$$\frac{\Phi}{S(\theta_2 - \theta_1)} = \frac{\Phi}{S\tau} = f(\theta_2, \theta_1) = k_T. \quad (2-16)$$

Величина k_T является сложной функцией температуры и других физических параметров. Тепловой расчет значительно упростился бы, если бы k_T была постоянной величиной. В диапазоне рабочих температур длительного режима ($\theta_2=90 \div 120^\circ\text{C}$) коэффициент k_T изменяется с

температурой незначительно, и для приближенных расчетов (с точностью 15—20%) можно считать его постоянной величиной. При этом из (2-16) получаем известную формулу Ньютона

$$\Phi = k_{\tau} S \tau. \quad (2-17)$$

Коэффициент k_{τ} называют удельным обобщенным коэффициентом теплоотдачи или просто удельным коэффициентом теплоотдачи. Физический смысл этого коэффициента—мощность, отдаваемая с единицы поверхности охлаждения при превышении температуры в 1°C ($1 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1} = 10^4 \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$). Значения этого коэффициента для различных элементов аппаратов приведены в [Л. 2-7, 2-8].

В табл. 2-1 даны значения коэффициента k_{τ} для наиболее часто встречающихся случаев.

Уравнение (2-17) дает возможность легко найти τ , если известны размеры тела и тепловой поток, отдаваемый в окружающее пространство. Благодаря своей простоте уравнение нашло широкое применение, особенно при расчете температуры тела в неустановившихся режимах. Однако следует отметить, что более высокую точность и широкие возможности дает отдельный учет отдачи тепла конвекцией и лучеиспусканием [Л. 2-1, 1-9].

2-4. Установившийся процесс нагрева

Процесс нагрева считается установившимся, если с течением времени температура аппарата и его частей не изменяется (разумеется, при соблюдении постоянства условий отдачи тепла в окружающее пространство). В установившемся процессе все выделяющееся тепло отдается в окружающее пространство. В противном случае часть тепла шла бы на нагрев аппарата и его температура изменялась.

а) Расчет сечения проводника по длительному режиму. Для круглого проводника

$$R = \frac{4\rho_0(1 + \alpha\theta_n)l}{\pi d^2}, \quad (2-18)$$

где ρ_0 — удельное сопротивление материала при 0°C ;
 d — диаметр проводника;
 l — его длина;

α — температурный коэффициент сопротивления;
 θ_n — допустимая температура в номинальном режиме, °C.
 Из (2-17) и (2-18) получим:

$$\frac{4I^2 \rho_0 (1 + \alpha \theta_n)}{\pi d^2} = k_T \pi d (\theta_n - \theta_0), \quad (2-19)$$

где θ_0 — температура окружающей среды.
 Решая (2-19) относительно d , получаем:

$$d = \sqrt[3]{\frac{4I^2 \rho_0 (1 + \alpha \theta_n)}{\pi^2 k_T (\theta_n - \theta_0)}}. \quad (2-20)$$

Выбирая диаметр с некоторым запасом, рассчитываем коэффициент добавочных потерь k_d и окончательную проверку проводим по формуле

$$d = \sqrt[3]{\frac{4I^2 \rho_0 (1 + \alpha \theta_n) k_d}{\pi^2 k_T (\theta_n - \theta_0)}}.$$

Для проводников прямоугольного сечения (шин)

$$R = \rho_0 \frac{1 + \alpha \theta_n}{ab} l, \quad (2-21)$$

где a и b — стороны сечения шины.
 Аналогично тому, как это сделано выше, получим:

$$ab(a + b) = \frac{I^2 \rho_0 (1 + \alpha \theta_n)}{2k_T (\theta_n - \theta_0)}. \quad (2-22)$$

Из конструктивных соображений и из условий механической прочности задаются соотношением $m = a/b$ (в пределах 3—10). Тогда из (2-22) следует:

$$b = \sqrt[3]{\frac{I^2 \rho_0 (1 + \alpha \theta_n)}{m(m+1)2k_T (\theta_n - \theta_0)}}. \quad (2-23)$$

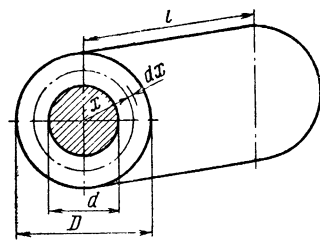


Рис. 2-8. К расчету перепада температуры в цилиндрическом слое изоляции.

Определив затем a , находят коэффициент добавочных потерь k_d и проводят проверку с учетом этого коэффициента.

б) **Нагрев изолированных токоведущих частей.** Рассмотрим нагрев проводника круглого сечения, покрытого равномерным слоем изоляционного материала (рис.

2-8). При расчете принимаем, что тепловой поток вдоль оси проводника отсутствует. Поверхностями равной температуры являются цилиндры. Для установившегося режима вся мощность, выделяемая в проводнике, отдается в окружающее пространство через внешнюю поверхность изоляции. Перепад температуры между этой поверхностью и окружающей средой равен:

$$\tau_{\text{пов}} = \theta_{\text{пов}} - \theta_0.$$

Тепловой поток, проходя из медного проводника к поверхности, создает на толщине изоляции перепад температуры $\Delta\theta$. Тогда температура поверхности проводника будет равна:

$$\theta_{\text{пров}} = \theta_{\text{пов}} + \Delta\theta = \theta_0 + \tau_{\text{пов}} + \Delta\theta.$$

Превышение температуры поверхности может быть легко найдено с помощью уравнения Ньютона (2-17)

$$\tau_{\text{пов}} = \frac{\Phi}{k_{\tau} \pi D l} = \frac{I^2 R k_d}{k_{\tau} \pi D l}.$$

Для определения $\Delta\theta$ воспользуемся уравнением Фурье (2-6), поскольку здесь имеет место случай передачи тепла теплопроводностью. Для слоя с радиусом x можно написать:

$$\Phi = -\lambda \frac{d\theta}{dx} \cdot 2\pi x l, \quad (2-24)$$

где Φ — тепловой поток в единицу времени через боковую поверхность цилиндра $2\pi x l$;

λ — удельная теплопроводность изоляционного материала;

θ — температура цилиндрической поверхности с радиусом x ;

l — длина цилиндра.

Решим (2-24) относительно θ :

$$\int_{\theta_{\text{пров}}}^{\theta_{\text{пов}}} d\theta = \theta_{\text{пов}} - \theta_{\text{пров}} = - \int_{d/2}^{D/2} \frac{\Phi dx}{2\pi l \lambda x} = - \frac{\Phi}{2\pi l \lambda} \ln \frac{D}{d}.$$

Поскольку $\theta_{\text{пров}} > \theta_{\text{пов}}$, то

$$\Delta\theta = \frac{\Phi}{2\pi l \lambda} \ln \frac{D}{d} = \Phi R_{\tau},$$

где R_{τ} — тепловое сопротивление изоляции, равное $\ln \frac{D}{d} / 2\pi l \lambda$.

Температура провода будет равна:

$$\theta_{\text{пров}} = \theta_0 + \frac{\Phi}{k_{\tau} \pi D l} + \frac{\Phi}{2\pi l \lambda} \ln \frac{D}{d}. \quad (2-25)$$

Из уравнения (2-25) следует:

$$\theta_{\text{пров}} - \theta_0 = \Phi \left(\frac{1}{k_{\tau} \pi D l} + \frac{1}{2\pi l \lambda} \ln \frac{D}{d} \right).$$

Результирующее тепловое сопротивление $R_{т.рез}$ равно:

$$R_{т.рез} = \frac{\theta_{пров} - \theta_0}{\Phi} = \frac{1}{2\pi\lambda l} \ln \frac{D}{d} + \frac{1}{k_t \pi D l} = R_t + R_{т0}.$$

Таким образом, результирующее сопротивление равно сумме теплового сопротивления изоляции R_t и теплового сопротивления $R_{т0}$ перехода от наружной стенки к окружающей среде.

Нагрев катушек. Расчет распределения температуры внутри катушки является чрезвычайно трудной задачей. Тело катушки неоднородно. Тепловой поток проходит через воздушные зазоры, межслойную и витковую изоляцию и металл провода.

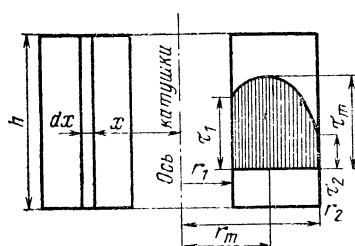


Рис. 2-9. К расчету температуры в катушке.

Для облегчения задачи оперируют с эквивалентной теплопроводностью, при которой усредненное температурное поле в катушке такое же, как и в реальной задаче [Л. 1-3]. Тепло, выделяющееся в катушке (рис. 2-9), в конечном счете отдается через внешнюю цилиндрическую поверхность $2\pi r_2 h$, через внутреннюю цилиндрическую поверхность $2\pi r_1 h$ и через верхний и нижний торцы катушки.

В результате тепловое поле катушки получается очень сложным. Для того чтобы получить хотя бы приближенное решение задачи, делаются следующие упрощающие предположения:

1. Тепловой поток идет только через внутреннюю и внешнюю цилиндрические поверхности, потоки с торцов отсутствуют. Это предположение оправдывается в случае, когда щеки каркаса катушки выполнены из довольно толстых пластин гетинакса или текстолита или при большой длине катушки. При этом допущении изотермические поверхности будут цилиндрами с осью, совпадающей с осью катушки.

2. Потери в катушке равномерно распределены по объему катушки. В действительности наиболее нагретые слои обмотки имеют большее сопротивление, и здесь, следовательно, будет выделяться большая мощность.

3. Тело катушки представляется однородным материалом с эквивалентной теплопроводностью λ_0 .

В установившемся режиме нагрева обмотки в любой точке тела количество тепла, подходящего к данному элементу и выделяющегося в нем, должно быть равно количеству тепла, которое уходит из этого элемента. В случае нарушения этого баланса температура точки должна возрастать или падать.

Если рассмотреть тепловой баланс слоя, находящегося на расстоянии x от оси, и воспользоваться уравнением теплопроводности, то можно получить [Л. 1-3]:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{1}{x} \frac{\partial \theta}{\partial x} + \frac{P_0}{\lambda} = 0, \quad (2-26)$$

где θ — температура слоя с радиусом x ;

P_0 — мощность потерь в единице объема катушки.

Перейдем к новой переменной $\tau = \theta - \theta_0$, где θ_0 — температура окружающей среды; τ — превышение температуры.

После подстановки в (2-26) получим:

$$\frac{\partial^2 \tau}{\partial x^2} + \frac{1}{x} \frac{\partial \tau}{\partial x} + \frac{P_0}{\lambda} = 0. \quad (2-27)$$

Решение этого уравнения имеет вид:

$$\tau = -\frac{P_0 x^2}{4\lambda} + C_1 \ln x + C_2. \quad (2-28)$$

Определим постоянные интегрирования C_1 и C_2 . Поскольку тепловой поток идет и через внутреннюю и через внешнюю поверхности охлаждения, то слой с максимальной температурой находится внутри катушки, следовательно,

$$\frac{\partial \tau}{\partial x} = 0; \quad \tau = \tau_m; \quad x = r_m.$$

Взяв первую производную от τ по x при $x = r_m$ и решив полученное уравнение относительно C_1 , получим:

$$C_1 = \frac{P_0}{2\lambda} r_m^2.$$

Тогда (2-28) будет иметь вид:

$$\tau = -\frac{P_0 x^2}{4\lambda} + \frac{P_0}{2\lambda} r_m^2 \ln x + C_2. \quad (2-29)$$

Подставив в (2-29) сначала $x = r_1$, потом $x = r_2$, произведя вычитание второго уравнения из первого, получим:

$$\tau_1 - \tau_2 = -\frac{P_0}{4\lambda} (r_1^2 - r_2^2) + \frac{P_0}{2\lambda} r_m^2 \ln \frac{r_1}{r_2}. \quad (2-30)$$

В электромагнитах переменного тока сердечник нагревается от потерь в стали, и поэтому количество тепла, отводимое через внутреннюю поверхность, будет очень мало (возможно даже подогревание катушки от сердечника).

Если катушка намотана на монолитный изоляционный каркас, то отдачей тепла через внутреннюю поверхность можно пренебречь. В этих случаях можно положить, что $r_m = r_1$; $\tau_m = \tau_1$, и (2-30) принимает вид:

$$\tau_m = \tau_1 = \tau_2 + \frac{P_0}{2\lambda} r_m^2 \ln \frac{r_1}{r_2} + \frac{P_0}{4\lambda} (r_2^2 - r_1^2). \quad (2-31)$$

Превышение температуры τ_2 определяется по формуле Ньютона:

$$\tau_2 = \frac{P}{k_{\tau_2} \cdot 2\pi r_2 h} = \frac{P_0 \pi (r_2^2 - r_1^2) h}{k_{\tau_2} \cdot 2\pi r_2 h};$$

$$\tau_m = \frac{P_0 \pi (r_2^2 - r_1^2) h}{k_{\tau_2} \cdot 2\pi r_2 h} + \frac{P_0}{2\lambda} r_m^2 \ln \frac{r_1}{r_2} + \frac{P_0}{4\lambda} (r_2^2 - r_1^2).$$

Результирующее тепловое сопротивление для потока $\Phi = P_0 \pi (r_2^2 - r_1^2) h$

$$R_{\text{т.рез}} = \frac{\tau_m}{\Phi} = \frac{1}{2\pi r_2 h k_{\tau_2}} - \frac{r_m^2 \ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi \lambda (r_2^2 - r_1^2) h} + \frac{1}{4\pi \lambda h} \dots \quad (2-31a)$$

Уравнение (2-31) дает возможность подсчитать максимальную температуру провода

$$\theta_m = \tau_m + \theta_0.$$

Расчет нагрева катушки при наличии отдачи тепла через внутреннюю поверхность рассмотрен в § 2.9.

В уравнении (2-31) используется λ — теплопроводность однородного замещающего тела. В [Л. 1-3] приведены формулы, связывающие теплопроводность изоляции провода λ_n с теплопроводностью замещающего тела. Так, для катушки из круглого провода

$$\lambda = 0,6 \lambda_n d / 2\delta,$$

где d — диаметр провода без изоляции;

δ — толщина изоляции.

Для пропитанных катушек из провода ПЭЛ $\lambda_n = 0,13 \div 0,15$ Вт/(м·°С). Для катушек из провода ПЭВ $\lambda_n = 0,15 \div 0,2$ Вт/(м·°С). Подробные исследования по нагреву катушек проведены в [Л. 5-17]. Там же имеются данные по теплопроводности изоляции проводов, прокладок и др.

2-5. Нагрев аппаратов в переходных режимах

а) **Переходный процесс при нагреве и охлаждении.** После включения аппарата температура его элементов не сразу достигает установившихся значений. Если тепло, отдаваемое в окружающее пространство, можно рассчитать по формуле Ньютона, то энергетический баланс при нагреве тела выражается уравнением.

$$P dt = k_{\tau} S \tau dt + C d\theta, \quad (2-32)$$

где P — мощность тепловых потерь в теле;
 C — теплоемкость тела, равная $C = cM$;

c — удельная теплоемкость единицы массы, Вт·с/кг·°С;

M — масса тела, кг.

Первый член правой части (2-32) есть количество тепла, отдаваемое телом в окружающую среду за время dt ; второй — количество тепла, воспринимаемое телом при изменении его температуры на $d\theta$. При постоянстве температуры окружающей среды θ_0 , очевидно, $d\theta = d\tau$, так как $\tau = \theta - \theta_0$.

Решение (2-32) не представляет труда:

$$\tau = \tau_0 e^{-t/T} + \tau_y (1 - e^{-t/T}), \quad (2-33)$$

где τ_0 — превышение температуры в начале процесса ($t=0$);

τ_y — установившееся превышение температуры, равное $\tau_y = P/k_T S$;

T — постоянная времени нагрева, равная $cM/k_T S$, с.

Зависимость $\tau(t)$ изображена на рис. 2-10 (кривая 1).

При $\tau_0 = 0$ кривая $\tau(t)$ имеет вид, представленный на рис. 2-10 (кривая 2). Очевидно, что чем больше T , тем медленнее нагревается тело.

В установившемся режиме все выделяемое тепло отдается в окружающую среду.

Проведем касательную в начале координат к кривой $\tau(t)$

$$\left. \frac{d\tau}{dt} \right|_{t=0} = \frac{\tau_y}{T}, \text{ или } T = \tau_y / \left. \frac{d\tau}{dt} \right|_{t=0}.$$

Касательная к кривой $\tau(t)$ в начале координат отсекает на прямой τ_y отрезок, равный в выбранном масштабе постоянной времени.

Если бы нагрев тела происходил без отдачи тепла в окружающее пространство, то (2-32) надо было записать в виде

$$P dt = C d\tau.$$

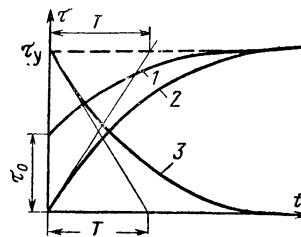


Рис. 2-10. Переходный процесс нагрева и охлаждения однородного тела.

Решая его, получаем:

$$\tau = \frac{P}{C} t.$$

Но так как $P = k_{\tau} S \tau_y$, а $T = C/k_{\tau} S$, то

$$\tau = \frac{\tau_y}{T} t,$$

т. е. подъем температуры тела происходит по касательной к кривой $\tau(t)$ в начале координат. При $t=T$ превышение температуры $\tau = \tau_y$. Таким образом, постоянная времени T есть время, в течение которого тело нагрелось бы до установившейся температуры при условии отсутствия отдачи тепла в окружающее пространство.

Если в (2-33) член $e^{-t/T}$ разложить в ряд, то при $\tau_0=0$ получим:

$$\tau = \tau_y \left[\frac{t}{T} - \frac{1}{2} \left(\frac{t}{T} \right)^2 + \frac{1}{3} \left(\frac{t}{T} \right)^3 - \dots \right].$$

При $t/T < 0,1$ не внося ошибки, большей 5%, можно отбросить все члены, кроме первого. Тогда

$$\tau = \tau_y \frac{t}{T}.$$

Таким образом, если длительность нагрева не превышает одной десятой от постоянной времени, можно пренебречь отдачей тепла в окружающую среду.

После отключения аппарата тепло, накопленное в процессе нагрева, отдается в окружающую среду.

Энергетический баланс при охлаждении тела выражается уравнением

$$C d\tau = k_{\tau} S \tau dt. \quad (2-34)$$

Решение уравнения относительно τ имеет вид:

$$\tau = \tau_y e^{-t/T}. \quad (2-35)$$

Кривая $\tau(t)$ при охлаждении изображена на рис. 2-10 (кривая 3).

б) Нагрев аппаратов при кратковременном режиме работы. Кратковременным режимом работы аппарата называется такой режим, когда при включении температура его не достигает установившейся. После кратко-

временного нагрева аппарат отключается, и его температура падает до тех пор, пока не сравняется с температурой окружающей среды.

Типичные кривые нагрева и охлаждения изображены на рис. 2-11. Обычно длительность $t_{кр}$ прохождения тока $I_{кр}$ выбирается так, чтобы температура токоведущих частей не превышала допустимого значения ($\tau = \tau_{доп}$).

Если $\tau_{кр}$ — установившееся превышение температуры в случае, когда ток $I_{кр}$ проходит бесконечно долго, то из (2-33) можно найти время $t_{кр}$, по истечении которого превышение температуры будет равно допустимому:

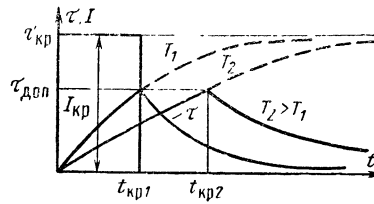


Рис. 2-11. Нагрев при кратковременном режиме работы.

$$t_{кр} = T \ln \frac{1}{1 - \frac{\tau_{доп}}{\tau_{кр}}} . \quad (2-36)$$

Из уравнения (2-36) следует, что чем больше постоянная времени, тем большее время может проходить ток через аппарат. Влияние постоянной времени T на время включения $t_{кр}$ наглядно показывает рис. 2-11.

Найдем связь между допустимым током при длительном включении и допустимым током кратковременного режима $I_{кр}$. Так как

$$\tau_{доп} = \frac{I_{дл}^2 R}{k_T S}, \text{ а } \tau_{кр} = \frac{I_{кр}^2 R}{k_T S},$$

то из (2-33) следует, что

$$I_{дл}^2 = I_{кр}^2 (1 - e^{-t_{кр}/T}); \quad (2-37)$$

$$I_{кр} = I_{дл} \frac{1}{\sqrt{1 - e^{-t_{кр}/T}}} . \quad (2-38)$$

Для характеристики кратковременного режима вводится понятие коэффициента перегрузки $p = I_{кр}/I_{дл}$, который показывает, во сколько раз может возрасти до-

пустимая нагрузка по току при кратковременном режиме по сравнению с длительным режимом:

$$\rho = \frac{1}{\sqrt{1 - e^{-t_{кр}/T}}} \quad (2-39)$$

Анализ (2-38) показывает, что при неизменном значении времени включения аппарата $t_{кр}$ допустимый ток кратковременного режима $I_{кр}$, а следовательно, и коэффициент перегрузки растут с увеличением постоянной времени.

В связи с этим в аппаратах, работающих в кратковременном режиме, рекомендуется увеличивать постоянную времени, что позволяет повысить нагрузку по току.

Постоянная времени аппаратов увеличивается в основном за счет увеличения массы материала, участвующего в процессе нагрева.

Следует отметить, что при $t=4T$ превышение температуры достигает 0,98 τ_y . Поэтому при $t \geq 4T$ режим можно считать режимом длительного включения.

в) **Перебегающий и повторно-кратковременный режимы работы.** Наиболее общим является перемещающийся режим, когда после кратковременного нагрева аппарата величина тока падает и температура аппарата снижается (рис. 2-12).

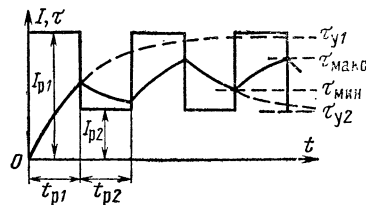


Рис. 2-12. Нагрев при повторно-кратковременном режиме работы.

В течение времени t_{p1} через аппарат проходит неизменный ток I_{p1} . Установившееся превышение температуры для этого тока равно τ_{y1} . В течение времени t_{p2} через аппарат проходит неизменный ток I_{p2} . Установившееся превышение температуры, соответствующее этому току, равно τ_{y2} .

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

По прошествии некоторого времени максимальные превышения температуры $\tau_{макс}$ и минимальные превы-

шения τ_{\min} соседних циклов станут одинаковыми. Наступит так называемый квазистационарный режим. Для этого режима в конце интервала t_{p1} превышение достигает τ_{\max} . Воспользовавшись (2-33), получим:

$$\tau_{\max} = \tau_y (1 - e^{-t_{p1}/T}) + \tau_{\min} e^{-t_{p1}/T}. \quad (2-40)$$

В конце интервала времени t_{p2} аппарат достигает превышения температуры τ_{\min} . Согласно (2-33) можно написать:

$$\tau_{\min} = \tau_{y2} (1 - e^{-t_{p2}/T}) + \tau_{\max} e^{-t_{p2}/T}. \quad (2-41)$$

Подставив τ_{\min} из (2-41) в (2-40) и решив (2-40) относительно τ_{\max} , получим:

$$\tau_{\max} = \frac{\tau_{y1} (1 - e^{-t_{p1}/T}) + \tau_{y2} \left(e^{-t_{p1}/T} - e^{-\frac{t_{p1}+t_{p2}}{T}} \right)}{1 - e^{-\frac{t_{p1}+t_{p2}}{T}}}. \quad (2-42)$$

Обычно τ_{\max} должно быть равно максимальному допустимому превышению температуры $\tau_{\text{доп}}$. Выразим установившиеся превышения температуры через соответствующие токи длительных режимов:

$$\tau_{y1} = \frac{I_{p1}^2 R}{k_T S}; \quad (2-43)$$

$$\tau_{y2} = \frac{I_{p2}^2 R}{k_T S}; \quad (2-44)$$

$$\tau_{\text{доп}} = \frac{I_{\text{дл}}^2 R}{k_T S}, \quad (2-45)$$

где $I_{\text{дл}}$ — допустимый эквивалентный ток длительного режима. Из уравнений (2-42) — (2-45) следует:

$$I_{\text{дл}} = \sqrt{\frac{I_{p1}^2 (1 - e^{-t_{p1}/T}) + I_{p2}^2 \left(e^{-t_{p1}/T} - e^{-\frac{t_{p1}+t_{p2}}{T}} \right)}{1 - e^{-\frac{t_{p1}+t_{p2}}{T}}}}. \quad (2-46)$$

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

Соответственно время t_{p2} называется временем паузы $t_{п}$. Поскольку $I_{p2}=0$, то $\tau_{y2}=0$. Тогда, если обозначить $I_{p1}=I_p$, (2-46) примет вид:

$$I_{дл} = I_p \sqrt{\frac{1 - e^{-t_p/T}}{1 - e^{-\frac{t_p+t_{п}}{T}}}}. \quad (2-47)$$

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

$$ПВ\% = \frac{t_p}{t_p + t_{п}} \cdot 100\% = \frac{t_p}{t_{ц}} \cdot 100\%. \quad (2-48)$$

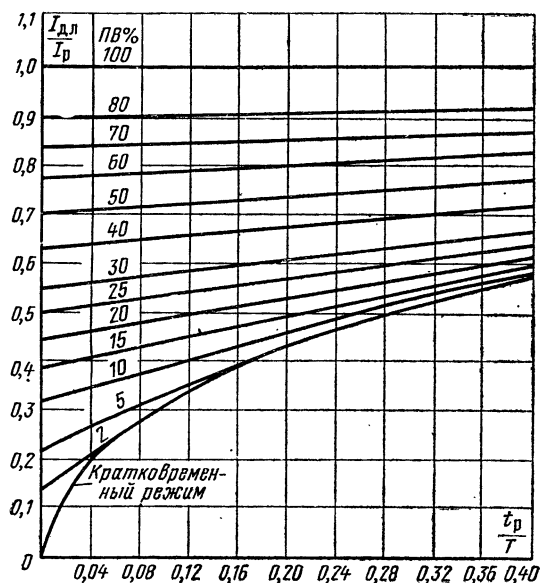


Рис. 2-13. Зависимость отношения $I_{дл}/I_p$ от ПВ% и t_p/T .

Сумма $t_p + t_n$ — время цикла $t_{\text{ц}}$. С учетом (2-48) коэффициент перегрузки по току найдем из (2-47):

$$p = \frac{I_p}{I_{\text{дл}}} = \sqrt{\frac{1 - e^{-\frac{t_p}{T} \frac{100\%}{\text{ПВ}\%}}}{1 - e^{-t_p/T}}}. \quad (2-49)$$

При неизменном значении ПВ% эквивалентный ток зависит от отношения t_p/T . Эта зависимость наглядно показана кривыми рис. 2-13. Возьмем для примера ПВ% = 10%. При $t_p/T = 0,04$ отношение $I_{\text{дл}}/I_p = 0,34$, а коэффициент перегрузки 2,94. Если $t_p/T = 0,4$, то $I_{\text{дл}}/I_p$ возрастает до 0,57, а коэффициент p падает до 1,75. Таким образом, при возрастании отношения t_p/T тепловая нагрузка аппарата увеличивается, коэффициент допустимой перегрузки по току уменьшается.

2-6. Нагрев аппарата при коротком замыкании

В реальных установках токи короткого замыкания в 10—20 раз могут превышать токи длительного режима. Для уменьшения температуры проводников при коротком замыкании, облегчения токоведущих частей длительность прохождения токов ограничивается защитными средствами до 4—5 с. С учетом малой длительности коротких замыканий допустимая температура при коротких замыканиях значительно выше, чем в длительном режиме. Так, для медных проводников с изоляцией класса А эта допустимая температура равна 250° С.

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

$$I^2 R dt = cM d\theta. \quad (2-50)$$

Ввиду того, что температура может достигать больших значений (300° С), необходимо учитывать изменение как сопротивления R , так и удельной теплоемкости c от температуры. С достаточной степенью точности можно считать, что изменение сопротивления проводни-

ка от температуры описывается следующим линейным уравнением:

$$R = k_d \rho_0 \frac{l}{q} (1 + \alpha \theta), \quad (2-51)$$

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

Зависимость удельной теплоемкости от температуры может быть выражена уравнением

$$c = c_0 (1 + \beta \theta), \quad (2-52)$$

где c_0 — удельная теплоемкость при 0°C ;
 β — температурный коэффициент теплоемкости.

Выразим массу M через плотность γ , сечение q и длину проводника l :

$$M = \gamma l q.$$

После подстановки (2-51) и (2-52) в (2-50) и упрощения получим:

$$\frac{I^2}{q^2} dt = \frac{c_0 \gamma (1 + \beta \theta)}{k_d \rho_0 (1 + \alpha \theta)} d\theta. \quad (2-53)$$

Произведем интегрирование правой и левой частей уравнения (2-53):

$$\int_0^{t_{к.з}} \frac{I^2}{q^2} dt = \int_{\theta_n}^{\theta_{к.з}} \frac{c_0 \gamma (1 + \beta \theta)}{k_d \rho_0 (1 + \alpha \theta)} d\theta, \quad (2-54)$$

где $t_{к.з}$ — длительность короткого замыкания;
 θ_n — температура проводника до начала короткого замыкания (обычно при протекании длительного номинального тока);
 $\theta_{к.з}$ — температура проводника при коротком замыкании к моменту времени $t_{к.з}$.

Примем, что ток I не изменяется по своему действующему значению. В дальнейшем будет показано, что полученные формулы могут быть использованы и в случае, когда действующее значение I изменяется.

В результате интегрирования получим:

$$\frac{I^2}{q^2} t_{к.з} = \delta^2 t_{к.з} = A_{\theta_{к.з}} - A_{\theta_H}, \quad (2-55)$$

где δ — плотность тока;
 $A_{\theta_{к.з}}$ и A_{θ_H} — значения интеграла правой части (2-54) при верхнем ($\theta_{к.з}$) и нижнем (θ_H) пределах интегрирования.

С целью упрощения расчетов построены кривые $\theta = f(A_\theta)$ для различных материалов (рис. 2-14). С помощью этих кривых легко произвести расчет на термическую стойкость аппарата.

В соответствии со свойствами проводника и изоляции выбирается допустимая температура при коротком замыкании $\theta_{к.з}$ и при номинальном токе θ_H . С помощью кривых рис. 2-14 находим $A_{\theta_{к.з}}$ и A_{θ_H} , соответствующие температурам $\theta_{к.з}$ и θ_H . Зная $\delta^2 t$, с помощью (2-55) можно при данных t и I определить сечение проводника q либо при известных t и q найти допустимый ток короткого замыкания. Если известен допустимый ток I_1 при времени $t_{к.з1}$, то допустимый ток при времени $t_{к.з2}$ равен:

$$I_2 = I_1 \sqrt{\frac{t_{к.з1}}{t_{к.з2}}}. \quad (2-56)$$

Уравнение (2-56) не учитывает теплоотдачу в окружающую среду, поэтому им можно пользоваться при времени не более 10 с.

Если используется материал, для которого нет кривых, аналогичных рис. 2-14, то при $\beta \ll \alpha$ расчет термической устойчивости производят с помощью уравнения

$$\delta^2 t = \frac{c_0 \gamma}{\alpha \rho_0} \ln \frac{1 + \alpha \theta_{к.з}}{1 + \alpha \theta_H}. \quad (2-57)$$

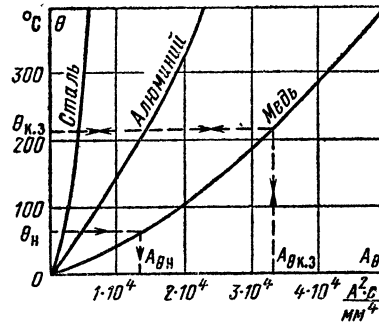


Рис. 2-14. Кривые для определения температуры проводников при прохождении тока короткого замыкания.

Физические постоянные проводниковых материалов, широко применяемых в аппаратах, приведены в [Л.2-9].

При коротком замыкании вблизи генератора из-за переходных процессов величина переменной составляющей тока, протекающей через аппарат, меняется. В этом

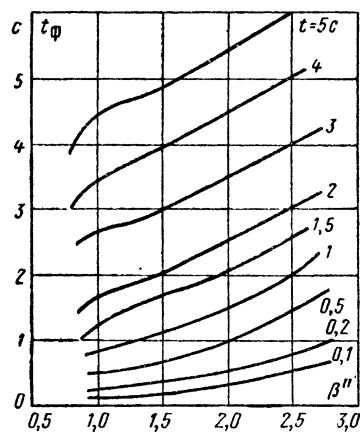


Рис. 2-15. К расчету фиктивного времени $t_{\phi} = f(\beta'', t)$.

случае расчет термической стойкости ведется по установившемуся току короткого замыкания I_{∞} .

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

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

Фиктивное время для периодической составля-

ющей тока короткого замыкания $t_{\phi, \text{пер}}$ находится с помощью кривых рис. 2-15. Для данного генератора определяют $\beta'' = \frac{I''}{I_{\infty}}$ (I'' — действующее значение сверхпереходного тока) и, зная действительное время прохождения тока $t_{к.з} = t$ и β'' , находят $t_{\phi, \text{пер}}$.

Фиктивное время для апериодической составляющей тока может быть найдено по упрощенной формуле из [Л. 1-8]:

$$t_{\phi, \text{апер}} = 0,005 (\beta'')^2. \quad (2-58)$$

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

2-7. Допустимые температуры для различных частей аппаратов при длительной работе и при коротком замыкании. Термическая стойкость аппаратов

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

В приложении I приведена нагревостойкость изоляционных материалов по ГОСТ 8865-70.

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

$$\theta = \theta_0 + \tau.$$

Согласно ГОСТ 403-73 и 8024-69 наибольшая температура окружающей среды принята $+40^\circ\text{C}$.

Обычно аппараты рассчитываются для работы на высоте не более 1000 м над уровнем моря. При большей высоте падает плотность воздуха и ухудшаются условия охлаждения. На высоте 3000 м токовая нагрузка снижается на 4%, а при высоте 6000 м — на 10%.

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

$$I_{\text{доп}} = I_n \sqrt{\frac{\theta_{\text{доп}} - \theta_0}{\theta_{\text{доп}} - 40^\circ\text{C}}}. \quad (2-59)$$

Если $\theta_0 < 40^\circ\text{C}$, то токовая нагрузка аппарата может быть увеличена в соответствии с (2-59), но не более чем на 20% с таким расчетом, чтобы предельные температуры были в соответствии с ГОСТ.

Допустимые значения температуры нагрева для различных элементов аппаратов приведены в приложении II.

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

Так как длительность короткого замыкания мала (не более 5 с) и сами замыкания относительно редки, допустимые температуры при коротком замыкании в 2—4 раза выше, чем при длительном режиме. Согласно ГОСТ 687-70 предельные значения температуры при коротком замыкании не должны превышать 200°C для алюминиевых проводников. Для проводников из меди и ее сплавов, соприкасающихся с органической изоляцией или с маслом, 250°C . Для проводников из меди и ее сплавов, не соприкасающихся с органической изоляцией или с маслом, 300°C .

Токоведущие части, рассчитанные и выбранные по длительному режиму, должны быть проверены на термическую стойкость при коротком замыкании с помощью (2-55) и кривых на рис. 2-14. При расчете берется наиболее тяжелый случай — к моменту начала короткого замыкания элемент аппарата нагрет длительным током до предельно допустимой температуры этого режима.

Поскольку ток термической стойкости зависит от длительности его прохождения, то термическая стойкость относится к определенному времени. В СССР ток термической стойкости обычно относят ко времени 1; 3; 5 и 10 с в зависимости от параметров аппарата (ГОСТ 687-70). Связь между токами термической стойкости для различных времен согласно (2-56) выражается равенством

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

2-8. Некоторые сведения об опытном определении температуры в электрических аппаратах

При тепловых испытаниях аппаратов наибольшее распространение получили три метода: 1) метод термометра; 2) метод термопары; 3) метод сопротивления.

Метод термометра применяется только для измерения температуры крупных деталей аппаратов, так как при использовании термометра трудно обеспечить его надежный тепловой контакт с деталью, а если этот контакт и обеспечивается, то при этом сам термометр за счет своей массы может изменить тепловой режим. Поэтому поверхность охлаждения детали и ее масса должны быть достаточно большими.

Для уменьшения погрешности при измерении рекомендуются следующие меры:

а) шарик термометра должен быть обернут фольгой и надежно прижат к поверхности, температура которой измеряется;

б) ртутный термометр нельзя применять при наличии переменного магнитного поля в точке измерения (ртуть дополнительно нагревается из-за вихревых токов).

Вследствие большой постоянной времени процесс нагрева до установившейся температуры длится довольно долго ($t \geq 4T$). Приближенно можно считать, что тело достигло установившейся температуры, если скорость нарастания температуры равна или менее $1^\circ\text{C}/\text{ч}$.

Метод термопар. Малые габариты термопар, возможность дистанционного измерения и записи температуры на осциллографах обеспечили этому методу широкое применение. Постоянные термопар из различных материалов приведены в [Л. 14-2]. Для широко применяемой пары медь — константан эта постоянная равна $41 \text{ мкВ}/^\circ\text{C}$. При небольших температурах (до $100\text{--}120^\circ\text{C}$) можно считать, что термо-э. д. с. пропорциональна τ :

$$e_\tau = \alpha \tau,$$

где e_τ — термо-э. д. с., В;

α — постоянная термопары, В/ $^\circ\text{C}$;

τ — разность температур нагретых и холодных концов термопары, $^\circ\text{C}$.

Ввиду того, что сопротивления милливольтметра и термопары соизмеримы, показания прибора будут меньше e_τ :

$$e_{\text{приб}} = e_\tau \frac{r_\pi}{r_\tau + r_\pi} = \frac{\alpha r_\pi}{r_\tau + r_\pi} \tau,$$

где r_τ — сопротивление термопары;

r_π — сопротивление прибора.

При измерении небольших температур можно несколько термопар соединять последовательно.

Для получения минимума погрешности необходимо выполнять следующие условия:

а) термопара должна быть надежно прижата к испытуемой детали. Если имеется возможность, то лучше ее припаять, приварить или вчеканить в поверхность.

В некоторых случаях термопара припаивается к медной пластинке, которая прижимается к исследуемой поверхности. Для уменьшения отбора тепла термопарой желательно, чтобы на протяжении 40—50 мм проводники термопары соприкасались с поверхностью, температура которой измеряется.

б) Во избежание появления «наводки» проводники от термопары должны быть свиты и максимально удалены от сферы действия магнитных полей.

в) Для получения надежных результатов термопары и измерительный прибор должны быть предварительно отградуированы при таких же условиях, как и в опытах.

Для точных измерений желательно применение компенсационных методов измерения.

Метод сопротивления. Этот метод нашел применение при испытании катушек и для измерения в мостовых схемах. Сопротивление линейно растет с температурой. Поэтому

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_0(1 + \alpha\theta_1)}{R_0(1 + \alpha\theta_2)} = \frac{1 + \alpha\theta_1}{1 + \alpha\theta_2},$$

где R_0 — сопротивление при 0°C .

Вначале измеряется R_1 при отсутствии тока. Температура элемента аппарата должна равняться температуре окружающей среды θ_1 . Затем определяется R_2 после достижения температурой установившегося значения. Решив уравнение относительно θ_2 , получим:

$$\theta_2 = \frac{1}{\alpha} \left[\frac{R_2}{R_1} (1 + \alpha\theta_1) - 1 \right],$$

но для проводников из меди $1/\alpha = 234,5$. Тогда

$$\theta_2 = \frac{R_2}{R_1} (\theta_1 + 234,5) - 234,5. \quad (2-60)$$

Найденная температура θ_2 для обмоток представляет собой среднюю температуру. Максимальная температура может быть найдена по формуле Видмара [Л. 1-3]:

$$\theta_{\text{макс}} = 2\theta_2 - \theta_1 - \tau_{\text{пов}}.$$

Превышение температуры поверхности $\tau_{\text{пов}}$ можно определить с помощью одного из методов, описанных ранее, или приближенно с помощью формулы Ньютона, приняв, что вся мощность катушки отдается через внешнюю поверхность.

В эксплуатации приближенно температуру можно определять с помощью специальных пленок. При достижении определенной температуры цвет пленки резко меняется, что дает возможность судить о нагреве элемента. Данные таких пленок приведены в [Л. 2-10]. Этот метод удобен для контроля температуры внешних контактов аппаратов с напряжением до 20—35 кВ, находящихся в эксплуатации, так как позволяет вести визуальное наблюдение за контактами.

Постоянные времени нагрева большинства аппаратов относительно велики — от нескольких десятков минут до нескольких часов. Следовательно, установившаяся температура может быть достигнута через несколько часов после включения. С целью сокращения време-

ни опыта установившуюся температуру можно найти по начальной части кривой нагрева, требующей для снятия небольшого времени. Для этого по данным опыта строим кривую $\tau = f(t)$ и, задавшись равными интервалами времени Δt , находим соответствующие приращения превышения температуры $\Delta\tau_1, \Delta\tau_2$ и т. д. (рис. 2-16). Для каждой точки находим отношение $\Delta\tau_1/\Delta t, \Delta\tau_2/\Delta t$, в соответствующем масштабе откладываем в системе координат τ и $\Delta\tau/\Delta t$. Полученные точки соединяем. Точки лежат на прямой, которая отсекает на вертикальной оси τ_y , а на горизонтальной τ_y/T .

Действительно, проведя дифференцирование (2-33), получим:

$$\frac{d\tau}{dt} = \frac{\tau_y}{T} e^{-t/T}, \quad (2-61)$$

но согласно (2-33)

$$\tau_y e^{-t/T} = \tau_y - \tau. \quad (2-62)$$

Подставив (2-62) в (2-61), получим:

$$T \frac{d\tau}{dt} = \tau_y - \tau,$$

или

$$\tau = \tau_y - T \frac{d\tau}{dt}. \quad (2-63)$$

Уравнение (2-63) показывает что τ линейно зависит от $d\tau/dt$. Поэтому все точки построения лежат на одной прямой.

$$\text{При } \frac{d\tau}{dt} = 0 \quad \tau = \tau_y.$$

$$\text{При } \tau = 0 \quad \frac{d\tau}{dt} = \frac{\tau_y}{T}.$$

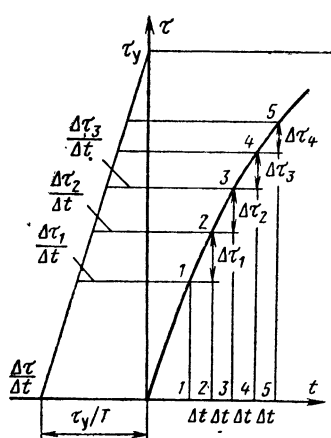


Рис. 2-16. Определение установившегося превышения температуры τ_y по части кривой нагрева $\tau(t)$.

2-9. Примеры теплового расчета элементов аппаратов

Пример 1. Определить, какой длительный ток можно пропустить через токоведущую цепь аппарата, выполненную в виде медного стержня $d=0,035$ м. Сверху проводник покрыт многими слоями тонкой хлопчатобумажной ленты, пропитанной глифталевым лаком. Толщина покрытия 10^{-3} м. Найти также допустимый ток короткого замыкания. Длительность протекания тока 5 с. Частота тока 50 Гц. Температура на поверхности проводника согласно (2-25)

$$\theta_{\text{пров}} = \theta_0 + \frac{\Phi}{k_{\text{г}} \pi D l} + \frac{\Phi}{2\pi l \lambda} \ln \frac{D}{d};$$

$$\Phi = I^2 R k_{\text{п}} = (\theta_{\text{пров}} - \theta_0) \times$$

$$\times \frac{2\pi k_T D l \lambda}{2\lambda + k_T D \ln \frac{D}{d}} = (\theta_{\text{пров}} - \theta_0) \frac{1}{R_{\text{т.рез}}}.$$

Расчет проведем для единицы длины:

$$I = \sqrt{\frac{(\theta_{\text{пров}} - \theta_0) \cdot 2\pi k_T D \lambda}{k_{\text{п}} R \left(2\lambda + k_T D \ln \frac{D}{d} \right)}}.$$

Поскольку изоляция относится к классу А, то температура провода на поверхности $\theta_{\text{пров}} = 105^\circ \text{C}$. Наибольшее значение $\theta_0 = 40^\circ \text{C}$. Коэффициент теплоотдачи $k_T = 11 \div 13 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ \text{C})$. Удельная теплопроводность пропитанной хлопчатобумажной изоляции [Л. 1-3] $0,114 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ \text{C})$.

Коэффициент добавочных потерь $k_{\text{п}}$ определим с помощью рис. 2-1.

Удельное сопротивление ρ при температуре 105°C :

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha \theta) = 1,55 \cdot 10^{-8} (1 + 0,004 \cdot 105) = 2,2 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

$$\text{Аргумент } \frac{d}{20} \sqrt{\frac{\pi f}{\rho}} = \frac{35}{20} \sqrt{\frac{\pi \cdot 50}{2,2 \cdot 10^{-8}}} = 1,45 \cdot 10^5.$$

Тогда $k_{\text{п}} = 1,2$.

Сопротивление единицы длины на постоянном токе

$$R = \frac{\rho}{q} = \frac{2,2 \cdot 10^{-8} \cdot 4}{\pi (3,5)^2 \cdot 10^{-4}} = 0,23 \cdot 10^{-4} \text{ Ом};$$

$$I = \sqrt{\frac{(105 - 40) \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 12 \cdot 0,037 \cdot 0,114}{1,2 \cdot 0,23 \cdot 10^{-4} \left(0,114 \cdot 2 + 12 \cdot 0,037 \ln \frac{0,037}{0,035} \right)}} = 1690 \text{ А}.$$

Если изоляция отсутствует ($D=d$), то допустимый ток равен 1760 А.

В данном случае отдача тепла с наружной поверхности происходит в основном за счет лучеиспускания и конвекции.

Проведем более точный расчет допустимого тока для голого провода, учитывая отдельно эти виды теплоотдачи.

Тепло, отдаваемое лучеиспусканием на длине 1 м,

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

$$T_2 = 105 + 273 = 378 \text{ К}; T_1 = 40 + 273 = 317 \text{ К}; c_0 = 5,7 \cdot 10^4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К});$$

$$\varepsilon = 0,78 \text{ (для окисленной меди [Л.2-1])};$$

$$S = \pi d l = \pi \cdot 0,035 \cdot 1 = 0,11 \text{ м}^2 = 1100 \text{ см}^2;$$

$$\Phi_n = 5,7 \cdot 0,78 \left[\left(\frac{378}{1000} \right)^4 - \left(\frac{317}{1000} \right)^4 \right] \cdot 0,11 \cdot 10^4 = 49 \frac{\text{Вт}}{\text{м}};$$

$$\begin{aligned} \Phi_k &= 3,5 \cdot 10^{-4} \left(\frac{1}{d} \right)^{\frac{1}{4}} (\theta_{\text{пров}} - \theta_0)^{1,25} S = \\ &= 3,5 \cdot 10^{-4} \left(\frac{1}{3,5} \right)^{\frac{1}{4}} (105 - 40)^{1,25} \cdot 1100 = 46,3 \text{ Вт/м}. \end{aligned}$$

Полная мощность, отдаваемая с единицы длины,

$$\Phi_n + \Phi_k = I^2 k_n R = 49 + 46,3 = 95,3 \text{ Вт/м};$$

$$I = \sqrt{\frac{\Phi_n + \Phi_k}{k_n R}} = \sqrt{\frac{95,3}{1,2 \cdot 0,23 \cdot 10^{-4}}} = 1860 \text{ А}.$$

Таким образом, расчет по формуле Ньютона дает результат (1690 А), который на 5,4% ниже результата по более точным формулам (1860 А).

Определение допустимого тока короткого замыкания:

$$k_n \frac{I^2}{q^2} t = A_{\theta_{\text{к.з}}} - A_{\theta_n}; \quad \theta_{\text{к.з}} = 250^\circ \text{С}; \quad \theta_n = 105^\circ \text{С}.$$

Используя рис. 2-15, получаем:

$$A_{\theta_{\text{к.з}}} = 3,65 \cdot 10^{-4}; \quad A_{\theta_n} = 2 \cdot 10^{-4};$$

$$I = \sqrt{\frac{(A_{\theta_{\text{к.з}}} - A_{\theta_n}) q^2}{k_n t}} = \sqrt{\frac{(3,65 - 2) \cdot 10^{-4} \cdot 960^2}{1,15 \cdot 5}} = 51500 \text{ А};$$

Для $\theta_{\text{к.з}} = 250^\circ \text{С}$; $k_n = 1,15$.

Пример 2. Найти наибольшее превышение температуры τ_m в обмотке электромагнита постоянного тока, имеющей следующие параметры: $U = 110 \text{ В}$, провод ПЭЛ 0,29 мм, $w = 16800$, высота обмотки $h = 86 \text{ мм}$, внутренний радиус $r_1 = 18 \text{ мм}$, внешний радиус $r_2 = 31 \text{ мм}$.

Обмотка намотана на металлической гильзе и имеет хороший тепловой контакт с сердечником. Отдачей тепла с торцов обмотки можно пренебречь. Цилиндрическая поверхность с радиусом r_m является поверхностью раздела тепловых потоков (рис. 2-9). Тепло Φ_2 , выделяющееся в объеме $\pi(r_2^2 - r_m^2)h$, отдается через внешнюю поверхность охлаждения $2\pi r_2 h$, тепло Φ_1 , выделяющееся в объеме $\pi(r_m^2 - r_1^2)h$, отдается через внутреннюю поверхность $2\pi r_1 h$. Обозначим через $R_{\tau 2}$ результирующее тепловое сопротивление для потока Φ_2 , через $R_{\tau 1}$ — результирующее сопротивление для потока Φ_1 . Поскольку и для потока Φ_1 и для потока Φ_2 полный перепад температуры один и тот же, то

$$\theta_m - \theta_0 = \tau_m = \Phi_2 R_{\tau 2} = \Phi_1 R_{\tau 1}.$$

В соответствии с (2-31а) имеем:

$$R_{\tau 2} = \frac{1}{2\pi r_2 h k_{\tau 2}} - \frac{r_m^2 \ln \frac{r_2}{r_m}}{2\pi \lambda (r_2^2 - r_m^2) h} + \frac{1}{4\pi \lambda h};$$

$$R_{\tau 1} = \frac{1}{2\pi r_1 h k_{\tau 1}} + \frac{r_m^2 \ln \frac{r_m}{r_1}}{2\pi \lambda (r_m^2 - r_1^2) h} - \frac{1}{4\pi \lambda h}.$$

Поскольку $\Phi_2 R_{\tau 2} = \Phi_1 R_{\tau 1}$, то

$$(r_2^2 - r_m^2) \left(\frac{1}{2\pi r_2 k_{\tau 2}} - \frac{r_m^2 \ln \frac{r_2}{r_m}}{2\pi \lambda (r_2^2 - r_m^2)} + \frac{1}{4\pi \lambda} \right) =$$

$$= (r_m^2 - r_1^2) \left(\frac{1}{2\pi r_1 k_{\tau 1}} + \frac{r_m^2 \ln \frac{r_m}{r_1}}{2\pi \lambda (r_m^2 - r_1^2)} - \frac{1}{4\pi \lambda} \right).$$

С помощью полученного уравнения находим r_m :

$$r_m = \sqrt{\frac{\frac{1}{2} (r_2^2 - r_1^2) + \frac{\lambda r_2}{k_{\tau 2}} + \frac{\lambda r_1}{k_{\tau 1}}}{\ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{\lambda}{k_{\tau 2} r_2} + \frac{\lambda}{k_{\tau 1} r_1}}}.$$

При расчете необходимо использовать эквивалентную теплопроводность $\lambda_0 = \lambda$.

Согласно § 2-4 имеем:

$$\lambda_0 = \lambda = 0,6 \lambda_{\text{нз}} \frac{d}{2\delta} = 0,6 \cdot 0,15 \frac{0,29}{0,026} = 1,12 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}.$$

Коэффициент теплоотдачи $k_{\tau 2} = 12 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}$ (табл. 2-1).

Для катушек с хорошей отдачей тепла сердечнику коэффициент теплоотдачи $k_{\tau 1}$ можно взять равным $1,7 k_{\tau 2}$ [Л. 3-4]; $k_{\tau 1} = 20,4 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}$.

$$r_m = \sqrt{\frac{\frac{1}{2} (3,1^2 - 1,8^2) \cdot 10^{-4} + \frac{1,12 \cdot 3,1 \cdot 10^{-2}}{12} + \frac{1,12 \cdot 1,8 \cdot 10^{-2}}{20,4}}{\ln \frac{3,1}{1,8} + \frac{1,12}{12 \cdot 3,1 \cdot 10^{-2}} + \frac{1,12}{20,4 \cdot 1,8 \cdot 10^{-2}}}} =$$

$$= 2,46 \cdot 10^{-2} \text{ м}.$$

$$\begin{aligned}
\text{Мощность обмотки } P &= \frac{U^2 q}{\rho_{\text{гор}} \cdot 2\pi (r_1 + r_2) \omega / 2} = \\
&= \frac{110^2 \cdot 6,6 \cdot 10^{-8}}{2,2 \cdot 10^{-8} \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 49 \cdot 10^{-2} \cdot 16800/2} = 14 \text{ Вт.} \\
\Phi_2 &= P \frac{\pi (r_2^2 - r_m^2) h}{\pi (r_2^2 - r_1^2) h} = 14 \frac{(3,1^2 - 2,46^2)}{(3,1^2 - 1,8^2)} = 7,56 \text{ Вт;} \\
R_{\tau 2} &= \frac{1}{2\pi \cdot 3,1 \cdot 10^{-2} \cdot 8,6 \cdot 12} - \\
&\quad - \frac{(2,46 \cdot 10^{-2})^2 \ln \frac{3,1}{2,46}}{2\pi \cdot 1,12 \cdot (3,1^2 - 2,46^2) \cdot 8,6 \cdot 10^{-2}} + \\
&\quad + \frac{1}{4\pi \cdot 1,12 \cdot 8,6 \cdot 10^{-2}} = 6,35 \frac{^\circ\text{C}}{\text{Вт}}; \\
\tau_m &= \Phi_2 R_{\tau 2} = 7,56 \cdot 6,35 = 48,2^\circ \text{C.}
\end{aligned}$$

Максимальное превышение температуры τ_m менее допустимого значения 65°C для провода марки ПЭЛ.

Превышение температуры внешней поверхности

$$\tau_2 = \Phi_2 R_{\tau 02} = \frac{\Phi_2}{2\pi r_2 h k_{\tau 2}} = \frac{7,56}{2 \cdot 3,14 \cdot 3,1 \cdot 10^{-2} \cdot 8,6 \cdot 10^{-2} \cdot 12} = 38^\circ \text{C.}$$

Превышение температуры внутренней поверхности

$$\Phi_1 = P - \Phi_2 = 14 - 7,56 = 6,44 \text{ Вт;}$$

$$\tau_1 = \Phi_1 R_{\tau 01} = \frac{\Phi_1}{2\pi r_1 h k_{\tau 1}} = \frac{6,44}{2 \cdot 3,14 \cdot 1,8 \cdot 8,6 \cdot 10^{-3} \cdot 12 \cdot 1,7} = 33^\circ \text{C.}$$

Глава третья

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОНТАКТЫ

3-1. Общие сведения

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

Как бы ни была тщательно обработана поверхность соприкосновения контактов, электрический ток проходит из одного контакта в другой только в отдельных точках,

в которых эти поверхности касаются, так как абсолютно гладкой поверхности нельзя получить ни при каком методе ее обработки.

Примерная картина этого явления представлена на рис. 3-1. Благодаря нажатию одного контакта на другой вершины выступов деформируются и образуются площадки действительного касания контактов.

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

Положим, что контакты имеют только одну площадку касания и что эта площадка имеет форму круга радиуса a (рис. 3-2, а). Величину радиуса a при пластической деформации можно найти с помощью формулы

$$\pi a^2 = F/\sigma, \quad (3-1)$$

где F — сила нажатия контактов;
 σ — временное сопротивление смятия материала контактов.

В результате стягивания линий тока к площадке касания путь тока меняется. Сечение проводника, через

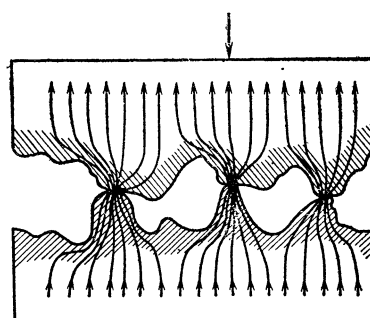


Рис. 3-1. Примерная картина прохождения тока в электрическом контакте.

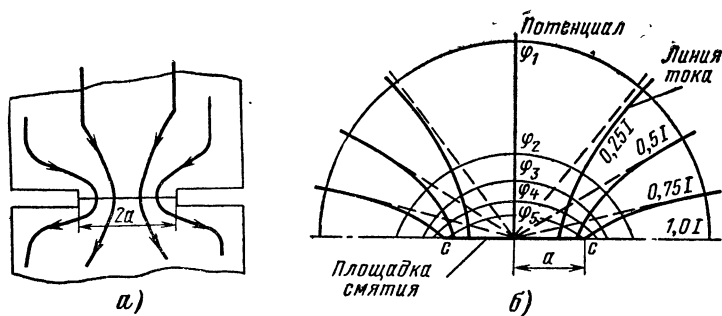


Рис. 3-2. Идеализированная картина растекания тока в односточечном контакте.

которое фактически проходит ток, становится меньше, что вызывает увеличение сопротивления.

Сопротивление в области точки касания, обусловленное явлениями стягивания тока, называется переходным сопротивлением контакта.

Картина растекания тока в области стягивания рис. 3-2, а аналогична картине растекания тока из плоского диска радиусом a в полубесконечную среду. Учитывая, что размеры области стягивания малы по сравнению с размерами тела контакта, реальные контакты можно заменить полубесконечными телами. Для двух полубесконечных тел, контактирующих по одной круглой площадке касания, картина поля тока и электрических потенциалов ϕ представлена на рис. 3-2, б.

Эквипотенциальные поверхности являются полуэллипсоидами вращения, линии тока — гиперболами с общим фокусом. Для такой идеализированной картины растекания тока в контактах сопротивление определяется выражением [Л. 3-1]

$$R_{\pi} = \rho / 2a. \quad (3-2)$$

С точностью до 5% эта формула справедлива, если поперечные размеры тела контакта превосходят в 13 раз диаметр площадки касания. В большинстве практических случаев последнее условие соблюдается, так как размеры площадки касания обычно не превосходят долей миллиметра.

Находя из (3-1) радиус площадки a и подставляя его значение в (3-2), получаем:

$$R_{\pi} = \frac{\rho \sqrt{\pi \sigma}}{2 \sqrt{F}} = \frac{k}{F^{1/2}}. \quad (3-3)$$

Таким образом, сопротивление, обусловленное стягиванием, пропорционально удельному сопротивлению, корню квадратному из временного сопротивления на смятие материала σ и обратно пропорционально корню квадратному из силы натяжения на контакты F .

Если имеет место упругая деформация контактирующих выступов, то формула для сопротивления R_{π} имеет тот же вид, но показатель степени у силы равен $1/3$.

Ниже приводятся экспериментальные значения коэффициента k для одноточечных свежезачищенных контактов [Л.1-5].

Материал контактов	Коэффициент k для силовых контактов, $H^{1/2} \cdot \text{Ом}$	Коэффициент k для слаботочных контактов (реле), $H^{1/2} \cdot \text{Ом}$
Медь	$3,16 \cdot 10^{-4}$	0,014—0,0175
Серебро	$1,58 \cdot 10^{-4}$	0,006
Олово	$15,8 \cdot 10^{-4}$	—
Латунь	$21,2 \cdot 10^{-4}$	—
Сталь	$24 \cdot 10^{-4}$	—
Алюминий	$5,05 \cdot 10^{-4}$	—

На основании математической обработки экспериментальных материалов Н. Е. Лысов предложил формулы для R_{Π} контактов, применяемых в аппаратах высокого напряжения [Л.3-2].

Одноточечный контакт применяется в основном только при малых токах. При больших токах применяется многоточечный контакт. Поскольку ток проходит через несколько контактных переходов, включенных параллельно, переходное сопротивление уменьшается по сравнению с одноточечным контактом при неизменном нажатии. Однако нажатие в действительности в каждой контактной точке уменьшается. Количество контактирующих точек увеличивается с ростом силы нажатия по весьма сложному закону. Для такого контакта переходное сопротивление выражается уравнением

$$R_{\Pi} = k/F^m. \quad (3-4)$$

Показатель m меняется от 0,7 до 1.

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

До сих пор мы рассматривали только переходное сопротивление, вызванное явлением стягивания линий тока.

В действительности контактирующие поверхности покрыты адсорбированными молекулами газа, в котором располагались контакты до их замыкания. Очень часто эти молекулы вступают в химическую реакцию с материалом контактов, в результате чего на поверхности металла могут возникнуть пленки с очень высоким удельным сопротивлением (до $10^4 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ [Л.3-1]).

Если напряжение замыкаемой цепи очень мало или нажатие на контакты недостаточно, то иногда контакты вообще не пропускают тока.

Как только свежезачищенная поверхность контактов соприкасается с воздухом, сейчас же начинается процесс образования пленки и переходное сопротивление может возрасти в десятки тысяч раз [Л.1-3].

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

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

При прохождении тока через область стягивания линий тока контакт нагревается.

Согласно [Л.3-1] превышение температуры в области стягивания $\Delta\tau_k$ может быть найдено приближенно с помощью формулы

$$\Delta\tau_k = U_k^2 / 8\lambda\rho, \quad (3-5)$$

где U_k — падение напряжения на переходном сопротивлении, равное IR_n ; λ — удельная теплопроводность; ρ — удельное электрическое сопротивление материала контактов.

Наибольшую температуру имеет площадка касания. По мере удаления от нее температура быстро падает. Протяженность области стягивания невелика и составляет (5—6) a .

Тепло, выделяющееся в области стягивания ($I^2 R_n / 2$), распространяется по телу контакта и отдается в окружающую среду через боковую поверхность тела контакта. При этом возникает дополнительный перепад температуры $\Delta\tau$, который может быть рассчитан по формуле из [Л.1-9]

$$\Delta\tau = \frac{1}{2} I^2 R_n \frac{1}{V \lambda k_t \rho S},$$

где k_t — удельный коэффициент теплоотдачи с поверхности тела; ρ и S — периметр и сечение тела контакта.

При прохождении тока само тело контакта нагревается, и превышение температуры поверхности над окружающей средой τ_t определяется в простейшем случае

уравнением (2-17). Температура площадки касания равна:

$$\theta_k = \theta_0 + \tau_t + \Delta\tau + \Delta\tau_k = \theta_0 + \frac{I^2 \rho}{k_t p S} + \frac{1}{2} I^2 R_{\Pi} \frac{1}{\sqrt{\lambda k_t p S}} + \frac{(I R_{\Pi})^2}{8 \lambda \rho}. \quad (3-6)$$

С ростом температуры сопротивление стягивания изменяется из-за роста удельного сопротивления материала. Теоретически Р. Хольм [Л. 1-3] получил:

$$R(\theta) = R(0) \left(1 + \frac{2}{3} \alpha \Delta\tau_k \right), \quad (3-7)$$

где $R(0)$ — сопротивление стягивания при температуре, равной температуре тела контакта $\theta_0 + \tau_t$.

При увеличении тока через контакт увеличивается падение напряжения $U_k = I R_{\Pi}$. Согласно уравнению (3-5) возрастает превышение температуры контактной точки $\Delta\tau_k$. Это в свою очередь вызывает увеличение сопротивления R_{Π} согласно (3-7). Зависимость сопротивления R_{Π} от напряжения U_k называется R — U -характеристикой контакта и показана на рис. 3-3.

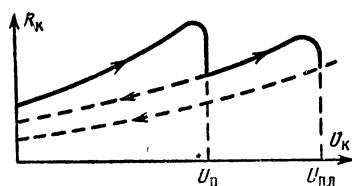


Рис. 3-3. R — U -характеристика контакта.

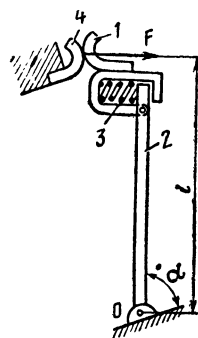


Рис. 3-4. Токоведущая цепь контакта в процессе включения.

При выводе (3-7) изменение прочности материала не учитывалось, поэтому оно дает хороший результат при температурах, не превосходящих температуру размягчения материала. При температуре размягчения площадка касания увеличивается, а переходное сопротивление резко уменьшается при неизменном нажатии. Это состояние имеет место при $U_k = U_p$, где U_p — напряжение ре-

кристаллизации или размягчения материала. Если температура продолжает расти, то может быть достигнуто плавление точки касания, чему соответствует напряжение плавления $U_k = U_{пл}$. В правильно рассчитанном контакте температура не должна достигать температуры размягчения материала.

3-2. Режимы работы контактов

а) Включение цепи. При включении контактов могут иметь место следующие процессы:

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

Рассмотрим природу вибрации на примере рис. 3-4. Подвижный контакт 1 связан с контактным рычагом 2 через контактную пружину 3. Неподвижный контакт 4 жестко закреплен на опоре. Электромагнит контактора воздействует на рычаг 2. В момент соприкосновения контактов происходит удар, в результате которого происходят деформация смятия контактов и отброс контакта 1 вправо. Между контактами образуется зазор и загорается дуга. Движение контакта 1 вправо прекратится тогда, когда энергия, полученная им при ударе, перейдет в энергию сжатия пружины 3. После этого контакт 1 под действием пружины 3 начнет перемещаться влево. Произойдет новый удар и новый отброс контакта.

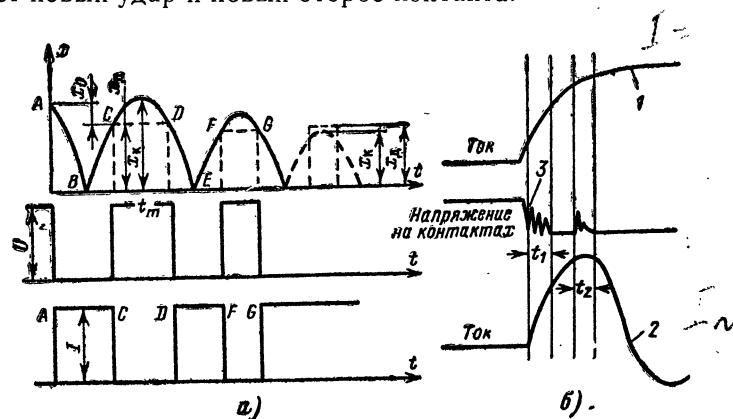


Рис. 3-5. Вибрация контактов при замыкании цепи.

Рассмотрим этот вопрос более детально. Пусть контакты соприкоснулись в точке A (рис. 3-5, a). Напряжение на контактах стало равным нулю, ток достиг значения I . Считаем, что индуктивность цепи равна нулю. После этого контакт продолжает двигаться вперед за счет инерции подвижных частей и деформации материала контактов. В точке B контакт останавливается и начинается движение назад. Упругое восстановление деформации материала контакта прекращается в точке C , но контакт по инерции продолжает движение, пока не достигнет положения x_k . После этого подвижный контакт под действием пружины снова идет на замыкание и ток появляется в точке D . Таким образом, отброс контакта за счет упругих сил материала контактов равен x_D , а за счет сил инерции x_k . В точке t_m контакты расходятся на расстояние, равное $x_k - x_D$. Если $x_D \geq x_k$, то, хотя вибрация и есть, она считается неопасной, так как размыкание контактов не происходит (рис. 3-5, a) после точки G .

Вибрация контактов — явление весьма вредное, поскольку при этом имеет место многократное образование короткой дуги, которая ведет к сильному оплавлению и распылению контактов. В связи с износом контактов уменьшается их взаимное нажатие в полностью включенном положении, что приводит к повышению переходного сопротивления. При большом числе включений и отключений возможен быстрый выход из строя контактов. Расчет вибрации контактов рассмотрен в [Л. 3-3].

Для уменьшения вибрации контактная пружина имеет предварительную деформацию (натяг) при разомкнутых контактах. В момент касания контактов сила нажатия возрастает не с нуля, а с величины предварительного начального нажатия контактов.

С ростом начальной силы нажатия контактов вибрация их резко сокращается. Однако при чрезмерно большой начальной силе вибрация может возрасти, так как при недостаточной мощности включающего электромагнита (привода) возможен отброс контактного рычага.

Увеличение жесткости контактной пружины способствует уменьшению вибрации. Однако это влияние менее заметно, чем влияние предварительного натяга.

В некоторых конструкциях между контактным рычагом и подвижным контактом вводится противовибрационный вкладыш из специального пористого материала типа губчатой резины [Л. 3-4]. Этот материал увеличивает затухание колебаний контакта и способствует уменьшению вибрации.

Увеличение тягового момента привода вначале уменьшает отброс, а затем отброс начинает возрастать. В первой области, очевидно, для данной начальной силы нажатия контактов тяговый момент недостаточен и отброс уменьшается с ростом момента. При дальнейшем возрастании тягового момента увеличиваются разгон подвижного контакта и его скорость в момент удара, что ведет к росту амплитуды отброса. В связи с этим недопустимо большое превышение тяговой характеристики над противодействующей характеристикой (§ 5-7).

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

На рис. 3-5, b рассмотрены два случая. В первом включается цепь постоянного тока — кривая тока I , во втором — переменного тока 2. Кривая 3 представляет изменение напряжения на контактах.

Время вибрации от удара контактов равно t_1 . После удара якоря электромагнита, движущего контакт, о неподвижный сердечник снова появляется вибрация подвижного контакта. Вибрация от удара якоря длится t_2 . Поскольку к этому моменту времени ток в контактах достигает большой величины, то вибрация контактов особенно опасна [Л. 3-4]. С целью снижения силы удара якоря о сердечник тяговая характеристика электромагнита не должна значительно подниматься над противодействующей (см. § 5-7).

С целью снижения вибраций, возникающих от удара якоря, магнитопровод с обмоткой крепится не жестко, а на пружинах (§ 10-3).

Как показали исследования [Л. 3-3], допустимое время вибрации не превышает 0,5—1,0 мс.

При включении на существующее короткое замыкание вибрация контактов усиливается из-за возникновения отбрасывающих сил в точке касания (§ 1-6). Для того чтобы не было оплавления контактов в момент их соприкосновения, необходимо силой предварительного натяга контактной пружины компенсировать электродинамические силы отброса и создать такое нажатие, при котором падение напряжения на переходном сопротивлении не приводит к плавлению точки касания [уравнение (3-5)].

В аппаратах на большие токи короткого замыкания электродинамические силы в торцевых контактах (рис. 3-2) получаются столь большими, что контактные пружины должны развивать усилия в несколько тысяч ньютонов. Очевидно, что в подобных случаях необходимо переходить к другой конструкции контактов, которая дает меньшую электродинамическую силу отброса (рис. 3-9, 19-5).

При включении цепи по мере приближения подвижного контакта к неподвижному возрастает напряженность электрического поля между контактами и при определенном расстоянии произойдет пробой промежутка. В аппаратах низкого напряжения пробой возникает при очень малом расстоянии между контактами (сотые доли миллиметра).

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

Износ контактов в результате переноса материала с одного контакта на другой, т. е. испарение в окружающее пространство без изменения состава материала на-

ывается физическим износом или эрозией. Эрозия при замыкании невелика, но при малых нажатиях и малых расстояниях между контактами она может повести к их спеканию [Л. 3-5].

В аппаратах высокого напряжения при сближении контактов пробой происходит при больших расстояниях. Возникшая дуга горит относительно долго, при этом возможно сваривание контактов, особенно при включении на существующее короткое замыкание. За счет применения большого числа последовательно соединенных разрывов уменьшается напряжение, приходящееся на разрыв (см. § 19-2), что дает возможность снизить время предварительного пробоя до 0,005 с, которое признано безопасным для масляных выключателей.

б) Проведение тока во включенном состоянии. В этом режиме следует различать два случая: через контакты проходит длительный номинальный ток и через контакты проходит ток короткого замыкания.

В табл. 3-1 приведены температуры и падения напряжения в контакте для двух характерных точек — точки размягчения материала θ_1 ; $U_{к1}$ и точки плавления материала θ_2 ; $U_{к2}$. Для надежной работы контактов необходимо, чтобы при номинальном токе I_n падение напряжения на сопротивлении R_n было меньше $U_{к1}$ [Л. 3-14]:

$$I_n R_n \leq U_{к.доп} = (0,5 \div 0,8) U_{к1}. \quad (3-8)$$

Т а б л и ц а 3-1

Температура и падение напряжения в контакте для точки размягчения и точки плавления материала

Материал	$\theta_1, ^\circ\text{C}$	$U_{к1}, \text{В}$	$\theta_2, ^\circ\text{C}$	$U_{к2}, \text{В}$
Алюминий	150	0,1	658	0,3
Железо	500	0,21	1530	0,6
Никель	520	0,22	1455	0,65
Медь	190	0,12	1083	0,43
Серебро	150	0,09	960	0,35
Кадмий	—	—	321	0,15
Вольфрам	1000	0,4	3370	1,0
Олово	100	0,07	232	0,13
Платина	540	0,25	1773	0,7
Графит	—	—	4700	5

Для расчета контактов на небольшие токи используется формула (3-8). По заданному току I_n и допустимому значению напряжения $U_{к.доп}$ определяем переходное сопротивление R_n , после чего находим необходимое контактное нажатие с помощью (3-3).

Для одноточечных контактов на большие токи Г. А. Кукековым [Л. 2-1] аналитически получена формула

$$F_k = I_n^2 \frac{B \pi H_k \cdot 10^7}{16 \lambda^2 \left(\arccos \frac{T_0}{T_k} \right)^2}, \quad (3-9)$$

где F_k — сила натяжения, Н;
 I_n — ток, действующее значение, А;
 B — число Лоренца $2,42 \cdot 10^{-8} \text{ В}^2/(\text{°C})^2$;
 H_k — число твердости по Виккерсу [Л. 2-1];
 λ — удельная теплопроводность, Вт/(м·°C);
 T_k — температура точки касания, К;
 T_0 — температура тела контакта, К.

Согласно (2-17)

$$T_0 = \left(\frac{I^2 \rho}{k_T p q} + \theta_0 + 273 \right), \quad (3-9a)$$

где I — действующее значение тока, А;
 ρ — удельное сопротивление материала контактов, Ом·м;
 k_T — удельный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°C);
 p — периметр сечения контакта, м;
 q — сечение тела контактов, м²;
 θ_0 — температура окружающей среды, °C; обычно $\theta_0 = 40^\circ \text{C}$.

Результаты расчета силы F_k по этой формуле хорошо совпадают с опытными данными.

Формула (3-9) позволяет по заданному току I_n сразу найти необходимое контактное нажатие F_k , если известно отношение T_0/T_k . Температура тела контакта T_0 может быть легко найдена по (3-9a). Температуру контактной точки можно определить, воспользовавшись тем, что для надежно работающих контактов разность $T_k - T_0$ не должна превышать 5—10° C.

Если имеется n контактных точек, то расчет проводится для одной контактной точки (ток I_n/n). Полная сила нажатия

$$F_{к.полн} = F_k n.$$

При коротком замыкании через контакты проходят токи, в 10—20 раз превышающие номинальные значения. Из-за малой постоянной времени нагрева температура контактной площадки практически мгновенно поднимается и может достигнуть температуры плавления.

Аналитический расчет плавящего тока при коротком замыкании затруднен, так как существующие формулы не учитывают размягчения материала при высокой температуре. Поэтому при практических расчетах контактов рекомендуется пользоваться опытными данными,

непосредственно связывающими сваривающий ток и силу нажатия. При расчетах электродинамической стойкости контактов хорошие результаты дает экспериментальная формула, полученная Г. В. Буткевичем [Л. 3-6]:

$$I \leq k \sqrt{F}, \quad (3-10)$$

где I — ток электродинамической стойкости (обычно берется амплитуда ударного тока), А;

F — сила нажатия, Н.

Значения коэффициента k приведены в табл. 3-2.

Сваривание контактов зависит от конструкции самих контактов и токоведущей цепи аппарата. Электродинамические силы, возникающие в токоведущих частях, необходимо использовать для повышения устойчивости контактов. Так, например, при кинематической схеме рис. 3-6, а контактная пружина F должна создать силу $2F_1$, полученную расчетом с помощью (3-10), и силу F_2 , действующую на перемычку от вертикальных токоведущих частей.

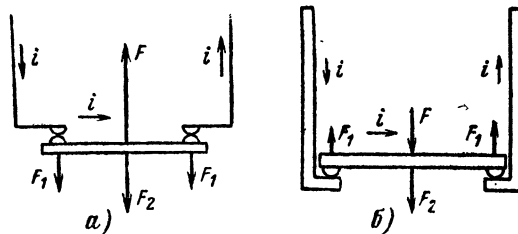


Рис. 3-6. Использование э. д. у. контура для повышения динамической стойкости контактов.

При схеме рис. 3-6, б электродинамическое усилие F_2 , действующее на перемычку, позволяет выбрать меньшую силу нажатия контактной пружины F .

В болтовом шинном соединении при коротком замыкании токоведущий проводник нагревается до температуры 200—300 °С.

Стягивающие стальные болты нагреваются в основном за счет теплопроводности, так как ток через болты практически не проходит. Температура болтов обычно не превосходит 20% температуры шин. Температурный коэффициент расширения у меди и алюминия значительно выше, чем у стали, поэтому шины, увеличиваясь по толщине больше, чем удлиняются болты, растягивают их. При этом деформация болтов может перейти за пределы упругости. Тогда после отключения цепи и остывания контакта из-за вытягивания болтов нажатие в контактах уменьшится, что приведет к увеличению его сопротивления, сильному нагреву и последующему разрушению.

Для того чтобы избежать пластической деформации шин, ставятся соответствующие шайбы. Вследствие малой прочности алюминиевых шин может произойти пластическая их деформация, что приведет к порче контакта. Поэтому для стабильности алюминиевого контакта необходимо либо производить предварительный обжим,

Т а б л и ц а 3-2

Коэффициент k для расчета динамической стойкости контактов

Тип контакта	Материал	$k, A/H^{1/2}$
Щеточный	Медь—латунь	950—1270
Пальцевый несамоустанавливающийся	Медь—медь	1300
Пальцевый несамоустанавливающийся	Латунь—медь	1200
Пальцевый несамоустанавливающийся	Латунь—сталь	1520
Пальцевый несамоустанавливающийся	Латунь	1600
Пальцевый самоустанавливающийся	Медь—латунь	1820
Розеточный (на один элемент розетки)	Медь—латунь	1740
Розеточный (на один элемент розетки)	Медь—медь	1900

уплотнение шин, либо ставить под гайки пружинящие шайбы или специальные пружины, которые ограничивают деформации элементов контактов. Расчет шинного болтового соединения при коротком замыкании приведен в [Л. 1-5].

в) Отключение цепи. При размыкании контактов сила нажатия уменьшается, переходное сопротивление возрастает, и поэтому растет температура точек касания. В момент разъединения контактов температура достигает температуры плавления и между контактами возникает мостик из жидкого металла. При дальнейшем движении контактов мостик обрывается и в зависимости от параметров отключаемой цепи возникает либо дуговой разряд (табл. 3-3), либо тлеющий.

При возникновении дугового разряда температура катодного и анодного пятен дуги достигает точки плавления материалов. Высокая температура контактов приводит к их интенсивному окислению, распылению материала контактов в окружающем пространстве, переносу материала с одного электрода на другой и образованию пленок. Все это влечет за собою износ контактов.

Износ, связанный с окислением, образованием на

электродах пленок химических соединений материала контактов со средой, называется химическим износом или коррозией.

Перенос материала с одного электрода на другой наиболее вреден при постоянном токе, поскольку направление переноса не меняется, что ведет к быстрому выходу из строя контактов. Перенос материала с анода на катод называется положительной эрозией. Перенос в обратную сторону — отрицательной.

Мерой эрозии является потеря массы или объема контакта.

Направление эрозии и форма износа контактных поверхностей зависят от вида разряда и величины тока [Л. 3-5].

Для существования дугового разряда необходимо, чтобы величины тока и напряжения превышали минимальные значения, приведенные в табл. 3-3.

Т а б л и ц а 3-3

Минимальные значения напряжения и тока, необходимые для поддержания дугового разряда

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

Если величина тока меньше I_0 (табл. 3-3), то при напряжении цепи 270—330 В возникает тлеющий разряд или искра.

При токе $I \leq 5$ А срок службы контактов можно рассчитать с помощью формулы

$$N = \frac{0,6V_0 \gamma}{\gamma_k q_0},$$

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

V_0 — объем контакта, предназначенный на износ, м^3 ;

γ — плотность материала, кг/м^3 ;

γ_k — эмпирический коэффициент износа, кг/Кл ;

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

Коэффициент γ_k берется из табл. 3-4.

Таблица 3-4

Коэффициенты износа контактов γ_k для различных материалов

Материал	γ_k , кг/Кл. $\cdot 10^{-9}$	Материал	γ_k , кг/Кл. $\cdot 10^{-9}$
Серебро	3,6 ÷ 10	Медь	6
Золото	15	Серебро — никель	20
Вольфрам	1,5	Серебро — золото	15
Платина	5,5	Платина — иридий	9

Количество электричества, протекающего через дугу, равно

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

и находится по осциллограмме.

При ориентировочных расчетах можно принять, что ток в процессе гашения спадает по линейному закону. Тогда

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

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

При токах $I > 5$ А хорошие результаты дает формула Р. С. Кузнецова [Л. 3-7]

$$Q = 10^{-9} k_n N I_0^2,$$

где Q — износ контакта, г;
 N — число операций, «включение — отключение»;
 I_0 — ток отключения, А;
 k_n — эмпирический коэффициент, г/А².

При малой вибрации контактов коэффициент износа k_n равен 0,001—0,003 для серебра, 0,001—0,012 для КМК-А10. При значительной вибрации k_n равен 0,2 для меди, 0,05 для серебра, 0,015—0,04 для КМК-А30.

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

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

Для контактов, управляющих токами от долей ампера до нескольких ампер, применяются схемные методы уменьшения эрозии.

Наиболее распространенные схемы приведены на рис. 3-7. Вся электромагнитная энергия цепи при отключении выделяется в дуго-

вом промежутке (§ 4-2). Исследования показали, что чем меньше эта энергия, тем меньше эрозия контактов.

В схеме рис. 3-7, а электромагнитная энергия, накопленная в индуктивности L , тратится в активных сопротивлениях r и R . Согласно [Л. 3-9] искра отсутствует, если

$$r \leq \left(\frac{300}{U_1} - 1 \right) R.$$

Дуга отсутствует при условии

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

U_0 и I_0 берутся по табл. 3-3.

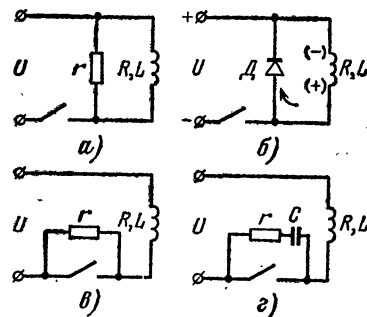


Рис. 3-7. Схемы для уменьшения износа контактов.

Наличие резистора r увеличивает токовую нагрузку контактов, что является недостатком схемы. В связи с широким выпуском высококачественных диодов рекомендуется схема рис. 3-7, б. В этой схеме контакты нагружаются только током U/R и обратным током диода D .

При отключении магнитный поток в системе начинает падать. При этом обмотка будет закорочена на сопротивление диода в проводящем направлении.

Для схемы рис. 3-7, в выполнено условие отсутствия искрового разряда, если

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

Однако с уменьшением r растет ток, который должен отключать другие контакты для полного обесточивания цепи.

Хорошие результаты дает схема рис. 3-7, г. Наличие конденсатора уменьшает ток между контактами, так как в конденсатор отводится ток, равный $C du/dt$, где u — напряжение на контактах. Наличие емкости снижает скорость нарастания напряжения на контактах, в результате чего разряд может прекратиться.

При замыкании цепи возможна сильная эрозия за счет энергии конденсатора, разряжающегося на промежуток. Для ограничения тока разряда ставится сопротивление r . Ориентировочный выбор C и

r приведен в [Л. 3-8]. При правильном выборе r и C эрозия должна отсутствовать.

Для обеспечения гашения дуги и уменьшения обгорания контактов силовоточные аппараты (контакторы, автоматы, высоковольтные выключатели) снабжаются дугогасительными камерами (гл. 10, 18, 19).

С этой же целью подвижный контакт должен иметь определенную скорость движения и определенный ход в зависимости от конструкции аппарата и его номинального напряжения (гл. 8, 19).

3-3. Материалы контактов

К материалу контактов предъявляются следующие требования:

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

Свойства некоторых контактных материалов рассмотрены ниже.

Медь. Положительные свойства: высокие электрическая проводимость и теплопроводность, достаточная твердость, что позволяет применять при частых включениях и отключениях довольно высокие значения U_0 и I_0 , простота технологии, низкая стоимость.

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

Серебро. Положительные свойства: высокие электро- и теплопроводность, пленка окисла серебра имеет малую механическую прочность и быстро разрушается при нагреве контактной точки [Л. 2-6]. Контакт серебра устойчив, благодаря малой механической прочности достаточны малые нажатия (применяется при нажатиях 0,05 Н и выше). Устойчивость контакта, малое переходное сопротивление являются характерными свойствами серебра.

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

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

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

Недостатки алюминия: 1) образование на воздухе и в активных средах пленок с высокой механической прочностью и высоким сопротивлением; 2) низкая дугостойкость (температура плавления значительно меньше, чем у меди и серебра); 3) малая механическая прочность; 4) при контакте с медью образуется пара, подверженная сильной электрохимической коррозии. В связи с этим при соединении с медью алюминий должен покрываться тонким слоем меди электролитическим путем либо оба металла необходимо покрывать серебром.

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

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

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

В реле на малые токи с небольшим нажатием применяются стойкие против коррозии материалы — золото, платина, палладий и их сплавы [Л. 3-5].

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

Основные необходимые свойства контактного материала — высокая электрическая проводимость и дугостойкость — не могут быть получены за счет сплавов таких материалов, как серебро и вольфрам, медь и вольфрам, так как эти металлы не образуют сплавов. Материалы, обладающие желаемыми свойствами, получают методом порошковой металлургии (металлокерамики) [Л. 3-9]. Физические свойства металлов при изготовлении металлокерамических контактов сохраняются. Дугостойкость керамике сообщается такими металлами, как вольфрам, молибден. Для получения низкого переходного сопротивления контакта в качестве второго компонента ис-

пользуют серебро или медь. Чем больше в материале вольфрама, тем выше дугостойкость, механическая прочность, сопротивление свариванию. Но соответственно растет сопротивление контактов, уменьшается теплопроводность. Обычно металлокерамика с содержанием вольфрама выше 50% применяется для тяжело нагруженных аппаратов, отключающих большие токи короткого замыкания.

Свойства и состав наиболее распространенной металлокерамики приведены в табл. 3-5.

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

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

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

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

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

В заключение следует отметить, что хотя применение металлокерамики увеличивает стоимость аппаратуры в эксплуатации, эти «лишние» затраты быстро окупаются, так как возрастает срок службы аппарата, увеличивается время между ревизиями и значительно повышается надежность [Л. 3-10].

Таблица 3-5

Свойства металлокерамических контактных материалов [Л. 3-2]

Марка материала	Основные компоненты	Плотность, $кг/м^3$	Удельное сопротивление, $мкОм \cdot м$	Число твердости по Бринеллю
КМК-10А	Серебро, окись кадмия	9 700	0,030	45—75
КМК-А20	Серебро, окись меди	9 500	0,025	45—60
КМК-А31	Серебро, никель	9 500	0,032	60—80
КМК-А60	Серебро, вольфрам, никель	13 500	0,041	120—160
КМК-А61	Серебро, вольфрам, никель	15 000	0,045	170—210
КМК-Б-20	Медь, вольфрам, никель	12 100	0,06	120—150
КМК-Б-21	То же	13 800	0,07	170—200

3-4. Конструкция контактов

а) **Жесткие.** Контакты служат для неподвижного соединения токоведущих деталей. Сюда относятся шинные соединения, соединения кабелей, места присоединения аппаратов к цепи.

В процессе эксплуатации оба контакта связываются либо с помощью болтов, либо с помощью горячей или холодной сварки [Л. 3-11].

При болтовом соединении медных шин перед сборкой шины тщательно зачищаются от окислов, смазываются техническим вазелином. После сборки весь контакт в целом и особенно швы должны быть окрашены влагостойким лаком или краской. Такое приготовление контактов уменьшает переходное сопротивление и делает его стабильным во времени.

Покрытие соприкасающихся поверхностей оловом (лужение) немного увеличивает начальное сопротивление, но благодаря пластичности олова увеличивается количество площадок смятия. Контакт получается более плотным, сопротивление контакта более стабильным.

Для ответственных деталей, особенно при больших номинальных токах, рекомендуется серебрение соприкасающихся поверхностей. Алюминий на воздухе подвергается сильной коррозии, зачистка соприкасающихся поверхностей производится под вазелином. После зачистки грязный вазелин меняется на чистый и контакты соединяются с помощью болтов. Болтовые соединения ведут себя недостаточно надежно, особенно при алюминиевых контактах. Поэтому в настоящее время алюминиевые контакты соединяются с помощью холодной или термитной сварки [Л. 3-12].

Рекомендуемые давления при болтовом соединении приведены ниже.

Материалы контактного соединения

	Давление 10 ⁴ Па
Медь луженая	500—1000
Медь, латунь, бронза нелуженые . .	600—1200
Алюминий	2500

Величина момента при затяжке болтов контакта контролируется специальным моментным ключом [Л. 3-13].

б) Неразмыкающиеся контактные соединения подвижных элементов. Такие соединения используются либо для того, чтобы передать ток с подвижного контакта на неподвижный, либо для того, чтобы дать возможность элементу неподвижного контакта иметь небольшое перемещение под действием подвижного контакта.

Наиболее простым соединением такого типа является

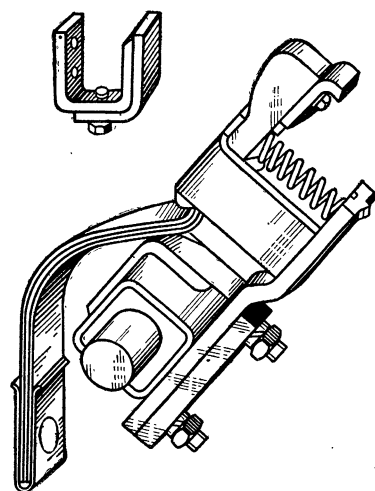


Рис. 3-8. Передача тока с подвижного контакта на вывод гибкой связью.

гибкая связь (рис. 3-8).

Для получения необходимой эластичности связь изготавливается из медной ленты толщиной $0,1 \cdot 10^{-3}$ м и менее или из многожильного плетеного проводника, состоящего из медных жил диаметром $0,1 \times 10^{-3}$ м. Гибкая связь при своей работе не должна иметь резких перегибов, в противном случае она быстро разрушается.

При больших ходах подвижных контактов длина гибкой связи получается значительной. Поэтому такой контакт применяется только при перемещениях подвижного элемента не более 0,25 м.

При больших ходах и больших номинальных токах применяются скользящие и роликовые токосъемы. Принцип действия токосъема ясен из рис. 3-9, 3-10. Недостатком скользящего токосъема является большая сила трения, которая требует значительных усилий от приводного механизма.

Меньшую силу трения дает роликовый контакт (рис. 3-10).

Число роликов берется в зависимости от номинального тока и тока короткого замыкания. Этот контакт для своего перемещения требует небольших усилий и нашел широкое применение в современной аппаратуре высокого напряжения.

в) **Разрывные контакты.** В процессе работы контакты большого числа аппаратов разрывают цепь с током, большим, чем минимальный ток дугообразования I_0 . Возникающая электрическая дуга способствует быстрому износу контактов.

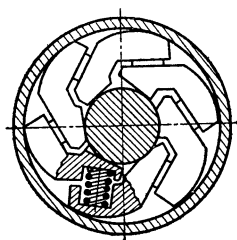


Рис. 3-9. Сквозной токосъемный розеточный контакт.

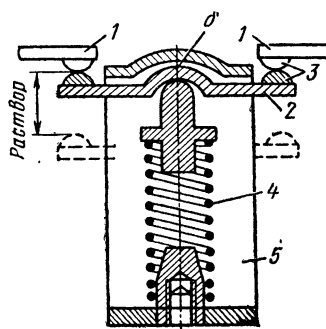
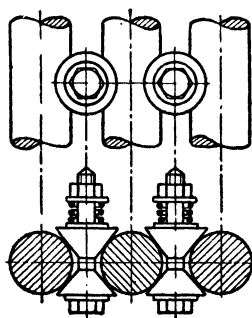


Рис. 3-11. Контактный узел с самоустанавливающимся подвижным контактом.



←Рис. 3-10. Роликовый токосъемный контакт.

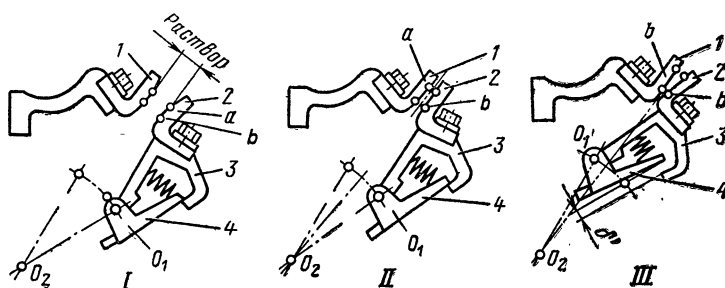


Рис. 3-12. Контактный узел с перекачиванием подвижного контакта.

Для надежного гашения дуги, образующейся при отключении, между неподвижным и подвижным контактами необходимо создавать определенное расстояние (§ 10-2, 10-3). В реальных аппаратах это расстояние выбирается с запасом.

Расстояние между неподвижным и подвижным контактами в полностью отключенном положении аппарата называется раствором контактов (рис. 3-11, 3-12). Конструкция разрывных контактов зависит от номинального тока, тока короткого замыкания цепи, режима работы, назначения аппарата и рассмотрена в разделах, посвященных устройству различных аппаратов. Здесь же мы рассмотрим только некоторые общие вопросы.

В зависимости от конструкции крепления контактов изменяются число контактных точек соприкосновения и стабильность контакта.

Контакт, имеющий возможность свободно устанавливаться на поверхности, имеет максимальное число точек касания. Такой контакт называется самоустанавливающимся. Пример такого контакта дан на рис. 3-11. Неподвижные контакты 1 и подвижный мостиковый контакт 2 в месте касания имеют сферические (или цилиндрические) напайки 3, выполненные из серебра или металлокерамики. Нажатие контактов создается пружиной 4. После касания контактов скоба 5, связанная с приводом аппарата, продолжает свое движение вверх на величину, равную вжиму (провалу) контакта δ .

Применительно к рис. 3-11 и 3-12 провалом (вжимом) контакта называется расстояние, на которое переместится подвижный контакт, если убрать неподвижный контакт.

В контактах рис. 3-11 пленка окисла не стирается, поэтому в этой конструкции не рекомендуется использовать медь как контактный материал.

На рис. 3-12 показана пальцевая система с перекатыванием, широко применяемая в контакторах с медными контактами. Контактный рычаг 4 связывается с якорем электромагнита. При включении центр O_1 перемещается по дуге с радиусом $O_2O_1(I)$. Касание пальцев 1 и 2 происходит в точках $a(II)$. При дальнейшем перемещении O_1 точка касания переходит в $b(III)$. Перекатывание контакта 2 по контакту 1 происходит с небольшим проскальзыванием. При этом пленка окисла на контактах стирается. При включении контактов, отключавших ду-

гу, из-за шероховатости на поверхности касания появляется дополнительная вибрация контактов. Поэтому величина проскальзывания должна быть небольшой. При отключении дуга загорается между точками $a-a$, что спасает от оплавления точки $b-b$, в которых контакты касаются во включенном положении. Таким образом, удается разделить контакт на две части: в одной происходит гашение дуги, в другой ток проводится длительно. Поскольку для контактов по рис. 3-12 непосредственный контроль провала контактов δ затруднен, о величине провала судят по зазору δ' , образуемому между рычагом 4 и контактной скобой 3.

Во всех без исключения аппаратах имеется вжим (провал) контактов, который обеспечивает необходимое нажатие контактов. Вследствие обгорания и износа контактов в процессе эксплуатации вжим уменьшается, что приводит к уменьшению силы нажатия и росту переходного сопротивления контактов. Поэтому в эксплуатации вжим контактов должен обязательно контролироваться и находиться в пределах, требуемых заводом-изготовителем. Особенно это относится к аппаратам, работающим в режиме частых включений и отключений (контакторы), где износ контактов интенсивен. Допустимое уменьшение провала дается заводом-изготовителем и обычно составляет 50% начального значения.

В торцевом мостиковом контакте (рис. 3-11) вжим обычно составляет 3—5 мм. В мощных выключателях высокого напряжения он увеличивается до 8—10 мм.

В высоковольтных масляных выключателях широко применяется розеточная система. Подвижный контакт выполняется в виде круглого стержня, неподвижный — в виде розетки, состоящей из ламелей (рис. 19-5). Такая система имеет низкое переходное сопротивление и позволяет резко снизить контактное давление на ламель. При переходе от торцевого контакта к розеточному сила нажатия на ламель из условий сваривания уменьшается примерно в $1/n^2$ раз, где n — число ламелей.

При больших номинальных токах (более 2000 А) применяется сдвоенная контактная система (рис. 3-13). Аппарат имеет основные контакты $1-1'$ и дугогасительные $2-2'$.

Тело главных контактов выполняется из меди, а поверхности их соприкосновения из серебра, нанесенного

электролитически (слой 20 мкм) или в виде припаянных серебряных пластинок (рис. 3-13).

Тело дугогасительного контакта выполняется из меди. Наконечники дугогасительных контактов выполняются из дугостойкого материала — вольфрама или металлокерамики.

Ввиду того, что сопротивление цепи главных контактов значительно меньше, чем дугогасительных, 75—80% длительного тока проходит через главные контакты, имеющие малое переходное сопротивление.

При отключении вначале расходятся главные контакты и весь ток цепи перебрасывается в дугогасительные.

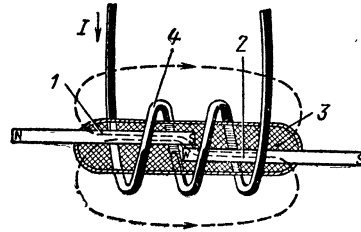
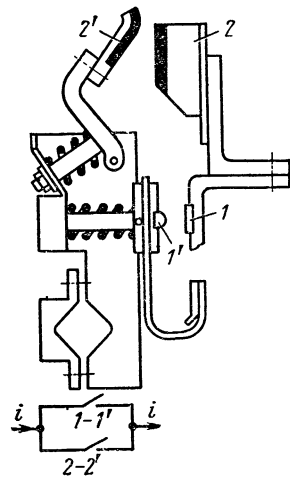


Рис. 3-14. Герметический контакт (геркон).

←Рис. 3-13. Двухступенчатая контактная система.

Контакты 2—2' расходятся в тот момент, когда расстояние между главными контактами достаточно, чтобы выдержать наибольшее напряжение, возникающее в процессе гашения дуги на дугогасительных контактах. Необходимо отметить, что при отключении больших токов на главных контактах возникает дуга [Л. 3-7, 3-15]. Дело в том, что после размыкания главных контактов весь ток цепи начинает проходить через дугогасительную систему и на главных контактах появляется напряжение. Допустим, что дугогасительная система имеет сопротивление R_2 и индуктивность L_2 , а скорость нарастания тока в этой цепи di_2/dt . Тогда напряжение на главных контактах равно $u_c = i_2 R_2 + L_2 di_2/dt$. Оно может быть достаточным для пробоя промежутка между главными контактами. Согласно рекомендации [Л. 3-7] для уменьшения обгорания главных контактов необходимо стремиться уменьшить индуктивность L , равную:

$$L = L_2 + L_1 - 2M,$$

где L_2 —индуктивность дугогасительного контура;
 L_1 —индуктивность главного контура;
 M —взаимная индуктивность этих контуров.

При включении системы рис. 3-13 вначале замыкаются дугогасительные контакты, а затем главные, что обеспечивает отсутствие дуги и оплавление на серебряных поверхностях главных контактов. Ввиду громоздкости это решение применяется только при очень больших токах в автоматах и выключателях высокого напряжения.

Во всех остальных случаях стремятся подобрать соответствующий контактный материал и обойтись одноконтактной системой.

Герметизированные контакты (герконы). В связи с бурным развитием автоматики и вычислительной техники потребовались контакты, которые имели бы высокую надежность и большое быстродействие. Этим требованиям удовлетворяют герконы. Эскиз такого контакта дан на рис. 3-14. Контакты 1 и 2, выполненные из железоникелевого сплава, размещены внутри стеклянного баллончика 3, заполненного азотом с примесью водорода или гелия. При малых токах давление газа 10^5 Па. Если ток отключения равен 2—3 А, то давление повышается до $(4—5) \cdot 10^5$ Па.

При прохождении тока через катушку 4 под действием магнитного поля контакты замыкаются. После отключения катушки контакты размыкаются под действием упругих пластин.

Управление контактами может производиться и с помощью постоянного магнита. При приближении такого магнита поток проходит через контакты, происходит смыкание контактов. При удалении — размыкание. Это позволяет выполнить путевые выключатели на герконах [Л. 3-16]. Геркон может иметь и размыкающийся и переключающийся контакты. Герконы позволяют легко создать реле с памятью. Магнитопровод из магнитно-твердого материала примыкает к контактам 1 и имеет управляющую обмотку. При подаче сигнала магнитопровод намагничивается и контакты смыкаются. После снятия сигнала через контакты проходит остаточный поток, обеспечивающий замыкание контактов. Для размыкания контактов необходимо подать импульс обратной полярности и размагнитить магнитопровод [Л. 3-19].

Для получения надежного контакта поверхности соприкосновения покрываются тонким слоем золота, родия или серебра. Перед установкой контакты нагрева-

ются до высокой температуры, при которой они освобождаются от вредных окислов и загрязнений.

Благодаря тому, что контакты изолированы от окружающей среды и работают в атмосфере инертного газа, надежность их минимум на два порядка выше, чем у обычных контактов в воздухе, и достигает $2 \cdot 10^8$ — $2 \cdot 10^9$ коммутаций.

Отсутствие электромагнитной системы, свойственной электромагнитным реле (см. § 11-3), в 3 раза сокращает время срабатывания и отпускания. Подробные сведения по герконам даны в [Л. 3-17, 3-18].

Эти контакты благодаря своим преимуществам широко начинают применяться и в аппаратах высокого напряжения, вплоть до 10 кВ. При высоких напряжениях контакты работают в вакууме (см. гл. 19).

Недостатками герконов являются вибрация контактов при смыкании, недостаточная удароустойчивость. Длительность вибрации зависит от многих факторов и колеблется в пределах 0,3—1 мс.

Максимальная коммутируемая мощность отечественных герконов пока не превышает 15 Вт (0,5 А, 30 В).

3-5. Примеры расчета контактов аппарата

Контакты образованы двумя торцами медных цилиндров. Определить необходимо контактное нажатие при длительном токе 1000 А и токе короткого замыкания 30 кА. Диаметр цилиндра $d=0,030$ м. Температура окружающей среды $\theta=40^\circ\text{C}$.

Необходимое нажатие (Н) исходя из длительного режима работы по (3-9)

$$F = \frac{I^2 B \pi H_K \cdot 10^7}{16 \lambda^2 \left[\arccos \frac{T_0}{T_m} \right]^2},$$

где I — 1000 А; теплопроводность меди $\lambda=3,9 \cdot 10^2$ Вт/(м·°С) [Л. 2-1]; $B=2,42 \cdot 10^{-8}$ (В/°С)²; H_K — число твердости по Виккерсу [Л. 2-1]; $k_T=12$ Вт/(м²·°С) (табл. 2-1).

Температура тела контакта T_0 :

$$T_0 = \theta_0 + 273 + \frac{I^2 \rho}{k_T p q};$$

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

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

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

$$T_0 = 40 + 273 + \frac{1000^2 \cdot 1,99 \cdot 10^{-8}}{12 \cdot 9,45 \cdot 7,07 \cdot 10^{-6}} = 338 \text{ К.}$$

Согласно § 3-2 разница $T_m - T_0 = 5 \div 10 \text{ К.}$

$$F = \frac{1000^2 \cdot 2,42 \cdot 10^{-8} \cdot 3,14 \cdot 52 \cdot 10^7}{16 \cdot 3,9^2 \cdot 10^4 \left[\arccos \frac{338}{348} \right]^2} = 538.$$

Необходимое нажатие исходя из тока короткого замыкания согласно (3-10)

$$F \geq I_{уд}^2 / k^2.$$

Согласно табл. 3-2 $k = 1300$, следовательно,

$$F \geq \frac{5820 \cdot 10^6}{169 \cdot 10^4} = 3340 \text{ Н.}$$

Таким образом, данная контактная система при силе нажатия 538 Н не может быть устойчивой при коротком замыкании. Сила нажатия должна быть увеличена до 3440 Н. Если такое нажатие нельзя создать по конструктивным соображениям, то надо либо переходить на розеточную или многопальцевую контактную систему, либо применить металлокерамику. Так, использование КМК-Б21 делает достаточным усилие 510 Н при ударном токе 76,6 кА [Л. 3-2].

2. Определить необходимое давление серебряных однотоочечных контактов. Длительный ток 10 А. Ток короткого замыкания 100 А. Для надежной работы контактов согласно (3-8)

$$I_n R_n \leq 0,5 U_p.$$

Для серебра $U_p = 0,09 \text{ В}$ (табл. 3-1), $U_{к.доп} = 0,045 \text{ В.}$

$$R_n = \frac{0,045}{10} = 0,0045 \text{ Ом.}$$

Для однотоочечного контакта $R_n = k/F^2$; $k = 0,006$;

$$F = \left(\frac{k}{R_n} \right)^2 = \left(\frac{0,006}{0,0045} \right)^2 = 1,68 \text{ Н.}$$

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

$$I_{уд} = 255 \text{ А; } k = 1300 \text{ (табл. 3-2)}$$

$$F = \frac{255^2}{169 \cdot 10^4} = 0,0378 \text{ Н.}$$

В данном случае нажатие определяется номинальным током.

Глава четвертая
ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ДУГА

4-1. Общие сведения

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

Если ток в цепи и напряжения выше значений, указанных в табл. 3-3, то имеет место дуговой разряд.

Основные свойства дугового разряда.

1. Дуговой разряд имеет место только при токах большой величины. Минимальный ток дуги для различных материалов приведен в табл. 3-3 и для металлов составляет примерно 0,5 А.

2. Температура центральной части дуги очень велика и в аппаратах может достигать 6000—18 000 К.

3. Плотность тока на катоде чрезвычайно велика и достигает 10^2 — 10^3 А/мм².

4. Падение напряжения у катода составляет всего 10—20 В и практически не зависит от тока.

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

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

а) **Околокатодная область.** Околокатодная область занимает весьма небольшое пространство. Длина ее обычно не более 10^{-6} м. На протяжении этой области создается катодное падение напряжения, равное 10—20 В. Средняя напряженность электрического поля у катода достигает 10^7 В/м. Основными носителями

тока в катодной области являются электроны, получаемые с катода. Около катода расположен положительный объемный заряд, создаваемый положительными ионами. Между положительным объемным зарядом и катодом создается электрическое поле, в котором двигаются электроны, вышедшие из катода. Силы электрического поля воздействуют на электрон и увеличивают его скорость. При соударении такого электрона с нейтральной частицей может произойти ионизация. Для того чтобы ионизировать нейтральный атом, необходимо, чтобы электрон обладал определенной энергией.

Напряжение U_i (разгоняющее напряжение), которое должен пройти электрон для приобретения энергии, необходимой для ионизации, называется потенциалом ионизации. Для газов этот потенциал колеблется от 24,58 В (гелий) до 13,3 В (водород). Пары металлов имеют значительно меньший потенциал ионизации. Так, для паров меди он равен 7,7 В.

Положительные ионы, так же как и электроны, разгоняются электрическим полем, но из-за большой массы скорость их незначительна. При ударе положительного иона о нейтральную частицу меньшая часть энергии передается на ионизацию, так что ионизация толчком происходит в основном за счет электронов.

Ввиду малой протяженности околокатодной области электроны не набирают скорости, достаточной для ионизации ударом. Чаще всего после удара атом переходит в возбужденное состояние (электрон атома переходит на более удаленную от ядра орбиту). Для ионизации возбужденного атома требуется меньшая энергия. В результате необходимый потенциал ионизации уменьшается. Такая ионизация называется ступенчатой. При ступенчатой ионизации необходим многократный удар электронов по атому: на каждый образующийся положительный ион требуются десятки электронов. Поэтому ток около катода, несмотря на наличие положительных ионов, носит электронный характер.

Образующиеся электроны не создают около катода отрицательного объемного заряда, так как их скорость значительно больше скорости тяжелых положительных ионов. Положительные ионы разгоняются в поле катодного падения напряжения и бомбардируют катод. Благодаря этому температура катода поднимается и дости-

гает точки испарения материала электрода. При высоких температурах появляется термоэлектронная эмиссия катода, которая в сильной степени зависит от температуры электрода. Исследования, проведенные Л. А. Сена [Л. 4-1], говорят о том, что количество электронов, необходимых для существования дуги, может быть получено и за счет автоэлектронной эмиссии.

б) **Область дугового столба.** Расчеты показывают, что энергия, приобретенная заряженными частицами в электрическом поле дугового столба, столь мала, что практически ионизация толчком не происходит. Основным источником ионов и электронов является термическая ионизация.

При большой температуре скорость частицы возрастает до величины, при которой удар в нейтральный атом приводит к его ионизации. Чем меньше масса частицы, тем больше ее скорость движения. Количество зарядов, появляющихся в результате термической ионизации, можно определить с помощью уравнения, полученного индийским ученым Саха:

$$\frac{x^2}{1-x^2} \cdot 10^{-5} p = 315,8 T^{2,5} e^{-\frac{11600 U_i}{T}} \cdot 10^{-8}, \quad (4-1)$$

где x — степень ионизации, равная отношению числа ионизированных частиц к полному числу атомов в данном объеме;

p — абсолютное давление газа, Па;

T — абсолютная температура газа, К;

U_i — потенциал ионизации, В.

Анализ (4-1) показывает, что чем больше давление газа, тем ниже степень ионизации. В связи с этим во многих дугогасящих устройствах создается повышенное давление газа, что способствует гашению дуги. Очень сильное влияние на ионизацию оказывает температура. Для большого числа двухатомных газов из-за ступенчатой ионизации процесс образования ионов начинается при температурах $6 \cdot 10^3$ К. Пары металла ионизируются значительно легче. Заметная ионизация начинается уже при температурах 3000—4000 К. В связи с этим в дугогасительных устройствах необходимо принимать меры, препятствующие попаданию металлических паров электродов в столб дуги (уменьшение сечения плавких вставок предохранителей, перемещение дуги по электродам,

уменьшающее температуру электродов, а следовательно, их испарение, и ряд других мер).

Поскольку степень ионизации определяется температурой, во всех без исключения дугогасительных устройствах стремятся отводить тепло от дуги либо за счет охлаждения движущимся воздухом или газом (воздушные, масляные выключатели), либо за счет отдачи тепла стенкам дугогасительной камеры.

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

Рекомбинация — это нейтрализация частиц за счет соединения ионов с зарядами различных знаков. Как показали исследования, в дуговом столбе рекомбинация электрона и положительно заряженного иона из-за большого различия в их массе маловероятна. Обычно рекомбинация происходит таким образом, что сначала электрон отрицательно заряжает нейтральную частичку, после чего происходит рекомбинация положительного и образовавшегося отрицательного иона. Очевидно, что чем больше зарядов в единице объема, тем сильнее будет рекомбинация. Уменьшение числа зарядов за счет рекомбинации можно найти с помощью уравнения

$$\left| \frac{dn}{dt} \right|_p = \alpha n^2, \quad (4-2)$$

где $\left| \frac{dn}{dt} \right|_p$ — скорость уменьшения числа зарядов за счет рекомбинации;

α — коэффициент рекомбинации;

n — число ионов одного знака (в стационарном режиме число положительных и отрицательных ионов в столбе дуги одинаково). Вывод уравнения (4-2) дан в [Л. 4-2].

Коэффициент рекомбинации зависит от рода газа, давления и температуры.

При спадании температуры коэффициент рекомбинации сильно возрастает. Ориентировочно можно считать, что коэффициент рекомбинации α обратно пропорционален абсолютной температуре в третьей степени.

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

число частиц в столбе дуги уменьшается, сопротивление дугового столба увеличивается.

Из теории диффузии газов известно, что скорость убывания частиц пропорциональна их количеству:

$$\left| \frac{dn}{dt} \right|_d = \frac{2Dn}{r^2}, \quad (4-3)$$

где $\left| \frac{dn}{dt} \right|_d$ — скорость убывания частиц за счет диффузии;
 D — коэффициент диффузии;
 n — число заряженных частиц одного знака;
 r — радиус дуги.

Коэффициент диффузии равен $D = \lambda v / 3$, где λ — длина свободного пробега иона; v — средняя скорость движения иона.

Анализ (4-3) показывает, что скорость убывания числа заряженных частиц резко возрастает с уменьшением радиуса дуги. Поэтому в дугогасительных устройствах широко используется принцип узкой щели (дуга горит в щели, образованной дугостойкими стенками с высокой теплопроводностью). Суммируя результаты ионизационных процессов в дуге, можно записать:

$$\frac{dn}{dt} = \left| \frac{dn}{dt} \right|_t - \left| \frac{dn}{dt} \right|_p - \left| \frac{dn}{dt} \right|_d. \quad (4-4)$$

В уравнении (4-4) величина $\left| \frac{dn}{dt} \right|_t$ — скорость возникновения зарядов за счет термической ионизации.

Для стабильно горящей дуги, сопротивление которой неизменно при данном токе, $dn/dt = 0$, т. е. скорость роста числа ионизированных частиц равна скорости их исчезновения. Устанавливается динамический баланс. В случае погасания дуги, очевидно, $dn/dt < 0$. Зарядов, которые образуются при ионизации, меньше, чем исчезает при деионизации.

Очевидно, что при переходе к большему току вначале $dn/dt > 0$. Затем устанавливается динамический баланс $dn/dt = 0$, соответствующий этому значению тока.

в) **Энергетический баланс дуги.** Процесс ионизации и процесс деионизации в значительной степени определяются температурой дугового промежутка. Последняя зависит от количества тепла, выделяемого в дуге, и количества тепла, отводимого от дуги.

Охлаждение дуги происходит за счет излучения, теплопроводности и конвекции.

Для открытой дуги, горящей в воздухе, за счет лучеиспускания отдается 15—30% энергии, выделяемой в дуге. Для дуги, горящей в закрытом дугогасительном устройстве, доля тепла, отдаваемого лучеиспусканием, меньше.

Отвод тепла за счет теплопроводности газа в значительной степени зависит от температуры газа. Так, при температуре 4000 К молекулы водорода диссоциируют на атомы. При этом от дуги отводится большое количество тепла. Внешне этот процесс рассматривается как резкое увеличение теплопроводности. Теплопроводность газа сильно зависит от его природы. Так, средняя теплопроводность водорода в 17 раз больше, чем воздуха. Благодаря своей высокой теплопроводности при прочих равных условиях водород способствует более быстрому охлаждению столба дуги. Ток, отключаемый в атмосфере водорода, в 7,5 раз больше, чем в воздухе при том же давлении.

При горении дуги в трансформаторном масле последнее разлагается, выделяя газы, основную часть которых составляет водород. В атмосфере этого газа и происходит эффективное гашение. В некоторых аппаратах под действием магнитного поля дуга перемещается с большой скоростью относительно воздуха. Все это приводит к охлаждению дуги за счет конвекции. Этот вид теплоотдачи наряду с теплопроводностью является для дуги решающим.

г) **Околоанодная область.** Поток электронов из столба дуги устремляется к положительному электроду — аноду. Анод при дуговом разряде не излучает положительных ионов, которые могли бы нейтрализовать электроны. Поэтому вблизи анода создается отрицательный объемный заряд, что и вызывает появление околоанодного падения напряжения и повышение напряженности электрического поля. Величина анодного напряжения зависит от температуры анода, рода металла, тока и составляет от 5 до 10 В [Л. 4-3].

Электроны разгоняются в поле, образованном отрицательным объемным зарядом и анодом. Энергия, приобретенная электронами, отдается аноду. Благодаря большой энергии электронов анод нагревается до очень

высокой температуры, которая, как правило, выше температуры катода. Мощный поток электронов выбивает из анода электроны, которые также участвуют в создании отрицательного объемного заряда.

Исследования показали, что высокая температура анода и околоанодная область не оказывают существенного влияния на возникновение и условия существования дугового разряда. Задача анода сводится к приему электронного потока из дугового столба.

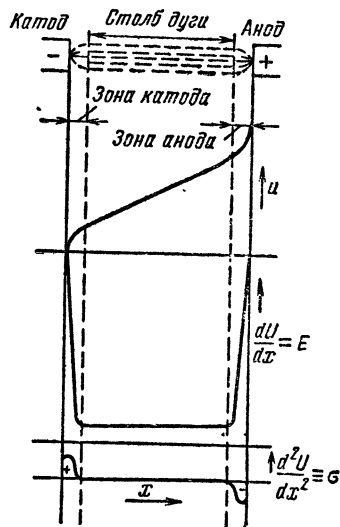


Рис. 4-1. Распределение напряжения, напряженности электрического поля и объемных зарядов в электрической дуге.

Для сильноточной дуги анодное напряжение столь мало, что им можно пренебречь.

Распределение напряжения, напряженности электрического поля (градиента) $E = dU/dx$ и d^2U/dx^2 , пропорционального объемному заряду σ в дуге, представлено на рис. 4-1.

Падение напряжения у катода составляет 10—20 В. Эта величина зависит от материала катода и свойств газа, в котором горит дуга. Околокатодное падение напряжения несколько меньше потенциала ионизации газа.

за счет наличия в околокатодном пространстве паров металла катода, у которых потенциал ионизации значительно ниже.

В области дугового столба положительные и отрицательные объемные заряды уравниваются друг друга и результирующий заряд равен нулю. Градиент напряжения на дуге остается постоянным. Для дуги, свободно горящей в воздухе, этот градиент составляет $(2-3) \cdot 10^3$ В/м.

В дугогасительных устройствах градиент сильно возрастает, достигая $(2-3) \cdot 10^4$ В/м.

Анодное падение напряжения равно 5—10 В. При больших токах анодное напряжение уменьшается, в то

Время как околокатодное напряжение остается постоянным.

В некоторых аппаратах низкого напряжения длина дуги невелика. Падение напряжения на столбе дуги мало по сравнению с суммой падения напряжения у катода и анода. Такие дуги называются короткими. В короткой дуге условия гашения в значительной степени определяются процессами, происходящими у электродов. Здесь большую роль играет отвод тепла от дуги электродами.

В аппаратах высокого напряжения падение напряжения на столбе дуги значительно больше, чем околоэлектродные падения напряжения. Условия существования такой дуги определяются процессами в столбе дуги. Такие дуги называются длинными. При рассмотрении длинных дуг падением напряжения у электродов можно пренебречь.

4-2. Дуга постоянного тока

а) Статическая вольт-амперная характеристика. Важнейшей характеристикой дуги является зависимость напряжения на ней от величины тока. Эта характеристика называется вольт-амперной. С ростом тока i увеличивается температура дуги, усиливается термическая ионизация, возрастает число ионизированных частиц в разряде и падает электрическое сопротивление дуги r_d .

Напряжение на дуге равно ir_d . При увеличении тока сопротивление дуги уменьшается так резко, что напряжение на дуге падает, несмотря на то, что ток в цепи возрастает. Каждому значению тока в установившемся режиме соответствует свой динамический баланс числа заряженных частиц. При большем значении тока увеличивается количество возникающих зарядов. Однако при этом возрастает число исчезающих зарядов, так что результирующая скорость изменения числа заряженных частиц при новом значении тока равна нулю.

При переходе от одного значения тока к другому тепловое состояние дуги не изменяется мгновенно. Дуговой промежуток обладает тепловой инерцией. Если ток изменяется во времени медленно, то тепловая инерция разряда не сказывается. Каждому значению тока соответствует однозначное значение сопротивления дуги или напряжения на ней.

Зависимость напряжения на дуге от тока при медленном его изменении называется статической вольт-амперной характеристикой дуги.

Статическая характеристика дуги зависит от расстояния между электродами (длины дуги), материала электродов и параметров среды, в которой горит дуга. Напряжение на дуге u_d можно рассматривать как сумму околоэлектродных падений напряжения $u_э$ и падения напряжения в столбе дуги:

$$u_d = u_э + El, \quad (4-5)$$

где E — напряженность электрического поля в столбе дуги;
 l — ее длина.

Величина E зависит от тока и условий, в которых горит дуга. Статические вольт-амперные характеристики дуги имеют вид кривых, изображенных на рис. 4-2. Чем больше длина дуги, тем выше лежит ее статическая вольт-амперная характеристика. С ростом давления среды, в которой горит дуга, также увеличивается напряженность E и поднимается вольт-амперная характеристика аналогично рис. 4-2.

Охлаждение дуги существенно влияет на эту характеристику. Чем интенсивнее охлаждение дуги, тем больше от нее отводится мощность. При этом должна возрасти мощность, выделяемая дугой. При заданном токе это возможно за счет увеличения напряжения на дуге. Таким образом, с ростом охлаждения вольт-амперная характеристика поднимается. Этим широко пользуются в дугогасительных устройствах аппаратов.

б) Условия стабильного горения и гашения дуги. Рассмотрим баланс напряжений в цепи (рис. 4-3, а) при дуге, имеющей неизменную длину:

$$U = iR + L \frac{di}{dt} + u_d. \quad (4-6)$$

Очевидно, что стационарным режимом будет такой, при котором ток в цепи не меняется, т. е. $di/dt=0$.

На рис. 4-3, б совместно с вольт-амперной характеристикой дуги построена наклонная прямая $U=iR$.

Для тока i отрезок ab в масштабе чертежа равен напряжению на дуге, отрезок cd — падению напряжения на резисторе R и отрезок bc соответствует Ldi/dt . Оче-

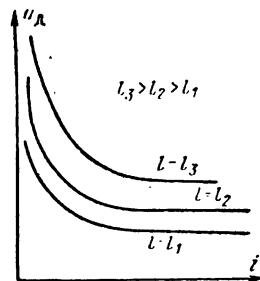


Рис. 4-2. Вольт-амперные характеристики дуги при различной длине.

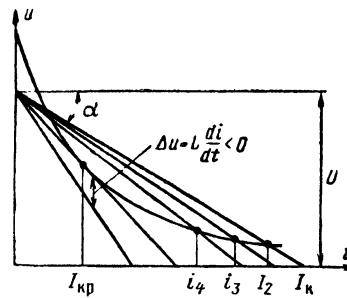


Рис. 4-4. Ток в цепи при различных сопротивлениях R и наличии дуги.

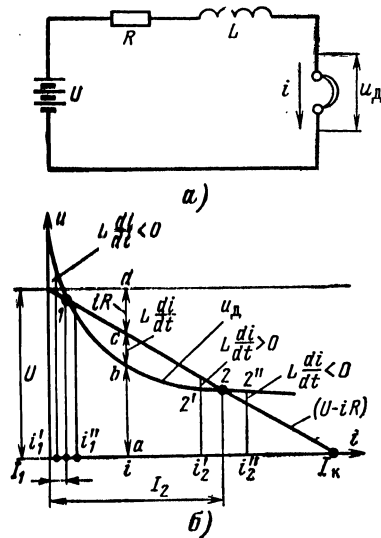


Рис. 4-3. Баланс напряжений в электрической цепи с дугой.

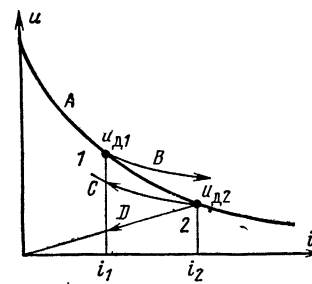


Рис. 4-5. Статическая и динамическая вольт-амперные характеристики дуги.

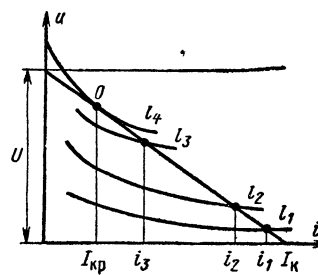


Рис. 4-6. Процесс отключения при переменной длине дуги.

видно, что в точках 1 и 2 $L di/dt = 0$. В этих точках возможен стационарный режим. Рассмотрим более подробно равновесие напряжений вблизи этих точек. Если по каким-либо причинам напряжение источника питания снизится, то точка равновесного состояния перейдет в 2', при этом величина тока уменьшится до значения i_2' , определяемого пересечением вольт-амперной характеристики с прямой $U - iR$. Пусть теперь напряжение источника восстановится до прежней величины U .

Для тока i_2' отрезок $U - iR > u_d$, поэтому в этой точке $L di/dt > 0$. Таким образом, при токе i_2' на индуктивности возникает положительное напряжение $L di/dt$, которое увеличивает ток (производная положительна у растущей во времени величины).

Процесс будет продолжаться до тех пор, пока напряжение $L di/dt$ не станет равным нулю, т. е. мы попадем в точку 2.

Пусть по каким-либо причинам, например из-за роста напряжения источника, ток станет равным $i_2'' > I_2$. Если напряжение вернется к старому значению, то возникает напряжение $L di/dt < 0$. При этом ток i_2'' будет уменьшаться, пока не станет равным току I_2 . Точка 2 является точкой устойчивого равновесия: при выходе из нее возникают процессы, которые возвращают состояние цепи снова в эту точку.

Теперь рассмотрим процесс изменения тока около точки 1. Пусть ток в цепи стал равным $i_1' < I_1$. Очевидно, в этом случае возникнет напряжение $L di/dt < 0$, и ток в цепи будет убывать до тех пор, пока дуга не погаснет. Если ток в цепи стал равным $i_1'' > I_1$, то возникнет напряжение $L di/dt$ положительного знака. Ток будет возрастать до значения I_2 .

Таким образом, точка 1 является точкой неустойчивого равновесия: при выходе из нее ток в цепи либо становится равным I_2 , либо дуга гаснет и ток становится равным нулю.

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

$$u_d > U - iR. \quad (4-7)$$

Это возможно либо за счет поднятия вольт-амперной характеристики, либо за счет увеличения сопротивления цепи.

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

При замкнутых контактах дуга отсутствует, и ток в цепи равен $I_k = U/R$. При разведении контактов между ними возникнет дуга с током I_2 . Если длина дуги и напряжение источника неизменны, то при увеличении сопротивления ток в цепи будет уменьшаться, принимая значения $i_3, i_4, I_{кр}$ (рис 4-4). При дальнейшем возрастании сопротивления соблюдается неравенство $u_d > U - iR$, т. е. создаются условия для гашения дуги.

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

Если при неизменном значении тока цепи I_k увеличить напряжение питания U или при неизменном значении напряжения U увеличить ток цепи I_k , то прямая $U - iR$ будет проходить выше. Тогда для соблюдения условий гашения дуги (4-7) необходимо поднять вольт-амперную характеристику дуги.

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

Анализ рис. 4-4 показывает, что за счет изменения сопротивления R можно снять статическую характеристику только при токах до $I_{кр}$. Для того чтобы снять эту зависимость при меньших токах, необходимо увеличить напряжение источника питания.

Определим длительность t_d горения дуги. Обозначим $|L di/dt|$ через Δu :

$$\Delta u = |L di/dt|.$$

Произведя интегрирование, получим:

$$t_d = L \int_{I_k}^0 \frac{di}{\Delta u}.$$

Таким образом, чем больше Δu , тем меньше длительность горения дуги, что является крайне желательным. Но увеличение Δu ведет к росту напряжения на контактах в момент гашения дуги.

в) Перенапряжения при отключении дуги постоянного тока. Напряжение на контактах в момент нуля тока называется напряжением гашения дуги. При $i=0$ уравнение (4-6) имеет вид:

$$U = L \frac{di}{dt} + u_{\text{гаш}}; \quad (4-8)$$

$$u_{\text{гаш}} = U - L \frac{di}{dt}. \quad (4-9)$$

Но так как $L \frac{di}{dt} < 0$, то можно написать:

$$u_{\text{гаш}} = U + \left| L \frac{di}{dt} \right|_{i=0}. \quad (4-10)$$

Таким образом, в момент гашения напряжение на контактах равно напряжению источника плюс модуль напряжения на индуктивности. Увеличение напряжения на контактах относительно напряжения источника питания называется перенапряжением. Чем больше индуктивность, чем больше скорость спада тока в момент гашения, тем больше перенапряжение. Скорость спада тока di/dt зависит от скорости роста сопротивления дугового промежутка, от скорости его деионизации. Поэтому быстродействующие аппараты, отключающие цепь постоянного тока за сотые доли секунды, могут давать большие перенапряжения.

Следует отметить, что на скорость спада тока оказывает влияние индуктивность цепи. Чем больше ее величина, тем меньше скорость спада тока при прочих равных условиях (см. рис. 4-7). Для характеристики перенапряжения вводится понятие коэффициента перенапряжений

$$k = \frac{u_{\text{гаш}}}{U} = 1 + \frac{\left| L \frac{di}{dt} \right|_{i=0}}{U}.$$

Напряжение, возникающее на контактах, может в десятки раз превышать напряжение источника. При этом изоляция самого аппарата и отключаемой цепи подвергается опасным перегрузкам [Л.4-4].

Для уменьшения длительности горения дуги желательно, чтобы значение $L di/dt$ при всех токах были большими. Для снижения перенапряжений желательно, что-

бы значения $L di/dt$ были малыми. В связи с этим в дугогасительных устройствах постоянного тока стремятся иметь большие значения $L di/dt$ при больших токах и малые в области нуля тока [Л.4-2].

г) **Динамическая вольт-амперная характеристика дуги.** Если ток в цепи изменяется медленно, то току i_1 соответствует сопротивление дуги $r_{д1}$, а большему току i_2 соответствует меньшее сопротивление $r_{д2}$ (см. статическую характеристику дуги — кривая A на рис. 4-5).

В реальных установках ток может меняться довольно быстро. Вследствие тепловой инерции дугового столба изменение сопротивления дуги отстает от изменения тока. *Зависимость напряжения на дуге от тока при быстром его изменении называется динамической вольт-амперной характеристикой.*

При возрастании тока динамическая характеристика идет выше статической (кривая B на рис. 4-5), так как при быстром росте тока сопротивление дуги падает медленнее, чем растет ток. При уменьшении — ниже, поскольку в этом режиме сопротивление дуги меньше, чем при медленном изменении тока (кривая C на рис. 4-5).

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

В реальном аппарате после размыкания контактов расстояние между ними меняется и дуга имеет переменную длину. В этом случае процесс отключения можно представить следующим образом. Разобьем путь, который проходит контакт, на участки и нанесем статические вольт-амперные характеристики, соответствующие концу каждого участка (рис. 4-6). Если индуктивность цепи мала, то по мере увеличения длины дуги ток будет быстро принимать значения, соответствующие точке пересечения статических характеристик с прямой $U = iR$.

В точке O ток достигнет критического значения. При дальнейшем увеличении длины дуги наступят условия для гашения.

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

В цепи с большой индуктивностью спадание тока из-за большой величины индуктивности замедляется; вольт-амперная характеристика дуги сразу же после расхождения контактов поднимается выше прямой $U=iR$. В момент гашения дуги возможны большие перенапряжения [Л.4-4].

Типичные осциллограммы отключения цепей с малой и большой индуктивностью приведены на рис. 4-7.

При отключении индуктивной цепи процесс гашения затягивается и появляется перенапряжение $\left| L \frac{di}{dt} \right|_{i=0}$ (рис. 4-7, а).

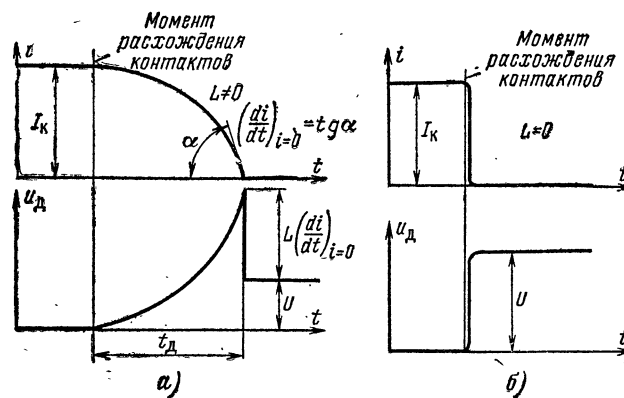


Рис. 4-7. Процесс отключения в цепи постоянного тока, содержащей большую и малую индуктивность.

При отключении активной нагрузки гашение происходит быстро, никаких перенапряжений не возникает (рис. 4-7, б).

д) Энергия, выделяемая в дуге при гашении. Умножив обе части (4-6) на $i dt$ и проинтегрировав полученное выражение, будем иметь:

$$\int_0^t ui dt = \int_0^t i^2 R dt + \int_0^t u_d i dt + \int_{I_K}^0 Li di. \quad (4-11)$$

После преобразования (4-11) получим:

$$A_d = \int_0^t u_d i dt = \int_0^t u i dt - \int_0^t i^2 R dt + \frac{L i_k^2}{2}, \quad (4-12)$$

где A_d — энергия, выделенная в дуге в процессе гашения;

t — время гашения дуги;

i_k — ток в цепи при замкнутых контактах;

L — индуктивность цепи.

Анализ (4-12) показывает, что в дуговом промежутке выделяется вся энергия, полученная от источника питания за вычетом потерь в активном сопротивлении R , и вся электромагнитная энергия, накопленная в отключаемой цепи. Результаты опытов показывают [Л. 3-3], что для всех аппаратов с дугогасительными устройствами энергия, поступающая в дугу от источника питания, составляет всего 3—5% энергии дуги. Остальная часть, 97—95%, приходится на электромагнитную энергию отключаемого контура.

Энергия, выделяемая в дуге, тратится частично на нагревание разряда и частично отдается окружающему пространству. Для гашения дуги необходимо, чтобы температура разряда уменьшалась, т. е. чтобы энергетический баланс дуги был отрицательным: количество энергии, подводимой к дуге, должно быть меньше количества тепла, отводимого от нее.

При отключении сильно индуктивной цепи электромагнитную энергию контура, выделяемую в дуге, необходимо отвести от нее за счет охлаждения. В связи с этим чем больше индуктивность цепи и величина отключаемого тока, тем труднее отключить цепь.

4-3. Электрическая дуга в магнитном поле

Электрическая дуга является газообразным проводником тока. На этот проводник, так же как на металлический, действует магнитное поле, создавая силу, пропорциональную индукции поля и току в дуге. Магнитное поле, действуя на дугу, увеличивает ее длину и перемещает элементы дуги в пространстве.

Поперечное перемещение элементов дуги создает интенсивное охлаждение, что приводит к повышению градиента напряжения на столбе дуги.

При движении дуги в среде газа с большой скоростью возникает расслоение дуги на отдельные параллельные волокна. Чем длиннее дуга, тем сильнее происходит расслоение дуги.

Дуга является чрезвычайно подвижным проводником. Известно (§ 1-2), что на токоведущую часть действуют такие силы, которые стремятся увеличить электромагнитную энергию контура. Поскольку энергия пропорциональна индуктивности, то дуга под действием своего собственного поля стремится образовывать витки, петли, так как при этом возрастает индуктивность цепи. Эта способность дуги тем сильнее, чем больше ее длина.

Движущаяся в воздухе дуга преодолевает аэродинамическое сопротивление воздуха, которое зависит от диаметра дуги, расстояния между электродами, плотности газа и скорости движения. Опыт показывает, что во всех случаях в равномерном магнитном поле дуга движется с постоянной скоростью. Следовательно, электродинамическая сила уравнивается силой аэродинамического сопротивления [Л.3-3].

С целью создания эффективного охлаждения (§ 19-8) дуга с помощью магнитного поля втягивается в узкую (диаметр дуги больше ширины щели) щель между стенками из дугостойкого материала с высокой теплопроводностью. Из-за увеличения теплоотдачи стенкам щели градиент напряжения в столбе дуги при наличии узкой щели значительно выше, чем у дуги, свободно перемещающейся между электродами. Это дает возможность сократить необходимую для гашения длину и время гашения [Л.7-2].

4-4. Процессы горения и гашения дуги переменного тока } при отключении активной цепи

Рассмотрим цепь, у которой $\cos \varphi \approx 1$. Пусть контакты аппарата разошлись в точке a (рис. 4-8). Между ними загорается дуга. К концу полупериода из-за уменьшения тока и воздействия дугогасительного устройства наблюдается увеличение сопротивления дугового промежутка и подъем напряжения на дуге. При подходе тока к нулю к дуге подводится малая мощность, температура ее уменьшается, что, с одной стороны, ведет к замедлению термической ионизации, с другой — способствует деионизации. Все это приводит к погасанию дуги. Напря-

жение, при котором дуга гаснет, называется напряжением или пиком гашения U_r . Резкий подъем напряжения к концу полупериода ведет к тому, что ток в цепи обрывается до своего естественного прохождения через нуль.

После погасания дуги дуговой промежуток не превращается мгновенно в изоляционный, поскольку температура не снижается до нуля. В процессе гашения дуги число заряженных частиц в области дугового промежутка

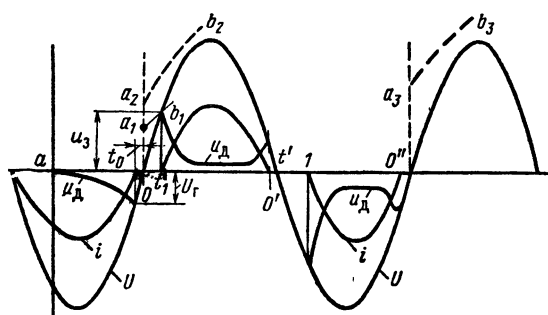


Рис. 4-8. Процесс отключения активной цепи переменного тока.

ка уменьшается; после гашения дуги сопротивление промежутка резко возрастает. При этом возрастает и электрическая прочность промежутка, т. е. такое напряжение, при котором происходит его электрический пробой.

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

Электрическая прочность промежутка начинает нарастать не с нуля, а со значения, соответствующего точке a_1 (начальная прочность промежутка). Начальная прочность и дальнейший рост прочности зависят от свойств дугогасящего устройства: чем эффективней оно действует, тем больше начальная прочность, тем круче идет нарастание этой прочности.

Рассмотрим случай, когда электрическая прочность промежутка восстанавливается по кривой $a_1 b_1$. В момент t_1 напряжение на промежутке пересекает кривую прочности. В этой точке дуга загорается вновь. Напряжение

u_z называется напряжением зажигания. В связи с тем, что ток в первой половине полуволны синусоиды возрастает, напряжение на дуге уменьшается. После прохождения током максимального значения напряжение на дуге начинает возрастать, поскольку ток уменьшается. Таким образом, кривая напряжения на дуге имеет седлообразную форму. При больших токах из-за сильной термической ионизации почти на протяжении всего полупериода горения дуги напряжение не изменяется. Только в начале и конце полупериода появляются пики зажигания и гашения.

В точке O' дуга вновь гаснет и происходят процессы, аналогичные описанным ранее. В момент подхода тока к нулю в точке O' дуга имеет более высокую температуру по сравнению с температурой к концу бестоковой паузы t_1 . Поэтому всегда пик гашения дуги меньше пика зажигания.

К моменту O' вследствие расхождения контактов длина дуги возрастает, при этом увеличивается интенсивность воздействия дугогасительного устройства (более эффективный отвод тепла).

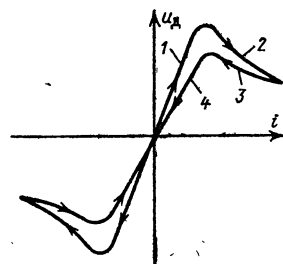


Рис. 4-9. Вольт-амперная характеристика дуги при переменном токе.

В результате и начальная прочность промежутка и крутизна ее нарастания в этом нуле больше, чем в предыдущем. Поэтому пауза тока t_1' увеличивается по сравнению с t_1 . Однако и в этом нуле гашение не произошло. Дуга загорелась вновь. Из-за возросшей длины дуги вследствие расхождения контактов напряжение на дуге в этом полупериоде больше, чем в предыдущем. Окончательное гашение произошло в точке O'' . Для случая, когда

электрическая прочность промежутка растет по кривой a_2b_2 , гашение дуги происходит при первом же прохождении тока через нуль.

Поскольку даже при частоте 50 Гц ток в дуге меняется достаточно быстро, то мы имеем здесь дело с динамической вольт-амперной характеристикой (рис. 4-9). Участки 1 и 2 относятся к первой половине полупериода, 3 и 4 — ко второй.

4-5. Отключение индуктивной цепи на переменном токе. Процесс восстановления напряжения

Рассмотрим теперь процесс отключения индуктивной цепи ($\cos \varphi \leq 0,15$), схема замещения которой представлена на рис. 4-10. Здесь L — индуктивность, соответствующая реактивному сопротивлению короткого замыкания источника $X_k = \omega L$; R — активное сопротивление цепи; C_3 — эквивалентная емкость на зажимах выключателя. Эта емкость определяется емкостью источников питания, емкостью различных электрических аппаратов и шин относительно земли C_3 . Обмотки генераторов, трансформаторов, реакторов имеют распределенную емкость. Для упрощения расчетов от распределенной емкости переходят к сосредоточенной. Величина этой емкости такова, что вместе с индуктивностью L она дает частоту f_0 , равную частоте первой гармоники реальной обмотки [Л. 4-5].

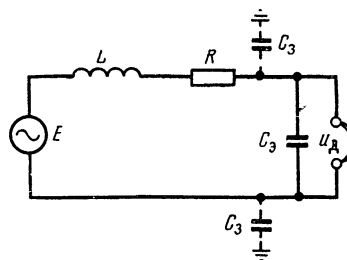


Рис. 4-10. Схема замещения цепи короткого замыкания при отключении.

Индуктивность обмотки L при собственной частоте f_0 уменьшается по сравнению с L при $f = 50$ Гц за счет разматывающего действия массивных проводников обмоток генераторов, трансформаторов и другого оборудования при высокой частоте f_0 .

Положим, что напряжение на дуге во время ее горения очень мало и им можно пренебречь (сопротивление дуги равно нулю) и что после гашения дуги сопротивление ее стало сразу бесконечно большим. Дуга с такой характеристикой называется идеализированной. Тогда процесс изменения напряжения на контактах можно представить так: при горении дуги емкость C_3 замкнута и напряжение на ней равно нулю. После прохода тока через нуль дуга гаснет и емкость C_3 размыкается. Начинается заряд емкости C_3 от источника через индуктивность L и сопротивление R . Ввиду того, что $\cos \varphi$ близок к нулю, можно считать, что мгновенное значение э. д. с.

источника в момент прохода тока через нуль (мгновенное возвращающееся напряжение) равно амплитуде э. д. с. E (рис. 4-12, а).

Так как длительность переходного процесса изменения напряжения при гашении во много раз меньше времени полупериода изменения э. д. с., можно считать, что заряд емкости C через индуктивность L и сопротивление R происходит при неизменном значении э. д. с., равном E . Напряжение на емкости для рассматриваемой задачи согласно [Л. 4-2] изменяется по закону:

$$u = E (1 - e^{-pt} \cos \omega_0 t), \quad (4-13)$$

где u — восстанавливающееся напряжение;
 E — э. д. с. источника в момент нуля тока;
 p — коэффициент затухания, равный $R/2L$;
 ω_0 — собственная угловая частота контура R ; L ; C ,
 практически равная $1/\sqrt{LC}$;
 t — время.

Зависимость напряжения от времени представлена на рис. 4-11.

Процесс изменения напряжения на промежутке после прохождения тока через нуль называется восстановлением напряжения.

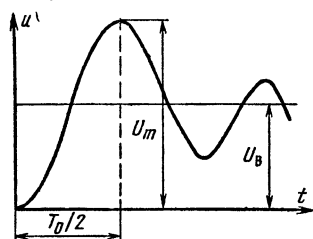


Рис. 4-11. К определению средней скорости восстановления напряжения.

Мгновенное значение напряжения на контактах во время этого процесса называется восстанавливающимся напряжением. Это напряжение стремится пробить междуконтактный промежуток, который в это время восстанавливает свою электрическую прочность. Если в любой момент времени после погасания дуги кривая роста

электрической прочности $u_{пр}$ идет выше кривой восстанавливающегося напряжения u , то дуга погасает окончательно (рис. 4-12, а). Если кривые пересекаются, то дуга вновь загорается в точке А (рис. 4-12, б).

Следует указать, что после погасания реальной дуги через междуконтактный промежуток проходит оста-

точный ток, определяемый из уравнения

$$i_{\text{ост}} = u/r_d,$$

где u — восстанавливающееся напряжение;
 r_d — сопротивление дугового промежутка.

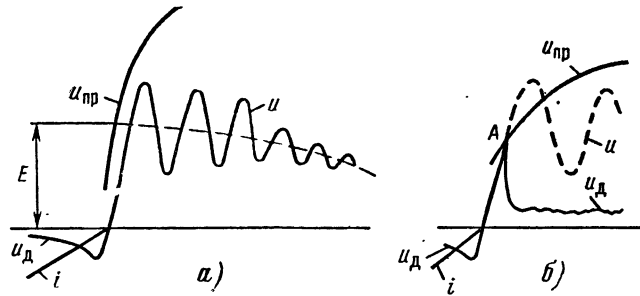


Рис. 4-12. Условия гашения и зажигания дуги переменного тока.

Если количество тепла, выделяемое в дуге этим током, меньше, чем отводится за счет охлаждения дуги, то температура дугового столба продолжает снижаться и остаточный ток уменьшается до нуля. Происходит окончательное гашение дуги. Если остаточный ток ведет к повышению температуры промежутка, то $i_{\text{ост}}$ растет, что в конечном счете приводит к повторному зажиганию дуги.

4-6. Скорость восстановления напряжения.

Собственная частота отключаемой цепи.

Зависимость скорости и частоты от параметров оборудования и схемы короткого замыкания

При гашении дуги переменного тока как низкого, так и высокого напряжения одним из решающих факторов является восстанавливающееся напряжение. Для оценки кривой восстанавливающегося напряжения вводится понятие скорости нарастания этого напряжения.

Для схемы рис. 4-10 средняя скорость восстанавливающегося напряжения (В/с) приближенно, если пренебречь затуханием, может быть найдена по формуле

$$v_{\text{ср}} = \frac{du}{dt_{\text{ср}}} = \frac{2U_{\text{в}}}{T_0/2} = 4 \frac{U_{\text{в}}}{T_0} = 4U_{\text{в}} f_0, \quad (4-14)$$

где $U_{\text{в}}$ — мгновенное возвращающееся напряжение (э. д. с. источника) в момент нуля тока;
 $T_0/2$ — полупериод собственных колебаний, в течение которого напряжение достигает максимального пика, равного $2 U_{\text{в}}$;
 f_0 — собственная частота колебаний;
 $v_{\text{ср}}$ — средняя скорость восстановления напряжения.

Ввиду того, что скорость нарастания обычно очень велика, она измеряется в вольтах за 1 мкс.

В настоящее время восстанавливающееся напряжение часто оценивается собственной частотой f_0 и коэффициентом пика $k_{\text{п}}$, т. е. отношением величины максимального пика к возвращающемуся напряжению промышленной частоты:

$$k_{\text{п}} = \frac{U_{\text{м}}}{U_{\text{в}}} = \frac{U_{\text{в}} \left(1 - e^{-\rho \frac{\pi}{\omega_0} \cos \omega_0 \frac{\pi}{\omega_0}} \right)}{U_{\text{в}}} = 1 + e^{-\frac{\rho \pi}{\omega_0}}. \quad (4-15)$$

Очевидно, что чем больше собственная частота, чем больше возвращающееся напряжение промышленной частоты, тем выше скорость восстановления напряжения. С ростом скорости восстановления напряжения увеличиваются требования к скорости нарастания электрической прочности междуконтактного промежутка. В противном случае длительность горения дуги увеличивается, либо вообще аппарат может не отключить цепь.

Собственная частота f_0 определяется индуктивностью L и эквивалентной емкостью $C_{\text{э}}$, которые зависят от мощности короткого замыкания цепи, номинального напряжения, номинальной мощности установки, конструктивного использования элементов [Л. 4-2, 3-2, 19-1].

Индуктивность L и эквивалентная емкость $C_{\text{э}}$, как правило, растут с увеличением напряжения, а потому собственная частота f_0 с ростом напряжения уменьшается. Однако скорость восстановления напряжения, пропорциональная номинальному напряжению сети (4-14), может быть достаточно высокой. Необходимо отметить, что мгновенное значение возвращающегося напряжения $U_{\text{в}}$ зависит от угла сдвига фаз $\varphi_{\text{к}}$ при коротком замыкании, а именно:

$$U_{\text{в}} = E \sin \varphi_{\text{к}}.$$

Для чисто индуктивной цепи $\varphi_k = \pi/2$ и $U_b = E$.

Для чисто активной цепи $\varphi_k = 0$ и $U_b = 0$.

После прохождения тока через нуль в активной цепи напряжение на промежутке меняется по синусоидальному закону, определяемому э. д. с. источника.

Таким образом, отключение чисто активной цепи происходит значительно легче, чем индуктивной.

В трехфазных установках восстанавливающееся напряжение зависит от схемы короткого замыкания. При отключении трехфазного к. з. дуга не гаснет одновременно во всех трех полюсах аппарата из-за сдвига токов по фазе на 120° . Вначале дуга гаснет в одной из фаз, после чего отключается двухфазное к. з. рис. 4-21. Наиболее тяжелый случай представляет собой отключение трехфазного к. з. с заземлением нуля только в одной точке или совсем без заземления. Самое большое возвращающееся напряжение прикладывается к полюсу аппарата, который первым пытается гасить дугу.

В этом случае возвращающееся напряжение промышленной частоты равно:

$$U_b = \frac{U_n}{\sqrt{3}} \sqrt{2 \cdot 1,5}.$$

Рекомендации по расчету собственных частот и коэффициентов пика даны в [Л. 4-2, 19-1].

Особенно тяжелые условия восстановления напряжения наблюдаются при отключении короткого замыкания на воздушной линии

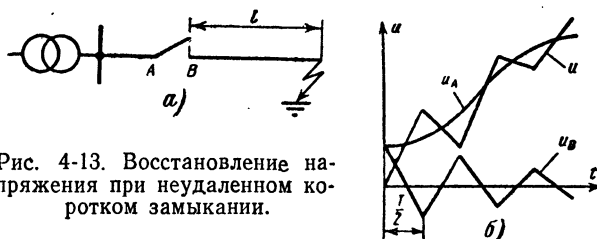


Рис. 4-13. Восстановление напряжения при неудаленном коротком замыкании.

вблизи мощной подстанции (расстояние от сборных шин несколько сотен метров — несколько километров) (рис. 4-13).

Восстанавливающееся напряжение u складывается из напряжения u_A на зажиме А и напряжении u_B на зажиме В. Из-за небольшой длины линии l напряжение u_B изменяется с большой частотой. Это создает высокую скорость восстановления напряжения в начале процесса, которая (в В/мкс) может быть рассчитана по формуле [Л. 4-2]

$$\frac{du}{dt} = 0,22 I,$$

где I — ток короткого замыкания, А.

К неудаленным коротким замыканиям очень чувствительны воздушные выключатели (§ 19-5), у которых в первые моменты времени после прохода тока через нуль электрическая прочность восстанавливается медленно.

4-7. Облегчение отключения цепи с помощью шунтов

Возрастание скорости восстановления напряжения в современных установках утяжеляет работу отключающих аппаратов, повышает требования, предъявляемые к ним. Для того чтобы удовлетворить этим требованиям, можно идти двумя путями: либо увеличивать скорость нарастания электрической прочности в дугогасящем устройстве, либо снижать искусственно скорость восстановления напряжения. Первый путь ведет очень часто к громоздким и дорогим решениям. Второй путь позволяет получить более экономичное решение и в настоящее время широко используется. Для снижения скорости восстановления напряжения на промежутке применяются низкоомные и высокоомные шунты.

Рассмотрим принцип действия низкоомного шунта (рис. 4-14). Выключающий аппарат имеет два разрыва. Разрыв 1 шунтирован резистором $R_{ш}$. Величина его сопротивления выбирается таким образом, чтобы колебательный процесс восстановления напряжения перейти в аperiodический, для чего $R_{ш} < \frac{1}{2} \sqrt{L/C_3}$. Обычно сопротивление $R_{ш}$ так мало, что влиянием емкости C_3 можно пренебречь. При этом допущении

$$u = E \left(1 - e^{-\frac{R_{ш}}{L} t} \right). \quad (4-16)$$

Процесс восстановления напряжения при наличии шунта и без него показан на рис. 4-15.

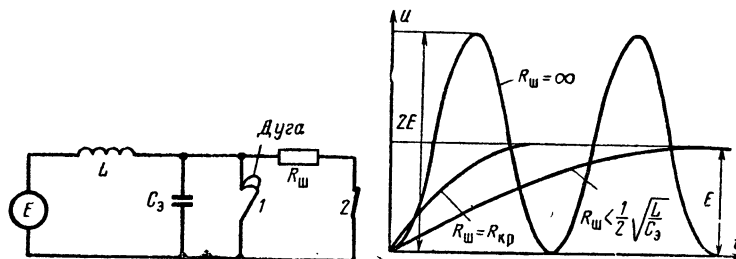


Рис. 4-14. Применение низкоомного шунта для облегчения гашения дуги.

Рис. 4-15. Процесс восстановления напряжения при наличии шунта и без него.

Наибольшая скорость (В/мкс) имеет место при $t=0$:

$$\left| \frac{du}{dt} \right|_{t=0} = \frac{ER_{ш}}{L} \cdot 10^{-6}. \quad (4-17)$$

Применением шунтирующего сопротивления малой величины можно настолько снизить скорость восстановления напряжения, чтобы гашение дуги в первом разрыве практически не зависело от собственной частоты сети. Возможный максимальный пик восстанавливающегося напряжения при этом также значительно уменьшается (примерно в 2 раза). Таким образом, для снижения скорости восстановления напряжения на первом разрыве желательно иметь возможно малое значение $R_{ш}$.

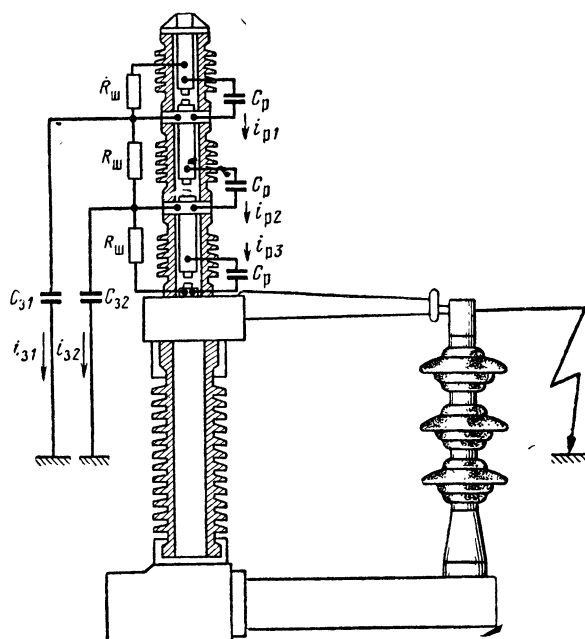


Рис. 4-16. Выравнивание напряжения по разрывам с помощью емкостного делителя.

Как правило, дуга в разрыве 1 гаснет при первом прохождении тока через нуль. После этого расходятся контакты 2 и между ними горит дуга. Сопротивление $R_{ш}$ облегчает работу и этого разрыва, так как введение в цепь активного сопротивления $R_{ш}$ уменьшает ток и сдвиг фаз между током и э. д. с. источника, что снижает восстанавливающееся напряжение промышленной частоты.

Для облегчения работы второго разрыва желательно иметь сопротивление большей величины; выбор $R_{ш}$ приведен в [Л. 4-7—4-9]. Обычно $R_{ш}$ определяется условиями работы разрыва 1.

В настоящее время шунтирующие сопротивления малой величины применяются в выключателях на все классы напряжения, особенно при напряжениях до 35 кВ, где токи отключения достигают больших значений.

При напряжении более 35 кВ применяется многократный разрыв. Восстанавливающееся напряжение промышленной частоты, проходящее на один разрыв, уменьшается пропорционально числу разрывов. Соответственно уменьшается и скорость восстановления напряжения. Емкостное сопротивление между всеми контактами практически одинаково ($1/\omega C_p$), но токи, текущие через разрывы, различны ввиду наличия емкостей элементов аппаратов относительно земли C_3 (рис. 4-16). Это создает неравномерное распределение напряжения по разрывам, причем чем больше число разрывов, тем больше неравномерность распределения напряжения.

Для выравнивания напряжения по разрывам применяют емкостные или активные шунты [Л. 4-10].

Если $C_{ш} \geq 20 C_3$, то токами, текущими через паразитные емкости на землю, можно пренебречь. При этом напряжение делится поровну между разрывами. Активное сопротивление выбирается таким образом, чтобы

$$R_{ш} \leq 1/20\omega_0 C_3,$$

где ω_0 — угловая частота восстанавливающегося напряжения;
 C_3 — паразитная емкость на землю.

4-8. Отключение короткой дуги переменного тока

К моменту подхода тока к нулю промежуток между электродами еще заполнен сильно ионизированным газом. Под действием восстанавливающегося напряжения образуется электрическое поле, которое действует на ионы и электроны.

Из-за малой массы электронов их скорость в электрическом поле примерно в 2000 раз больше скорости положительных ионов.

Электроны, обладающие большой скоростью, быстро уходят из зоны катода, и около катода появляется положительный объемный заряд.

Благодаря высокой проводимости остальной части промежутка, в которой положительные и отрицательные ионы взаимно уравниваются, почти все напряжение, приложенное к электродам, ляжет на область положительного объемного заряда у катода. Здесь возникает очень высокая напряженность поля E (порядка 30 000 кВ/м).

Примерная картина распределения зарядов в объеме, напряженности электрического поля E и напряжения

на промежутке u представлена на рис. 4-17. На этом рисунке d — толщина слоя положительного объемного заряда, расположенного у катода, U_n — напряжение, приложенное к электродам.

Для того чтобы дуга загорелась вновь, необходимо, чтобы из катода было получено соответствующее количество электронов — основных носителей тока в дуге. Если катод не нагрет до температуры, при которой начинается термоэмиссия, то необходимое количество электронов может быть получено только за счет автоэлектронной эмиссии; последняя возможна при напряженности поля порядка 30 000 кВ/м (при медных электродах). Расчеты показывают, что такая напряженность поля получается при напряжении на промежутке 250 В [Л. 4-2]. Если напряжение меньше этой величины, то дуга гаснет.

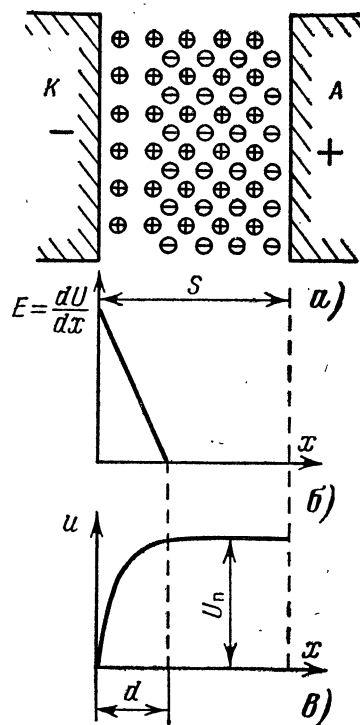


Рис. 4-17. К анализу процессов в «коротком» дуговом промежутке.

В случае сильно нагретых электродов часть электронов с катода получается за счет термоэмиссии. Поэтому напряжение, необходимое для начала разряда, снижается до 160—170 В. Прочность промежутка после прохода тока через нуль сильно зависит от материала электродов. Очень хорошие результаты дает латунь. Прочность, образующаяся у катода при латунных электродах, достигает 320 В [Л. 3-3]. Исследования, проведенные И. С. Таевым [Л. 4-5], показали, что электрическая прочность, возникающая около катода, в значительной степени зависит от нагрева опорной точки дуги.

При холодных электродах эта прочность приближается к указанному выше значению. Такой случай имеет место при небольших токах и быстром перемещении дуги по электродам.

При токах порядка сотен ампер даже при быстром перемещении дуги по электродам из-за термоэлектронной эмиссии прочность па-

дает до 140 В при медных электродах. При токах более 100 А и неподвижных опорных точках дуги прочность снижается до 40—60 В. При токах короткого замыкания она снижается до околоэлектродного падения напряжения (20—30 В).

Описанный выше процесс образования прочности происходит практически мгновенно (0,1 мкс). После этого прочность промежутка растет, так как число зарядов быстро уменьшается из-за рекомбинации ионов и диффузии заряженных частиц в окружающее пространство и к поверхности электродов. Для коротких дуг исключительно большое влияние на процесс деионизации оказывают электроды, причем при меньших расстояниях между электродами электрическая прочность растет быстрее. Близкое расположение электродов способствует снижению температуры газа, что в свою очередь ведет к резкому возрастанию рекомбинации [Л. 4-2].

Явление образования околокатодной прочности было впервые открыто Слепяном [Л. 4-2] и в настоящее время широко используется для гашения дуги в аппаратах низкого напряжения. Если дугу разбить на ряд коротких дуг металлическими электродами, то после прохода тока через нуль образуется мгновенно электрическая прочность, равная сумме всех околокатодных прочностей. Если результирующая прочность больше пика восстанавливающегося напряжения, то дуга гаснет при первом же прохождении тока через нуль. Такое устройство называется деионной решеткой (§ 10-3).

4-9. Особенности отключения цепи с повышенной частотой тока

В связи с широким применением высокочастотной закалки и высокочастотных печей электрическим аппаратам приходится отключать цепи с частотой источника тока до 10 000 Гц при напряжении до 1500 В и токах до 600—1000 А.

Рассмотрим восстанавливающееся напряжение, которое имеет место в этих установках.

При выводе (4-13) мы полагали, что э.д.с. источника в процессе восстановления напряжения постоянна. При источнике питания с частотой 10 000 Гц такого предположения делать нельзя, так как собственная частота рассматриваемых цепей соизмерима с частотой источника. Можно показать, что в этом случае напряжение, восстанавливающееся на контактах выключателя, выражается формулой из [Л. 3-3]:

$$u = E \cos \omega t - E e^{-pt} \cos \omega_0 t, \quad (4-18)$$

где E — амплитуда э. д. с. источника; ω — угловая частота тока источника питания; ω_0 — собственная частота колебаний отключаемой цепи; p — коэффициент затухания собственных колебаний:

$$p = R/2L.$$

Для качественного анализа кривой восстанавливающегося напряжения примем, что $\omega = \omega_0$ (такое соотношение встречается на практике). Тогда (4-18) принимает вид:

$$u = E \cos \omega t (1 - e^{-pt}). \quad (4-19)$$

В кривой восстанавливающегося напряжения можно различать

две составляющие: установившегося режима $e_1 = E \cos \omega t$ и переходного режима $e_2 = -Ee^{-pt} \cos \omega t$. Эти составляющие и результирующая кривая представлены на рис. 4-18, а. Амплитуда восстанавливающегося напряжения возрастает постепенно по мере затухания переходной составляющей e_2 . Максимальная амплитуда восстанавливающегося напряжения равна амплитуде э. д. с. источника.

В процессе отключения чисто активной цепи после погасания дуги на промежутке восстанавливается э. д. с. источника e_1 . Никакой переходной составляющей не возникает (рис. 4-18, б).

Амплитуда напряжения на промежутке появляется через четверть периода источника питания. Если сравнить кривые рис. 4-18, а и б, то видно, что в случае отключения чисто активной цепи условия восстановления напряжения более тяжелые, чем при отключении чисто индуктивной цепи.

Следует отметить, что при частоте 50 Гц к каждому переходу тока через нуль температура дуги спадает на 30—50% максимального значения. Это облегчает условия отключения [Л. 4-2]. При повышенной частоте из-за инерции дугового разряда такого снижения температуры не наблюдается. Это затрудняет гашение дуги. Если частота тока приближается к 10 кГц, то условия гашения дуги переменного тока примерно такие же, как и при постоянном токе [Л. 3-4]. Наиболее эффективным средством гашения дуги при повышенной частоте является применение деионной решетки (§ 4-8, 10-3).

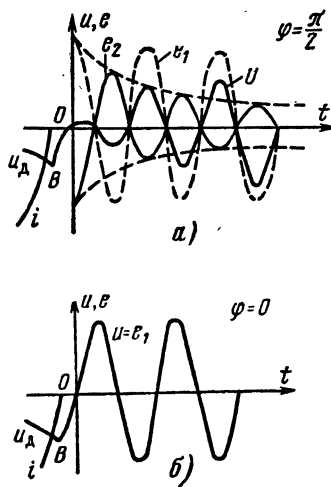


Рис. 4-18. Процесс восстановления напряжения при источнике питания с высокой частотой тока.

4-10. Отключение малых индуктивных токов

Дугогасительная способность воздушных выключателей и автоматов рассчитывается так, чтобы обеспечить гашение дуги с наибольшим током для данного аппарата.

При отключении малых токов из-за эффективной деионизации возможен обрыв (срез) тока до естественного прохождения его через нуль. Аналогичный процесс может происходить и в масляных выключателях.

Срез тока при отключении индуктивной цепи может привести к перенапряжению, опасному для оборудования.

На практике с этим случаем встречаются при отключении тока холостого хода трансформатора или отключении трансформатора, несущего небольшую индуктивную нагрузку.

Упрощенная схема замещения представлена на рис. 4-19, а. При срезе тока электромагнитная энергия, накопленная в индуктивности, переходит в электростатическую:

$$\frac{L_T i_c^2}{2} = \frac{C_T U_c^2}{2}, \quad (4-20)$$

где L_T — индуктивность трансформатора;
 i_c — ток среза;
 C_T — эквивалентная емкость трансформатора;
 U_c — напряжение на трансформаторе при срезе.

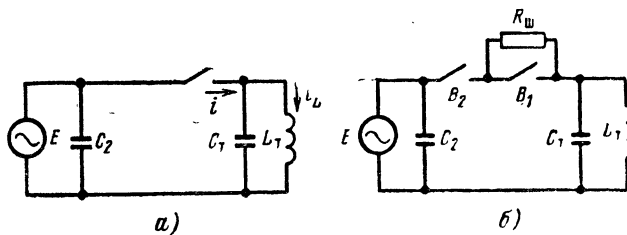


Рис. 4-19. К процессу обрыва тока.

Согласно (4-20) напряжение на трансформаторе U_c при обрыве равно:

$$U_c = i_c \sqrt{\frac{L_T}{C_T}}.$$

Так как C_T небольшая емкость, то U_c может достигать весьма больших значений, могущих привести к пробое изоляции оборудования. Исследования показали, что при отключении малых индуктивных токов перенапряжения могут достигать больших значений (до $4 U_n$ в сетях 110 кВ и до $8 U_n$ в сетях 6 кВ) [Л. 4-6]. Для ограничения перенапряжений контакты аппарата шунтируются резистором, который переводит колебательный процесс изменения напряжения на трансформаторе в аperiodический (рис. 4-19, б). В этом случае выключатель имеет два разрыва, один из которых шунтирован резистором $R_{ш}$. Вначале расходятся контакты B_1 , и резистор $R_{ш}$ через генератор подключается параллельно трансформатору. Электромагнитная энергия переходит в тепловую в этом резисторе. Сопротивление резистора должно быть меньше критического:

$$R_{ш} \leq \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L_T}{C_T}}.$$

С точки зрения уменьшения перенапряжения сопротивление резистора $R_{ш}$ должно быть возможно меньше. Минимальное значение этого сопротивления ограничивается отключающей способностью второго разрыва B_2 и обычно берется несколько меньше критического. Подробно вопрос переходных процессов и выбор $R_{ш}$ рассмотрены в [Л. 4-2].

4-11. Отключение емкостных токов конденсаторных батарей и длинных линий

При отключении конденсатора часто наблюдаются весьма большие перенапряжения.

Рассмотрим процесс отключения для схемы рис. 4-20, а. Зависимости токов и напряжений во времени даны на рис. 4-20, б. Поскольку нагрузка чисто емкостная, ток в цепи опережает напряжение источника на 90° (рис. 4-20, в).

Пусть контакты разошлись в точке 1 и дуга погасла в точке 2. В этот момент напряжение на конденсаторе достигает амплитудного значения напряжения источника. Напряжение на шинах (левый за-

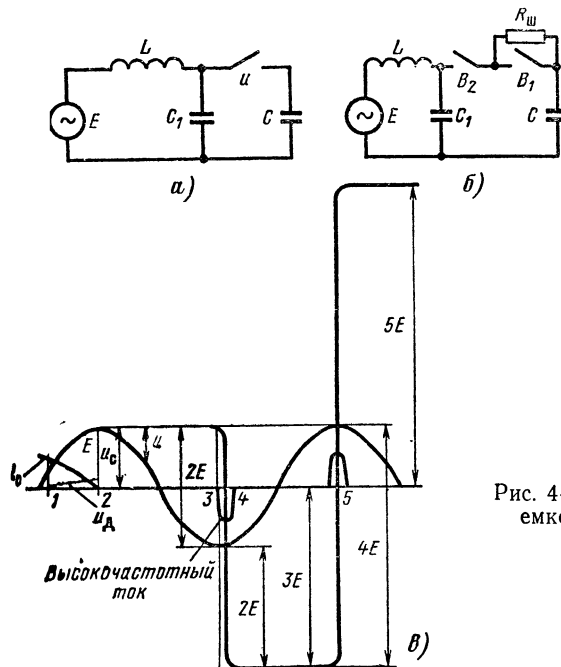


Рис. 4-20. Отключение емкостного тока.

жим выключателя) также равно напряжению источника, так что разность потенциалов на контактах выключателя u практически равна нулю. Если пренебречь сопротивлением утечки конденсатора, то после гашения можно считать, что напряжение на конденсаторе постоянно и равно U_c .

Напряжение на шинах меняется по закону $E \cos \omega t$. Разность потенциалов на зажимах выключателя равна:

$$u = E - E \cos \omega t = E(1 - \cos \omega t).$$

По прошествии полупериода промышленной частоты напряжение на промежутке достигает значения $2E$. Если прочность междуконтактного промежутка больше, чем напряжение $2E$, то на этом процесс отключения заканчивается.

Напряжение, появляющееся на контактах в установках высокого напряжения, может пробить промежуток. Рассмотрим наиболее тяжелый случай, когда пробой промежутка происходит через $0,01$ с после погасания дуги. В момент пробоя (точка 3) напряжение на промежутке равно $2E$. При пробое возникает высокочастотный процесс изменения напряжения. Амплитуда переходной составляющей в начальный момент равна $2E$. Частота колебаний определяется индуктивностью источника L и отключаемой емкостью C . Напряжение высокочастотной составляющей колеблется около э.д.с. источника как около нулевой линии. Из-за наличия потерь эта составляющая затухает.

Высокочастотный ток колебательного разряда, меняясь с той же частотой f_0 , отстает от напряжения на 90° . Если дуга с высокочастотным током погаснет в первый нуль тока (точка 4), то напряжение на конденсаторе будет равно $-3E$, а напряжение на зажимах выключателя $2E$. Через полупериод основной частоты к промежутку будет приложено напряжение $4E$. Если выключатель не выдержит этого напряжения, возникает повторный пробой с амплитудой переменной составляющей высокой частоты $4E$. В том случае, когда дуга с током высокой частоты будет погашена в первый нуль тока (точка 5), то напряжение на емкости станет равным $5E$. Таким образом, если не учитывать затухания, то при каждом повторном пробое напряжение на конденсаторе возрастает на $2E$. При первом пробое оно равно $3E$, при втором $5E$ и т. д. Таким образом, повторные пробои дают чрезвычайно опасные перенапряжения, которые могут повести к повреждению изоляции оборудования.

Поэтому должны быть приняты меры к устранению повторных пробоев либо за счет быстрого роста прочности промежутка, либо снижением напряжения на емкости после гашения дуги в точке 2 за счет разряда этой емкости через шунтирующее сопротивление $R_{ш}$ (рис. 4-20, б). В этом случае сначала размыкается разрыв B_1 и вводится сопротивление $R_{ш}$, после чего отключается ток разрывом B_2 . Расчеты напряжения на контактах выключателей и выбор $R_{ш}$ приведены в [Л. 4-2 и 4-10]. Величина сопротивления $R_{ш}$ выбирается таким образом, чтобы, с одной стороны, снизить напряжение на контактом промежутке и избежать повторных пробоев, с другой — обеспечить надежное отключение оставшегося тока разрывом B_2 .

При отключении длинной холостой линии процесс проходит аналогичным образом, если не появляется повторный пробой. При наличии повторных пробоев в линии возникают волновые процессы, которые в конечном счете создают примерно такие же высокие потенциалы в установке, как и при отключении конденсатора.

4-12. Пример расчета скорости восстановления напряжения

Трансформаторная группа с номинальной мощностью $32\,000$ кВ·А и напряжением 35 кВ/ 110 кВ питается от системы бесконечной мощности. Трехфазное короткое замыкание произошло на стороне 110 кВ и отключается выключателем. Нулевая точка трансформатора на стороне 110 кВ заземлена, а в месте короткого замыкания нуль изо-

лирован. Напряжение короткого замыкания трансформатора $X_K = 10,5\%$. Емкость одной фазы трансформатора $C_T = 3500$ пФ. К шинам 110 кВ присоединено различное оборудование общей емкостью $C_{ш} = 4000$ пФ.

Требуется найти частоту восстанавливающегося напряжения и среднюю скорость восстановления напряжения на контактах полюса, отключающегося первым.

Схема замещения представлена на рис. 4-21, а.

Обычно каждая фаза трансформатора представляется индуктивностью L и емкостью $C_{з.т} = C_T/2$ на ее концах. Так как нуль заземлен, то остается одна емкость $C_{з.т} = 1750$ пФ.

Пусть дуга погасла в фазе А, тогда схема может быть преобразована в рис. 4-21, б.

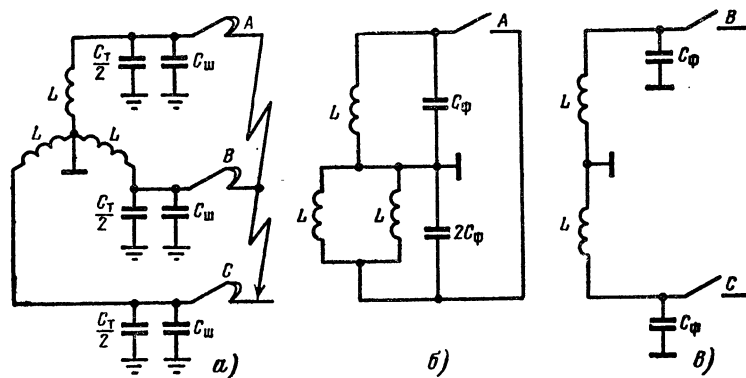


Рис. 4-21. Схемы замещения для расчета процесса восстановления напряжения.

Напряжение на полюсе равно сумме напряжений на емкостях C_{ϕ} и $2C_{\phi}$.

Частоты колебаний в верхнем и нижнем контурах одинаковы:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{0,5L \cdot 2C}}.$$

Индуктивность L равна (см. § 21-1):

$$L = \frac{X_K}{\omega} = \frac{U_n}{\omega\sqrt{3}I_K} = \frac{U_n X_K \%}{\omega\sqrt{3}I_n \cdot 100};$$

или, если выразить ток I через мощность P_n и напряжение U_n ,

$$L = \frac{U_n X_K \% U_n \sqrt{3}}{\omega \sqrt{3} P_n \cdot 100} = \frac{U_n^2 X_K \%}{2\pi f P_n \cdot 100} = \frac{110^2 \cdot 10^6 \cdot 10,5}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 32000 \cdot 10^3 \cdot 100} = 0,126 \text{ Г}.$$

Согласно [Л. 4-2] при высокой частоте индуктивность трансформатора уменьшается на 30%. Тогда

$$L_{\phi} = 0,7L = 0,0883 \text{ Г.}$$

Общая емкость фазы $C_{\phi} = C_{\text{э.т}} + C_{\text{м}} = 1750 + 4000 = 5750 \text{ пФ.}$

$$\begin{aligned} \text{Частота} \quad f_0 &= \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{\phi} C_{\phi}}} = \\ &= \frac{1}{6,28 \sqrt{0,0883 \cdot 5750 \cdot 10^{-12}}} = 7,07 \cdot 10^3 \text{ Гц.} \end{aligned}$$

Средняя скорость восстановления напряжения

$$\begin{aligned} \left(\frac{du}{dt} \right)_{\text{ср}} &= 4f_0 \cdot 1,5 \sqrt{2} \frac{U_{\text{н}}}{\sqrt{3}} \cdot 10^{-6} = \\ &= 4 \cdot 7,07 \cdot 10^3 \cdot 1,5 \sqrt{2} \frac{110 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \cdot 10^{-6} = 3800 \text{ В/мкс.} \end{aligned}$$

После отключения фазы A в следующий нуль тока гаснет дуга в фазах B и C (рис. 4-21, в). Примем, что напряжение между полюсами фаз B и C делится поровну. Тогда

$$\begin{aligned} \frac{du}{dt_{\text{ср}}} &= 4f_0 \frac{\sqrt{2} U_{\text{н}}}{2} \cdot 10^{-6} = \\ &= 4 \cdot 7,07 \cdot 10^3 \frac{\sqrt{2} \cdot 110 \cdot 10^3}{2} \cdot 10^{-6} = 2200 \text{ В/мкс.} \end{aligned}$$

Таким образом, отключение полюсов B и C происходит в более легких условиях.

Глава пятая

ЭЛЕКТРОМАГНИТЫ

5-1. Общие сведения о магнитных цепях аппаратов

а) **Магнитная цепь аппарата, основные законы.** Электромагниты нашли в аппаратостроении широкое применение и как элемент привода аппаратов (контакты, пускатели, реле, автоматы, выключатели), и как устройство, создающее силы, например в муфтах и тормозах.

Конфигурация магнитной цепи электромагнита зависит от назначения аппарата и может быть самой разнообразной.

Основные соотношения для магнитной цепи мы рассмотрим на примере клапанной системы, изображенной на рис. 5-1. Подвижная часть магнитной цепи называется якорем 1. Часть магнитной цепи, на которой сидит намагничивающая обмотка 2, называется сердечником 3. Вертикальные и параллельные части магнитопровода 3 и 4 часто называют стержнями.

В клапанной системе якорь может иметь как поступательное движение (рис. 5-1), так и вращательное (рис. 5-12).

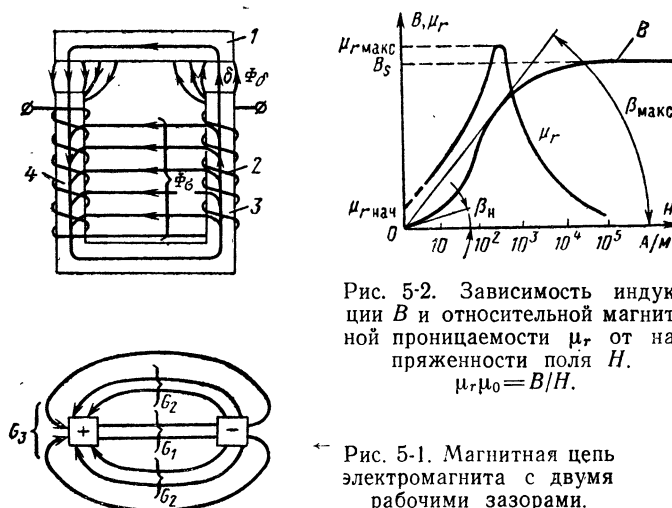


Рис. 5-2. Зависимость индукции B и относительной магнитной проницаемости μ_r от напряженности поля H .
 $\mu_r \mu_0 = B/H$.

Рис. 5-1. Магнитная цепь электромагнита с двумя рабочими зазорами.

Намагничивающая катушка создает магнитодвижущую силу (м. д. с.), под действием которой возбуждается магнитный поток. Этот поток замыкается как через зазор δ , так и между другими частями магнитной цепи, имеющими различные магнитные потенциалы.

Воздушный зазор δ , меняющийся при перемещении якоря, называется рабочим зазором. Соответственно поток, проходящий через рабочий зазор, называется рабочим потоком и обозначается обычно Φ_δ . Все остальные потоки в магнитной цепи называются потоками рассеяния Φ_σ . Сила, развиваемая якорем

электромагнита, как правило, определяется потоком в рабочем зазоре δ .

Задачей расчета магнитной цепи является либо определение м. д. с. катушки, необходимой для создания рабочего потока заданной величины (прямая задача), либо определение рабочего потока по известной м. д. с. катушки (обратная задача). Эти задачи могут быть решены с помощью двух законов Кирхгофа применительно к магнитной цепи.

Согласно первому закону алгебраическая сумма потоков в узле магнитной цепи равна нулю:

$$\sum_{k=1}^n \Phi_k = 0. \quad (5-1)$$

Второй закон Кирхгофа можно получить из известного закона полного тока [Л. 1-1]:

$$\oint H dl = \sum i\omega = F_j, \quad (5-2)$$

где H — напряженность магнитного поля;
 dl — элемент длины контура, по которому производится интегрирование;

$\sum i\omega = F_j$ — сумма м. д. с., действующих в контуре.

Помня, что $B = \mu_a H$, (5-2) можно написать в виде

$$\oint \frac{B}{\mu_a} dl = \sum i\omega,$$

или

$$\oint B S \frac{dl}{\mu_a S} = \sum i\omega, \quad (5-3)$$

где S — сечение магнитной цепи;
 μ_a — абсолютная магнитная проницаемость.

Магнитная проницаемость μ_a характеризует магнитную проводимость магнитного материала цепи. Выражение $dl/\mu_a S$ аналогично сопротивлению элемента электрической цепи $dl/\kappa S$ (где κ — удельная электрическая проводимость материала проводника). Тогда (5-3) можно представить в виде

$$\oint \Phi dR_\mu = \sum i\omega, \quad (5-4)$$

где dR_μ — магнитное сопротивление участка длиной dl .

Падение магнитного потенциала по замкнутому контуру равно сумме м. д. с. действующих в этом контуре. Это и есть второй закон Кирхгофа магнитной цепи.

В системе единиц СИ единица измерения абсолютной магнитной проницаемости $1[\mu_a] = \Gamma/\text{м}$, следовательно, магнитное сопротивление получает единицу измерения $1[R_\mu] = \Gamma^{-1}$.

В том случае, когда поток в отдельных частях магнитной цепи не меняется, интеграл в (5-4) можно заменить конечной суммой

$$\sum_{j=1}^n \Phi_j R_{\mu j} = \sum_{j=1}^n F_j. \quad (5-5)$$

Таким образом, сумма падений магнитного напряжения по замкнутому контуру равна сумме м. д. с., действующих в этом контуре.

По аналогии с электрической цепью магнитное сопротивление участка конечной длины l можно представить в виде

$$R_\mu = \frac{1}{\mu_a} \frac{l}{S} = \rho_\mu \frac{l}{S},$$

где ρ_μ — магнитное сопротивление единицы длины магнитной цепи при сечении, также равном единице, м/Г.

Полная аналогия законов Кирхгофа электрической и магнитной цепей позволяет составить для последней электрическую схему замещения (§ 5-2 и 5-3).

Для расчета по (5-5) необходимо знать ρ_μ . Если задана не кривая $\rho_\mu(B)$, а кривая намагничивания материала $B(H)$, для расчета удобно использовать (5-2). Если на отдельных участках индукция постоянна, то интеграл в (5-2) можно заменить конечной суммой

$$\sum_{j=1}^n H_j l_j = \sum_{j=1}^n F_j. \quad (5-6)$$

По известной индукции в каждом участке с помощью кривой $B(H)$ находят напряженность H_j на участке, после чего с помощью (5-6) можно отыскать потребную м. д. с. катушки (см. § 5-2).

При расчете магнитной цепи часто более удобным

является введение величины, обратной магнитному сопротивлению, — магнитной проводимости (G)

$$G = \frac{1}{R_\mu} = \frac{\mu_a S}{l}.$$

Уравнение (5-5) при этом принимает вид:

$$\sum_{j=1}^n \Phi_j \frac{1}{G_j} = \sum_{j=1}^n F_j. \quad (5-7)$$

Для простейшей неразветвленной цепи с проводимостью G

$$\Phi \frac{1}{G} = I\omega, \text{ или } \Phi = I\omega G.$$

Магнитное сопротивление и проводимость ферромагнитных материалов являются сложной нелинейной функцией индукции. Зависимость относительной магнитной проницаемости $\mu_r = \mu_a/\mu_0$, а следовательно, и магнитной проводимости от величины индукции для магнитно-мягкого материала представлена на рис. 5-2. Максимальное значение $\mu_{r\text{макс}}$ (минимальное магнитное сопротивление) имеет место при средних индукциях. В слабых и сильных полях магнитное сопротивление материала резко возрастает. Изменение магнитного сопротивления от индукции сильно затрудняет решение как прямой, так и обратной задачи.

б) Проводимость воздушных промежутков. В рабочем зазоре поток проходит через воздух, магнитная проницаемость которого не зависит от индукции и является величиной постоянной, практически равной проницаемости вакуума μ_0 .

Для прямоугольных и круглых полюсов при малом зазоре δ поле приближенно можно считать равномерным и проводимость легко определить, воспользовавшись формулой

$$G = \mu_0 \frac{S}{\delta}, \quad (5-8)$$

где S — сечение потока в зазоре;
 δ — длина зазора.

Уравнением (5-8) можно пользоваться только при относительно малых зазорах, когда последний не прево-

сходит двух десятых наименьшего из поперечных размеров полюса.

При больших зазорах у краев полюсов возникает дополнительный поток, называемый потоком выпучивания. В результате при данном значении разности магнитных потенциалов полный поток из полюса увеличивается. Магнитная проводимость, равная отношению потока к разности магнитных потенциалов, возрастает.

Расчет проводимости с учетом выпучивания связан с большими трудностями ввиду сложности картины магнитного поля. Для расчета проводимости используются три основных метода:

1. Расчет по эмпирическим формулам. Согласно данным А. Г. Сливинской [Л. 5-1] для цилиндрических полюсов диаметром d достаточно точный результат дает формула

$$G = \mu_0 \left(\frac{\pi d^2}{4\delta} + 0,48d + \frac{0,36d^2}{2,4d + \delta} \right).$$

Последние два слагаемых учитывают поток выпучивания. Аналогичные формулы предложены ею для большего числа полюсов различной формы с осевой симметрией [Л. 5-1].

Для двух прямоугольных полюсов с поперечными размерами a и b достаточно хороший результат дает простая формула

$$G = \frac{\mu_0}{\delta} \left(a + \frac{0,307\delta}{\pi} \right) \left(b + \frac{0,307\delta}{\pi} \right).$$

Подробно вопрос расчета проводимости с учетом выпучивания рассмотрен в [Л. 5-2].

2. В том случае, когда аналитически рассчитать проводимость трудно вследствие сложной формы картины поля, реальное поле заменяется более простым, состоящим из фигур, которые позволяют рассчитать проводимость по элементарным формулам. Так, для определения проводимости между прямоугольным полюсом и плоскостью (рис. 5-3) поле разбивается на ряд простейших фигур (частей цилиндра или сферы), проводимость которых легко определяется аналитически [Л. 5-1, 5-2]. Результирующая проводимость равна сумме проводимостей элементарных фигур. Описанный выше метод расчета проводимости называется методом вероятных путей потока.

В том случае, когда проводимость не может быть рассчитана первыми двумя способами, необходимо графически построить магнитное поле [Л. 5-1, 5-2], после чего проводится расчет проводимости (третий метод). На рис. 5-4 показано поле, построенное графическим путем. Проводимость равна:

$$G = \mu_0 h m / n,$$

где m — число трубок; n — число элементов в трубке.

При расчете потока рассеяния мы сталкиваемся с необходимостью определения проводимости для потоков рассеяния. Очень удобно пользоваться проводимостью на единицу длины сердечника — удельной проводимостью. Для цепи рис. 5-1 проводи

мость для потоков рассеяния складывается из проводимости G_1 между гранями, обращенными друг к другу, проводимости G_2 между гранями, лежащими в одной плоскости, и проводимости G_3 между гранями, обращенными в разные стороны. Результирующая проводимость равна:

$$G_{рез} = G_1 + 2G_2 + G_3.$$

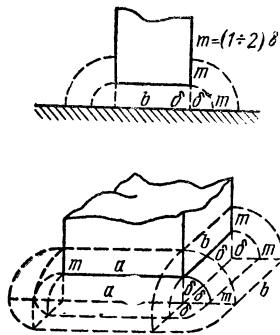


Рис. 5-3. К определению магнитной проводимости методом вероятных путей потока.

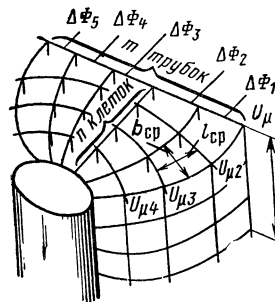


Рис. 5-4. К определению проводимости по картине поля.

Удельная проводимость на единицу длины (Г/м) стержней (вертикальных частей магнитопровода) равна:

$$g = \frac{G_{рез}}{l}.$$

Проводимости G_1 , G_2 , G_3 можно найти с помощью таблиц в [Л. 5-1, 3-2].

5-2. Магнитная цепь электромагнитов постоянного тока

а) **Расчет потоков рассеяния и индуктивности катушки без учета сопротивления стали.** Для электромагнитов, у которых обмотка располагается на стержне, поток рассеяния связан с обмоткой так, что с различными витками сцеплен различный поток рассеяния. Такая система называется системой с распределенной магнитодвижущей силой.

Рассмотрим закон изменения потока вдоль сердечников и разности магнитных потенциалов между ними в клапанной системе (рис. 5-5). Магнитодвижущая сила на

единицу длины стержня равна Iw/l . Разность магнитных потенциалов между точками, расположенными на расстоянии x от основания, равна $U_{\mu x} = Iwx/l$. Тогда элементарный поток рассеяния с участка dx , расположенного

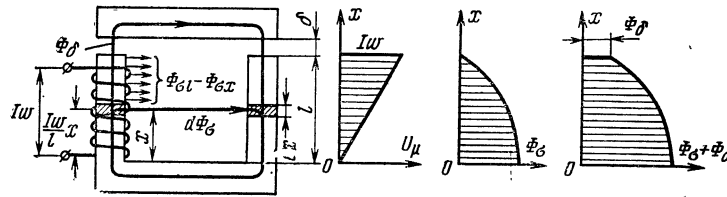


Рис. 5-5. К расчету магнитной цепи без насыщения.

на расстоянии x от основания, можно найти с помощью (5-7):

$$d\Phi_{\sigma x} = \frac{Iw}{l} x g dx.$$

Произведя интегрирование в пределах от 0 до x , получим поток, выходящий из стержня на длине x :

$$\Phi_{\sigma x} = \frac{Iw}{l} g \frac{x^2}{2}. \quad (5-9)$$

Поток, проходящий через сечение сердечника на расстоянии x от основания, равен:

$$\Phi_x = \Phi_\delta + \Phi_{\sigma l} - \Phi_{\sigma x} = \Phi_\delta + \frac{Iw}{2l} g (l^2 - x^2). \quad (5-10)$$

Поток в основании сердечника получим, положив $x=0$:

$$\Phi_0 = \Phi_\delta + \frac{Iwgl}{2}. \quad (5-11)$$

Без учета сопротивления магнитопровода

$$\Phi_\delta = IwG_\delta, \quad (5-12)$$

следовательно,

$$\Phi_0 = \Phi_\delta \left(1 + \frac{gl}{2G_\delta} \right). \quad (5-13)$$

Изменение потока и разности магнитных потенциалов между стержнями показано на рис. 5-5. Разность

магнитных потенциалов между стержнями меняется по линейному закону и достигает максимального значения Iw у рабочего воздушного зазора. Магнитный поток согласно (5-10) меняется по закону параболы и достигает максимального значения у основания стержня. Известно, что индуктивность обмотки L , от которой в большой степени зависит время срабатывания электромагнита, определяется как отношение потокосцепления Ψ к току. Тогда

$$L = \frac{\Psi}{I} = \frac{\Psi_{\delta} + \Psi_{\sigma}}{I} = \frac{\Phi_{\delta} w}{I} + \frac{\Psi_{\sigma}}{I},$$

но

$$\Psi_{\sigma} = \int_0^l \frac{w}{l} x d\Phi_{\sigma x} = \frac{Iw^2}{l^2} g \int_0^l x^2 dx = \frac{Iw^2}{3} gl,$$

следовательно

$$L = \frac{IwG_{\delta} w}{I} + \frac{Iw^2}{3l} gl = w^2 \left(G_{\delta} + \frac{gl}{3} \right). \quad (5-14)$$

Рассмотрим систему, в которой, кроме рабочего зазора δ_1 , имеется паразитный зазор δ_2 (рис. 5-6). На зазоре

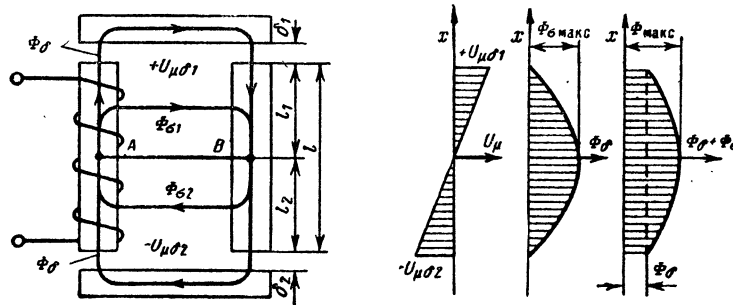


Рис. 5-6. Магнитная цепь с паразитным зазором.

$2\delta_1$ имеем разность магнитных потенциалов $+U_{\mu\delta_1}$, на зазорах $2\delta_2$ разность магнитных потенциалов равна $-U_{\mu\delta_2}$. В соответствии с направлением разности потенциалов вверх поток рассеяния Φ_{σ_1} идет слева направо, а снизу направление потока Φ_{σ_2} меняется. В каком-то се-

чении AB поток рассеяния равен нулю. Положение этого сечения определяется уравнением, полученным в [Л. 1-3]:

$$l_1 = l \frac{2G_2 + gl}{2(G_1 + G_2 + gl)},$$

где g — удельная проводимость;

$$G_1 = \mu_0 S / 2\delta_1; \quad G_2 = \mu_0 S / 2\delta_2.$$

Картина распределения потоков и разности магнитных потенциалов показана на том же рисунке. Если $\delta_2 = 0$ ($G = \infty$), то $l_1 = l$ и мы имеем случай рис. 5-5.

Таким образом, введение паразитного зазора δ_2 вызывает смещение нулевого потенциала U_μ и максимального потока $\Phi_{\text{макс}}$ в промежуточное положение $l_1 < l$.

В аппаратостроении широко используется бронева магнитная система (рис. 5-7, а). В этой системе обмотка

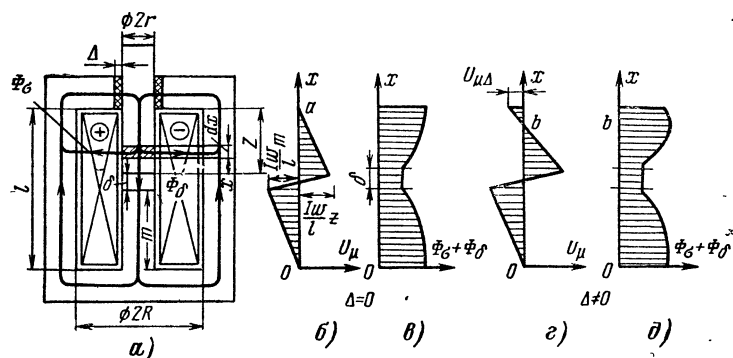


Рис. 5-7. Бронева магнитная система.

окружена магнитопроводом. В электромагнитах постоянного тока внешний магнитопровод и якорь имеют форму цилиндра и выполняются из массивной стали. Основными воздушными зазорами являются рабочий зазор δ и паразитный зазор Δ .

Рассмотрим распределение потока в магнитной цепи при условии, что $\Delta = 0$.

Рабочий поток Φ_δ , как и прежде, определяется из (5-12). Элементарный поток рассеяния, выходящий из

якоря на участке dx , расположенном на расстоянии x от торца якоря, равен:

$$d\Phi_{\sigma x} = \frac{I\omega}{l} (Z - x) g dx,$$

где $I\omega(Z - x)/l$ — разность магнитных потенциалов, создающая поток рассеяния $d\Phi_{\sigma x}$;
 g — удельная проводимость для потоков рассеяния, равная $\mu_0 \cdot 2\pi / \ln(R/r)$ [Л. 1-5].

Поток рассеяния, выходящий из якоря на длине x , равен:

$$\Phi_{\sigma x} = \int_0^x \frac{I\omega}{l} g (Z - x) dx = \frac{I\omega}{l} g \left(Zx - \frac{x^2}{2} \right); \quad (5-15)$$

при $Z = x$

$$\Phi_{\sigma z} = \frac{I\omega}{l} g \frac{Z^2}{2}.$$

Полный поток в сердечнике при $Z = x$ равен:

$$\Phi_{0z} = I\omega G_{\delta} + \frac{I\omega}{l} g \frac{Z^2}{2}. \quad (5-16)$$

Аналогично определяется поток в основании стопа m :

$$\Phi_{0m} = I\omega G_{\delta} + \frac{I\omega}{l} g \frac{m^2}{2}.$$

Индуктивность броневой магнитной системы находится после определения полного потокоцепления.

Потокоцепление обмотки на длине Z определяется уравнением

$$\Psi_Z = \int_0^Z d\Phi_{\sigma x} \frac{\omega}{l} (Z - x) = \int_0^Z \frac{I\omega^2}{l^2} g (Z - x)^2 dx = I\omega^2 g \frac{Z^3}{3l^2}. \quad (5-17)$$

Аналогично находим Ψ_m для нижней части системы:

$$\Psi_m = I\omega^2 g \frac{m^3}{3l^2}.$$

Полное потокоцепление равно:

$$\Psi = \Psi_{\delta} + \Psi_Z + \Psi_m = I\omega^2 \left(G_{\delta} + \frac{gZ^3}{3l^2} + g \frac{m^3}{3l^2} \right),$$

а индуктивность

$$L = \frac{\Psi}{I} = w^2 \left(G_\delta + \frac{gZ^3}{3l^2} + \frac{gm^3}{3l^2} \right). \quad (5-18)$$

Распределение потоков в цепи и разности магнитных потенциалов приведены на рис. 5-7, б и в.

При наличии зазора Δ точка с нулевой разностью потенциалов перемещается из положения a в положение b , что вызывает изменение картины распределения потока вдоль сердечника (рис. 5-7, г). Точка максимума потока также перемещается в положение b .

б) Расчет магнитной цепи с учетом магнитного сопротивления стали и потоков рассеяния. Электромагнитные системы обычно проектируются таким образом, что при рабочих зазорах, близких к нулю, цепь делается насыщенной с целью лучшего использования магнитного материала и уменьшения размеров и массы аппарата.

Условно принимают, что если падение магнитного потенциала в магнитопроводе превышает 10% общей м.д.с. обмотки, то такую

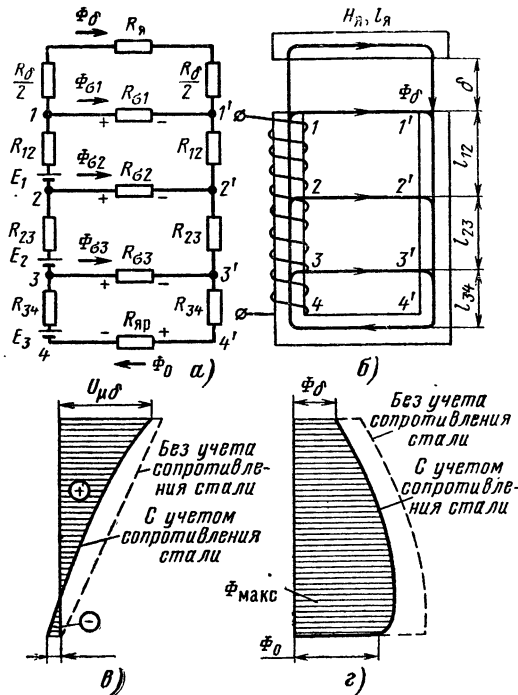


Рис. 5-8. К расчету магнитной цепи с учетом сопротивления стали.

систему считают насыщенной и расчет ведется с учетом магнитного сопротивления стали. Наиболее простыми, дающими хорошие результаты, являются методы расчета по участкам и по коэффициентам рассеяния.

— Вначале рассмотрим решение прямой задачи методом участков для простейшей клапанной системы (рис. 5-8, б), электрическая схема замещения которой представлена на рис. 5-8, а. Трудность решения поставленной задачи заключается в том, что для составления схемы замещения необходимо знать э.д.с. E_1 ; E_2 ; E_3 . Но именно эти величины являются искомыми. Поэтому приходится пользоваться методом последовательных приближений.

Примем вначале, что

$$E = E_1 + E_2 + E_3 = (I\omega)_{\text{кат}} \approx (1,2 + 1,3) \Phi_{\delta} \frac{1}{G_{\delta}};$$

$$E_1 = E \frac{l_1}{l}; E_2 = E \frac{l_2}{l}; E_3 = E \frac{l_3}{l}.$$

Воспользовавшись первым и вторым законами Кирхгофа для магнитной цепи, производим расчет в последовательности, изложенной ниже.

1. Определим разность магнитных потенциалов между точками 1 и 1':

$$U_{\mu 11'} = U_{\mu \delta} + U_{\mu \gamma} = \frac{\Phi_{\delta}}{G_{\delta}} + H_{\gamma} l_{\gamma},$$

где H_{γ} — находим по кривой намагничивания для $B_{\gamma} = \Phi_{\delta} / S_{\gamma}$;

l_{γ} — берется равной средней линии потока в якоре;

S_{γ} — сечение якоря.

2. Вычисляем поток рассеяния между точками 1 и 1':

$$\Phi_{\sigma 1} = U_{\mu 11'} \frac{1}{R_{\sigma 1}} = U_{\mu 11'} G_{\sigma 1} = U_{\mu 11'} g l_{12}.$$

В реальной картине поля поток $\Phi_{\sigma 1}$ распределен вдоль всего первого участка. В принятой картине поля, делая определенную погрешность, мы считаем, что разность магнитных потенциалов между участками на всем протяжении постоянна и равна $U_{\mu 11'}$, а поток рассеяния сосредоточен между точками 1 и 1'.

Вдоль участка l_{12} поток не меняется и равен:

$$\Phi_1 = \Phi_{\delta} + \Phi_{\sigma 1}.$$

3. Зная поток на участке, определяем падение магнитного напряжения на участках 1—2 и 1'—2' и разность магнитных потенциалов между точками 2 и 2':

$$U_{\mu 22'} = U_{\mu 11'} + 2H_{12}l_{12} - E_1$$

(если H одинакова в обоих стержнях).

Напряженность поля H_{12} на участке l_{12} находим по кривым намагничивания для B_{12} , зная сечение стержня $S_{ст}$:

$$B_{12} = \Phi_1 / S_{ст}.$$

Аналогичным образом рассматриваются все узловые точки.

$$4. \quad \Phi_{\sigma 2} = U_{\mu 22} \cdot g l_{23}.$$

$$5. \quad \Phi_2 = \Phi_1 + \Phi_{\sigma 2}; \quad B_{23} = \Phi_2 / S_{ст};$$

по B_{23} находим H_{23} .

$$6. \quad U_{\mu 33'} = U_{\mu 22'} + 2H_{23}l_{23} - E_2.$$

$$7. \quad \Phi_3 = \Phi_2 + \Phi_{\sigma 3}.$$

$$8. \quad B_{34} = \frac{\Phi_3}{S_{ст}}; \text{ по } B_{34} \text{ находим } H_{34}.$$

$$9. \quad U_{\mu 44'} = U_{\mu 33'} + 2H_{34}l_{34} - E_3 = H_{яр}l_{яр}.$$

$$10. \quad \Phi_{яр} = B_{яр}S_{яр} = \Phi_0.$$

$$11. \quad \Sigma U_{\mu} = U_{\mu 11'} + 2H_{12}l_{12} + 2H_{23}l_{23} + 2H_{34}l_{34} + H_{яр}l_{яр}.$$

После расчета всей цепи необходимо сравнить полное падение магнитного потенциала с приближенно взятой нами величиной E . Если разница между E и падением магнитного потенциала превышает 10%, то необходимо задаться новым значением E . Расчеты ведутся до тех пор, пока не будет получена разность между ними не более 10% E .

Распределение разности магнитных потенциалов и потока вдоль длины сердечника показано на рис. 5-8, *в* и *г*. Интересно заметить, что сопротивление ярма $R_{яр}$ играет такую же роль, как и паразитный зазор Δ (рис. 5-7). Из-за падения потенциала $U_{\mu яр} = \Phi_0 R_{яр}$ в нижней части системы разность потенциалов меняет знак, что меняет направление потока рассеяния. Максимальное значение потока Φ_{\max} в сердечнике смещено вверх относительно точек 4 и 4'. На тех же рисунках показаны для сравнения те же кривые при отсутствии насыщения магнитопровода.

Из-за падения магнитного потенциала вдоль стержней разность магнитных потенциалов между ними уменьшается, что ведет к уменьшению потоков рассеяния. По мере уменьшения рабочего зазора растет поток Φ_{δ} , что вызывает уменьшение разности магнитных потенциалов между стержнями и уменьшение потоков рассеяния. Иногда при малом рабочем зазоре потоками рассеяния можно пренебречь.

Следует подчеркнуть, что в насыщенной системе потоки рассеяния, проходя по магнитопроводу, создают дополнительное падение магнитного потенциала. При этом уменьшается разность магнитных потенциалов на рабочем зазоре, а следовательно, уменьшается полезный рабочий поток. Таким образом, потоки рассеяния уменьшают и силу, развиваемую электромагнитом.

Обратная задача решается методом последовательных приближений. Задаваясь потоком Φ_{δ} , определяют падение магнитного по-

тенциала по всему магнитопроводу описанным выше методом. Эта величина при правильно выбранном значении Φ_δ должна быть равна $I\omega$.

Расчет как прямой, так и обратной задач может быть значительно упрощен применением метода, использующего коэффициенты рассеяния. Рассмотрим прямую задачу применительно к броневому электромагниту (рис. 5-7). Под коэффициентом рассеяния мы понимаем отношение потока в данном сечении с координатой x к потоку в рабочем зазоре:

$$\sigma_x = \frac{\Phi_x}{\Phi_\delta}.$$

В отличие от метода расчета по участкам при определении потоков рассеяния мы не учитываем влияния падения магнитного потенциала по цепи. Поэтому расчет по коэффициентам рассеяния менее точен, чем расчет по участкам. Воспользовавшись (5-12) и (5-15), можно получить для якоря:

$$\sigma_x = \frac{\Phi_\delta + \Phi_{\sigma x}}{\Phi_\delta}.$$

Задавая различные значения x , находят значения потока, индукции и напряженности поля на различных участках якоря. Обычно якорь делится на два участка, и находятся $H_{x=0}$; $H_{x=z/2}$; $H_{x=z}$. Средняя напряженность поля в якоре согласно формуле Симпсона:

$$H_{\text{ср}} = \frac{H_{x=0} + 4H_{x=\frac{z}{2}} + H_{x=z}}{6}.$$

Падение потенциала на якоре

$$I\omega_{\text{як}} = H_{\text{ср}}Z.$$

Аналогично рассчитывается падение потенциала на всех участках цепи (см. § 5-9).

Исследования показали, что если максимальная индукция в магнитопроводе ниже колена кривой намагничивания или в крайнем случае лежит на колене, то метод расчета по коэффициентам рассеяния дает хороший результат. Если индукция в сердечнике лежит выше колена кривой намагничивания, то необходимо использовать метод расчета по участкам. Более подробно метод с использованием коэффициентов рассеяния изложен в [Л. 5-1].

5-3. Магнитная цепь электромагнитов переменного тока

Магнитные цепи на переменном токе обладают следующими особенностями.

1. Ток в катушке электромагнита зависит главным образом от ее индуктивного сопротивления.

2. Магнитное сопротивление цепи зависит не только от μ_a , l и S сердечника, но и от потерь в стали и наличия

краткозамкнутых обмоток, расположенных на сердечнике.

3. Магнитопровод обычно выполняется шихтованным (с целью уменьшения потерь на вихревые токи) прямоугольного поперечного сечения.

а) **Магнитная система без активных потерь в стали и насыщения.** Ради упрощения при расчете магнитной цепи мы сделаем допущения, что напряжение, ток в обмотке и потоки меняются по синусоидальному закону.

Рассмотрим вначале простейшую цепь без учета сопротивления стали, потерь в ней и потоков рассеяния (рис. 5-9). Напряжение сети, приложенное к обмотке, уравнивается активным и реактивным падением напряжения:

$$U^2 = (IR)^2 + (IX)^2,$$

где напряжение U и ток I берутся в действующих значениях.

Воспользовавшись (5-12) и (5-8), получим:

$$IX = I\omega L = I\omega \frac{\Psi}{I} = \omega w^2 IG_\delta = I\omega w^2 \frac{\mu_0 S}{2\delta}. \quad (5-19)$$

Для случая обмотки напряжения, когда катушка подключается на зажимы источника напряжения, активное сопротивление обмотки, как правило, значительно меньше реактивного $R \ll \omega L$. Если пренебречь активным падением напряжения, то $U = IX$. Но так как

$$IX = 4,44 f\omega \Phi_m = U, \quad (5-20)$$

получим

$$\Phi_m = \frac{U}{4,44 f\omega}, \quad (5-21)$$

где Φ_m — амплитудное значение потока.

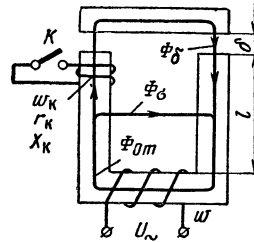


Рис. 5-9. Магнитная цепь электромагнита переменного тока с короткозамкнутой обмоткой.

Таким образом, при сделанных выше допущениях (активное сопротивление обмотки и потери в сердечнике равны нулю) поток, связанный с обмоткой, не зависит от рабочего зазора и является величиной постоянной.

При допущении, что $U=IX$, из (5-19) следует:

$$I = \frac{2U\delta}{\omega\omega^2\mu_0 S}. \quad (5-22)$$

Формуле (5-22) можно дать следующее физическое объяснение: с ростом зазора δ уменьшается индуктивное сопротивление $X=\omega\omega^2\mu_0 S/2\delta$, что при постоянном действующем значении напряжения вызывает рост тока. Если учесть активное сопротивление обмотки (при условии, что в заданном диапазоне изменения зазора $R \ll \omega L$), то с ростом зазора ток будет расти, а поток будет уменьшаться согласно уравнению

$$\Phi_m = \frac{\sqrt{U^2 - I^2 R^2}}{4,44 f w}. \quad (5-23)$$

Таким образом, с ростом рабочего зазора поток падает, как это имеет место и в цепи постоянного тока. Однако в магнитной цепи переменного тока уменьшение потока является следствием роста падения напряжения на активном сопротивлении обмотки, а в цепи постоянного тока — роста магнитного сопротивления воздушного зазора.

Если учитывать поток рассеяния Φ_σ , то в схеме замещения параллельно сопротивлению R_δ , зависящему от величины зазора, необходимо включить неизменное сопротивление R_σ (рис. 5-8). В результате при увеличении зазора ток в обмотке нарастает меньше, чем это следует из (5-22).

При составлении электрической схемы замещения магнитной цепи магнитное сопротивление воздушных промежутков $R_\delta = R_{\mu\delta} = R_\mu$ заменяется чисто активным сопротивлением.

В электрических аппаратах, работающих на переменном токе, для изменения фазы магнитного потока используются короткозамкнутые витки и обмотки.

Рассмотрим клапанную систему, у которой, кроме основной обмотки w , имеется короткозамкнутая w_k (ключ K включен). Для упрощения принимаем, что

активные потери и магнитное сопротивление стали равны нулю. Магнитный поток, проходя через контур витков ω_k , наводит в нем э. д. с. Возникающий в витке ток создает свой магнитный поток. Ради упрощения рассуждений положим, что $X_k=0$. Для мгновенного значения м. д. с. обмотки можно написать:

$$i\omega = \Phi_\delta \frac{1}{G_\delta} - i_k \omega_k, \quad (5-24)$$

где i_k — ток в короткозамкнутой обмотке; ω_k — число витков этой обмотки.

Но

$$i_k = \frac{e}{r_k} = \frac{-\omega_k d\Phi_\delta/dt}{r_k}. \quad (5-25)$$

Используя (5-24) и (5-25), получаем:

$$i\omega = \Phi_\delta \frac{1}{G_\delta} + \frac{\omega_k^2 d\Phi_\delta/dt}{r_k} \quad (5-26)$$

или

$$u_\mu = i\omega = \Phi_\delta R_\mu + \frac{\omega_k^2}{r_k} \frac{d\Phi_\delta}{dt}. \quad (5-27)$$

Для электрической цепи, состоящей из последовательно включенных сопротивления и индуктивности, падение напряжения может быть выражено аналогично:

$$u = iR + L di/dt. \quad (5-28)$$

Проводя аналогию между магнитной и электрической цепью, введем понятие реактивного магнитного сопротивления. Мгновенному значению тока i соответствует мгновенное значение потока Φ_δ ; активному сопротивлению цепи R — активное магнитное сопротивление R_μ ; индуктивности L — величина ω^2/r_k . Для электрической цепи переменного тока в комплексной форме можно записать:

$$\dot{U} = \dot{I} R + \dot{I} jX, \quad (5-29)$$

где $X = \omega L$.

Аналогично для магнитной цепи, приняв $\Phi_\delta = \Phi$, получим:

$$\dot{U}_\mu = \dot{\Phi} R_\mu + \dot{\Phi} j X_\mu, \quad (5-30)$$

где $X_\mu = \omega \frac{\omega_k^2}{r_k}$.

Векторная диаграмма магнитной цепи представлена на рис. 5-10, а. Вектор $\dot{\Phi}_m R_\mu$ — активное падение магнитного потенциала, $\dot{\Phi}_m X_\mu$ — реактивное падение магнитного потенциала, а $\dot{\Phi}_m z_\mu = \dot{\Phi}_m \sqrt{R_\mu^2 + X_\mu^2}$ — полное падение магнитного потенциала, равное м. д. с. обмотки. Поток определяется формулой

$$\Phi_m = \frac{I_m \omega}{\sqrt{R_\mu^2 + X_\mu^2}} = \frac{I_m \omega}{z_\mu}, \quad (5-31)$$

Угол ψ определяется равенством $\operatorname{tg} \psi = X_\mu / R_\mu$.

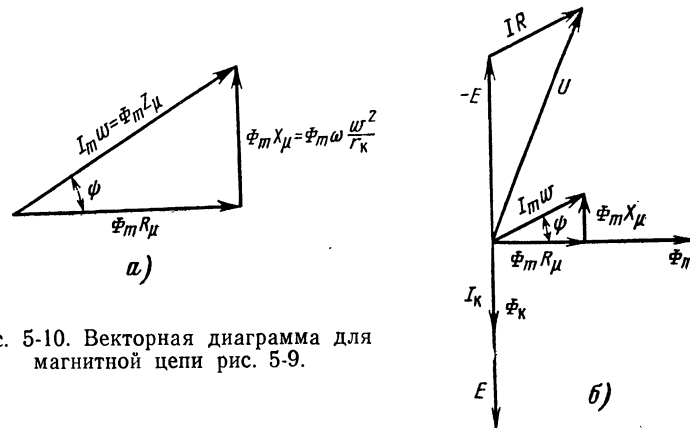


Рис. 5-10. Векторная диаграмма для магнитной цепи рис. 5-9.

Векторная диаграмма электрических величин дана на рис. 5-10, б. Напряжение сети U равно векторной сумме противо- э. д. с. $-E$ и активного падения напряжения в катушке IR . Фаза тока в обмотке I_m определяется углом потерь ψ .

Таким образом, короткозамкнутая обмотка с чисто активным сопротивлением в схеме замещения представ-

ляется реактивным магнитным сопротивлением. Если $r_k = \infty$ (т. е. обмотка разомкнута), то $X_\mu = 0$. Если $r_k = 0$, то $X_\mu = \infty$ и магнитный поток через такую обмотку пройти не может. Если обмотка имеет и активное r_k и индуктивное X_k сопротивления, то согласно [Л. 5-2]

$$X_{\mu k} = r_k \frac{\omega \omega_k^2}{r_k^2 + X_k^2}; \quad R_{\mu k} = X_k \frac{\omega \omega_k^2}{r_k^2 + X_k^2}.$$

б) Магнитная цепь с потерями в стали. При протекании потока по магнитопроводу в нем создаются активные потери за счет вихревых токов и гистерезиса. Эти потери в схеме замещения магнитной цепи могут быть представлены потерями в фиктивной короткозамкнутой обмотке, имеющей только активное сопротивление. Параметры этой обмотки находятся из условия равенства потерь в стали и потерь в этой короткозамкнутой обмотке.

При синусоидальном изменении потока

$$E_{k3} = 4,44 f \omega_{k3} \Phi_m = \frac{\omega \omega_{k3} \Phi_m}{\sqrt{2}}, \quad (5-32)$$

откуда
$$\omega_{k3} = \frac{E_{k3} \sqrt{2}}{\omega \Phi_m}.$$

Из условия равенства потерь можно записать:

$$P_{ст} = \frac{E_{k3}^2}{r_{k3}}; \quad r_{k3} = \frac{E_{k3}^2}{P_{ст}}. \quad (5-33)$$

Воспользовавшись (5-30), (5-32) и (5-33), можно получить:

$$X_{\mu ст} = \frac{\omega \omega_{k3}^2}{r_{k3}} = \frac{2P_{ст}}{\omega \Phi_m^2}. \quad (5-34)$$

Таким образом, зная активные потери в стали и магнитный поток в сечении, можно определить $X_{\mu ст}$, учитывающее в схеме замещения потери от вихревых токов и гистерезиса.

Кроме реактивного магнитного сопротивления, сталь обладает также активным магнитным сопротивлением R_μ .

Аналогично электрической цепи можно ввести понятия удельных активного ρ_R , реактивного ρ_X и полного ρ_Z магнитных сопротивлений:

$$R_\mu = \rho_R l/S; \quad (5-35)$$

$$X_{\mu ст} = \frac{2P_{ст}}{\omega \Phi_m^2} = \frac{2P_0 \gamma l S}{\omega B_m^2 S^2} = \rho_X \frac{l}{S}; \quad (5-36)$$

$$z_\mu = \rho_Z l/S, \quad (5-37)$$

где P_0 — потери на единицу массы сердечника;
 γ — плотность;
 $l; S$ — длина и сечение сердечника.

Зависимость ρ_R ; ρ_X и ρ_Z от индукции для стали Э12 представлена на рис. 5-11. Так как

$$z_\mu = \sqrt{R_\mu^2 + X_\mu^2}, \text{ то } \rho_Z = \sqrt{\rho_R^2 + \rho_X^2}.$$

Если задан поток Φ_m и известны размеры участка S и l , то сначала находят индукцию $B_m = \frac{\Phi_m}{S}$, а затем по кривым, аналогичным рис. 5-11, определяют ρ_R ; ρ_X ; ρ_Z . Воспользовавшись (5-35) — (5-37), можно вычислить магнитные сопротивления R_μ ; X_μ ; z_μ .

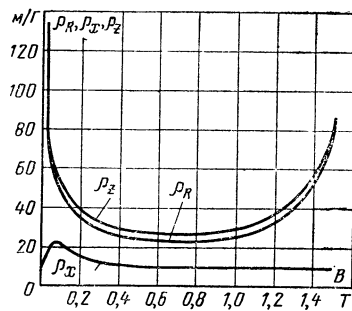


Рис. 5-11. Зависимость удельных магнитных сопротивлений ρ_R , ρ_X , ρ_Z от индукции.

Расчет магнитной цепи переменного тока с учетом активных потерь ведется с помощью двух уравнений Кирхгофа в комплексной форме методом последовательных приближений.

Если заданы напряжение на катушке, ее активное сопротивление и размеры магнитной цепи, то вначале находят потоки без учета сопротивления стали и активного сопротивления катушки из (5-21), а затем составляется схема замещения магнитной цепи, в которой вводятся активное и реактивное магнитные сопротивления стали, найденные по потоку первого приближения. Затем снова проводится расчет и

находятся потоки второго приближения, после чего составляется схема замещения с учетом потока второго приближения и т. д. Расчет производится до тех пор, пока потоки в рабочем зазоре двух соседних приближений будут отличаться друг от друга не более чем на 10%.

5-4. Обмотки электромагнитов

В результате расчета магнитной цепи определяется м. д. с. обмотки. Обмотка должна быть рассчитана таким образом, чтобы, с одной стороны, обеспечить требуемую м. д. с., а с другой — чтобы ее максимальная температура не превышала допустимой для используемого класса изоляции.

В зависимости от способа включения различают обмотки напряжения и обмотки тока. В первом случае

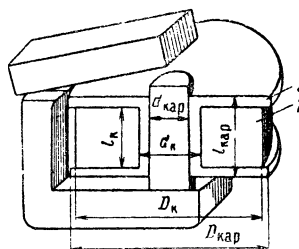
напряжение, приложенное к обмотке, постоянно по своему действующему значению. Во втором — сопротивление обмотки электромагнита во много раз меньше сопротивления остальной части цепи.

а) **Расчет обмотки электромагнита постоянного тока.** Эскиз обмотки представлен на рис. 5-12.

Если требуется рассчитать и спроектировать обмотку напряжения, то должны быть заданы напряжение U и м. д. с. $I\omega$. Сечение провода q находим, исходя из потребной м. д. с.:

$$I\omega = \frac{U}{R} \omega = \frac{Uq\omega}{\rho l_{\text{ср}} \omega} = \frac{Uq}{\rho l_{\text{ср}}} \quad (5-38)$$

Рис. 5-12. К расчету обмотки электромагнита.



или

$$q = \frac{I\omega \rho l_{\text{ср}}}{U}, \quad (5-39)$$

где ρ — удельное сопротивление;

$l_{\text{ср}}$ — средняя длина витка;

R — сопротивление обмотки, равное $\rho l_{\text{ср}} \omega / q$.

Из уравнения (5-38) следует, что при неизменной средней длине витка $l_{\text{ср}} = \pi \frac{d_k + D_k}{2}$ и заданном ρ м. д. с.

определяется произведением Uq . Если при неизменном напряжении и средней длине витка требуется увеличить м. д. с., то необходимо взять провод большего сечения. При этом обмотка будет иметь меньшее число витков.

После определения сечения провода с помощью таблиц сортаментов находится ближайший стандартный диаметр провода.

Мощность, выделяющаяся в обмотке электромагнита, равна:

$$P = U^2/R, \text{ а } R = \rho l_{\text{ср}} \omega / q.$$

Число витков обмотки при заданном сечении катушки Q_k определяется коэффициентом заполнения по меди f_m :

$$\omega = f_m Q_k / q. \quad (5-40)$$

$$\text{Тогда} \quad P = \frac{U^2 q^2}{\rho l_{\text{ср}} f_{\text{м}} Q_{\text{к}}} = (I\omega)^2 \frac{\rho l_{\text{ср}}}{f_{\text{к}} Q_{\text{к}}}. \quad (5-41)$$

Таким образом, мощность, потребляемая обмоткой, прямо пропорциональна квадрату м. д. с. и обратно пропорциональна коэффициенту заполнения $f_{\text{м}}$ и площади окна $Q_{\text{к}}$. Значения $f_{\text{м}}$ приведены в [Л. 5-6].

Если выполнить обмотку проводом данного диаметра, то согласно (5-38) м. д. с. обмотки не будет зависеть от способа укладки провода. При «дикий» (нерядовой) намотке число витков при том же окне уменьшится по сравнению с рядовой, ток пропорционально увеличится, а м. д. с. обмотки остается без изменения. Мощность потребляемая обмоткой, при «дикий» намотке увеличится, поскольку уменьшится коэффициент $f_{\text{м}}$.

При изменении питающего напряжения и сохранении размера окна обмотки должно иметь место равенство $U_1 q_1 = U_2 q_2$, так как ρ и $l_{\text{ср}}$ остаются неизменными. При этом согласно (5-38) м. д. с. обмотки останется без изменения. Поскольку при переходе с одного напряжения на другое изменяется диаметр провода (а следовательно, и толщина изоляции), коэффициент заполнения обмотки $f_{\text{м}}$ также изменяется. Воспользовавшись (5-41), получим:

$$P_1 f_1 = P_2 f_2.$$

Если $U_1 < U_2$, то при переходе с напряжения U_1 на U_2 диаметр провода согласно (5-38) уменьшится. При меньшем диаметре провода из-за возросшей относительной толщины изоляции коэффициент заполнения уменьшится. Следовательно, при переходе на более высокое напряжение мощность, потребляемая обмоткой, увеличивается.

Для ориентировочной оценки нагрева обмотки можно пользоваться следующими рекомендациями. Опытным путем установлено, что в обмотке, выполненной проводом ПЭЛ на изоляционном каркасе, максимальная температура не превысит 105°C , если на каждую единицу выделяемой мощности будет приходиться определенная боковая поверхность ($\sigma_0 = S_{\text{бок}}/P$ — удельная охлаждающая боковая поверхность). Величина этой поверхности зависит от геометрии обмотки:

$$\left. \begin{array}{ll} \text{при } l/D < 1 & \sigma_0 \geq 8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{Вт}; \\ \text{при } l/D = 1 & \sigma_0 \geq 10 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{Вт}; \\ \text{при } l/D > 1 & \sigma_0 \geq 12 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{Вт}, \end{array} \right\} \quad (5-42)$$

где l — длина обмотки;
 D — внешний диаметр обмотки.

Если после расчета окажется, что $\sigma < \sigma_0$, то это значит, что температура обмотки будет выше допустимой. Воспользовавшись (5-41), можно получить:

$$I\omega = \sqrt{\frac{PQ_k f_m}{l_{cp} \rho}}. \quad (5-43)$$

Если при требуемой м. д. с. мощность P получается больше, чем $S_{бок}/\sigma_0$, то необходимо либо уменьшить м. д. с. обмотки, либо увеличить площадь обмоточного окна Q_k .

После приближенной оценки теплового режима обмотки необходимо определить максимальную температуру внутри по формулам § 2-4, 2-9.

Для обмотки тока исходными величинами для расчета являются м. д. с. $I\omega$ и ток цепи I_n . Число витков обмотки находится из выражения

$$\omega = I\omega / I_n. \quad (5-44)$$

Сечение провода можно выбрать исходя из рекомендуемой плотности тока, равной 2—4 А/мм² — для продолжительного режима работы, 5—12 А/мм² — повторно-кратковременного режима работы, 13—30 А/мм² — для кратковременного режима работы. Эти величины можно увеличить примерно в 2 раза при сроке службы до 500 ч.

Окно, занимаемое рядовой обмоткой, определяется числом витков и диаметром провода d :

$$Q_k = \omega \pi d^2 / 4 f_m.$$

Зная Q_k , можно определить среднюю длину витка, сопротивление обмотки и потери в ней. После этого может быть проведена оценка нагрева с помощью (5-42).

б) Расчет обмотки электромагнитов переменного тока. Исходными данными для расчета обмотки напряжения являются амплитуда м. д. с., амплитуда потока и напряжение. Напряжение сети уравнивается активным и реактивным падениями напряжения (см. § 5-3, а):

$$U^2 = (IR)^2 + (4,44 f \omega \Phi_m)^2. \quad (5-45)$$

Поскольку ток и сопротивление могут быть рассчитаны только после определения числа витков, то (5-45)

не позволяет сразу найти все параметры обмотки. Задача решается методом последовательных приближений.

Так как активное падение напряжения значительно меньше реактивного, то в начале расчета можно положить $R=0$. Тогда число витков обмотки равно:

$$\omega = \frac{U}{4,44 f \Phi_m}.$$

Так как при расчете ω мы пренебрегаем активным падением напряжения, то действительное число витков должно быть несколько меньше. Обычно берут

$$\omega = (0,7 \div 0,8) \frac{U}{4,44 f \Phi_m}.$$

Тогда
$$I = \frac{I_m \omega}{\sqrt{2} \omega}.$$

Сечение провода обмотки определяют, задавшись плотностью тока (§ 5-4, а).

Выбрав стандартный диаметр и способ укладки, находим коэффициент заполнения f_m и площадь окна катушки Q_k из (5-40):

$$Q_k = \omega \frac{\pi d^2}{4 f_m}.$$

После этого определяем среднюю длину витка l_{cp} и активное сопротивление обмотки

$$R = \rho l_{cp} \omega / q.$$

Теперь производим проверку выбранных параметров. Если после подстановки полученных данных в уравнение (5-45) левая часть уравнения отличается от правой более чем на 10%, то необходимо варьировать число витков до тех пор, пока не получится удовлетворительное совпадение.

После расчета активного сопротивления производится проверка обмотки на нагрев. Расчет ведется так же, как и для обмоток постоянного тока. Характерной особенностью здесь является нагрев магнитопровода за счет потерь от вихревых токов и гистерезиса. Отвод тепла, выделяемого в самой обмотке через сердечник, затруднен. Поэтому точка с максимальной температурой лежит на внутреннем радиусе обмотки. Из-за плохого охлаж-

дения обмотки через сердечник в обмотке стремятся развивать поверхность торцов, через которые может отдаваться значительная часть тепла.

Если полное сопротивление обмотки электромагнита при любом рабочем зазоре значительно меньше полного сопротивления цепи, то ток в обмотке электромагнита не зависит от положения якоря. Расчет таких обмоток ведется так же, как и для обмотки тока постоянного тока. Закон изменения потока в рабочем зазоре такого электромагнита аналогичен закону в электромагните постоянного тока, поскольку электромагнит работает при постоянной м. д. с.

Полное падение напряжения на обмотке электромагнита равно:

$$\Delta U = \sqrt{(IR)^2 + (4,44 f w \Phi_m)^2}.$$

Если электромагнит с обмоткой напряжения питается от источника с напряжением, отличным от номинального, и сила тяги должна остаться той же, то обмоточные данные должны быть соответственно изменены. Значение м. д. с. и угол сдвига между током и напряжением при этом также считаются неизменными. Согласно [Л. 3-2] должны быть соблюдены следующие соотношения:

$$\text{а) } \frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2}; \text{ б) } U_1 q_1 = U_2 q_2; \text{ в) } Q_1 f_1 = Q_2 f_2. \quad (5-46)$$

Полная мощность обмоток при переходе с одного напряжения на другое при соблюдении указанных условий не изменяется, так как $U_1 I_1 = U_2 I_2$.

5-5. Магнитные материалы для электромагнитов постоянного и переменного тока

При заданном потоке падение магнитного потенциала уменьшается с уменьшением магнитного сопротивления. Так как сопротивление обратно пропорционально магнитной проницаемости материала, при данном потоке магнитная проницаемость должна быть возможно выше. Это позволяет уменьшить м.д.с. обмотки и мощность, необходимую для срабатывания электромагнита; уменьшаются размеры обмоточного окна и всего электромагнита. Уменьшение м.д.с. при прочих неизменных параметрах уменьшает температуру обмотки.

Вторым важным параметром материала является индукция насыщения. Сила, развиваемая электромагнитом, пропорциональна квадрату индукции (§ 5-6). Поэтому чем больше допустимая индукция, тем больше развиваемая сила при тех же размерах.

После того как обмотка электромагнита обесточивается, в системе существует остаточный поток, который определяется коэрцитивной силой материала и проводимостью рабочего зазора (§ 5-8). Остаточный поток может привести к залипанию якоря. Во избежание этого явления требуется, чтобы материал обладал низкой коэрцитивной силой (малой шириной петли гистерезиса).

Существенными требованиями являются низкая стоимость материала и его технологичность.

В электромагнитах переменного тока для компенсации активных потерь в стали (§ 5-3) приходится затрачивать дополнительную энергию. Это приводит к увеличению намагничивающего тока в обмотке аппарата. В связи с этим материалы, используемые для электромагнитов переменного тока, должны иметь малые потери от вихревых токов и гистерезиса. Магнитопроводы для таких электромагнитов делаются шихтованными, причем чем выше частота тока, тем меньше должна быть толщина листа. Пластины магнитопровода изготавливаются из листовой стали штамповкой. Для быстродействующих электромагнитов постоянного тока также применяются шихтованные магнитопроводы, так как при этом уменьшаются вихревые токи, замедляющие нарастание потока (§ 5-7).

Наряду с указанными свойствами магнитные характеристики материалов должны быть стабильны (не изменяться от температуры, времени, механических ударов).

Подробные данные о материалах, применяемых в электрических аппаратах, приведены в [Л. 5-2, 5-3].

5-6. Сила тяги электромагнитов

а) **Энергетический баланс электромагнита постоянного тока.** Рассмотрим процесс возникновения магнитного поля в простейшем клапанном электромагните

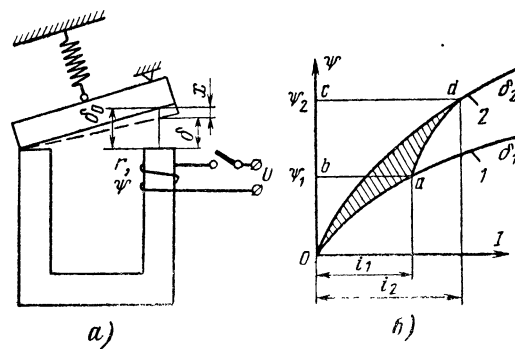


Рис. 5-13. К расчету силы тяги электромагнита.

(рис. 5-13, а). После включения цепи напряжение источника уравнивается активным падением напряжения и противо-э. д. с. самоиндукции:

$$U = ir + d\Psi/dt.$$

Умножив обе части уравнения на $i dt$, получим:

$$Ui dt = i^2 r dt + i d\Psi.$$

Произведя интегрирование, получим:

$$\int_0^t Ui dt = \int_0^t i^2 r dt + \int_0^{\Psi} i d\Psi, \quad (5-47)$$

где Ψ — потокосцепление к моменту времени t .

Левая часть равенства представляет энергию, которая затрачена источником питания. Первый член правой части есть потери энергии в активном сопротивлении цепи, второй — энергия, затраченная на создание магнитного поля. До тех пор, пока сила, развиваемая электромагнитом, меньше силы пружины, якорь электромагнита неподвижен, и потокосцепление нарастает при неизменном значении рабочего зазора δ_1 . Зависимость $\Psi=f(i)$ при этом зазоре представлена кривой 1 рис. 5-13, б.

Допустим, что при достижении значения потокосцепления Ψ_1 сила электромагнита стала больше силы пружины и якорь переместился в положение, при котором рабочий зазор стал равен δ_2 . Так как при меньшем зазоре проводимость рабочего зазора возрастает, то потокосцепление увеличится до значения Ψ_2 . Ток при этом увеличится до значения i_2 . Если изобразить зависимость $\Psi=f(i)$ при зазоре δ_2 , то получим кривую 2 рис. 5-13, б. До начала трогания якоря энергия магнитного поля, запасенная в цепи, равна:

$$A_1 = \int_0^{\Psi_1} i d\Psi = m_i m_{\Psi} S_{Oab},$$

где m_i — масштаб по оси тока, А/мм; m_{Ψ} — масштаб по оси потокосцепления, Вб/мм; S_{Oab} — площадь криволинейного треугольника Oab , мм².

При движении якоря потокосцепление изменится от Ψ_1 до Ψ_2 . Энергия магнитного поля при этом возрастает на A_2 :

$$A_2 = \int_{\Psi_1}^{\Psi_2} i d\Psi = m_i m_{\Psi} S_{abcd},$$

где S_{abcd} — площадь криволинейной трапеции.

При переходе от зазора δ_1 к зазору δ_2 якорь электромагнита совершил механическую работу A_3 .

Энергия, накопленная в магнитном поле, к концу хода равна A_4 :

$$A_4 = \int_0^{\Psi_2} i d\Psi = m_i m_\Psi S_{Ocd}.$$

На основании закона сохранения энергии можно написать:

$$A_1 + A_2 = A_3 + A_4. \quad (5-48)$$

Тогда механическая работа, совершенная якорем электромагнита, определяется из (5-48):

$$A_3 = A_1 + A_2 - A_4. \quad (5-49)$$

Согласно рис. 5-13, б эта энергия равна:

$$A_3 = m_i m_\Psi (S_{Oab} + S_{abcd} - S_{Ocd}) = m_i m_\Psi S_{Oad}. \quad (5-50)$$

б) Расчет силы тяги электромагнита постоянного тока. Средняя сила на ходе якоря от δ_1 до δ_2 равна:

$$F_{\text{ср}} = \frac{A_3}{\Delta x} = - \frac{A_3}{\Delta \delta} = - \frac{A_3}{\delta_2 - \delta_1},$$

где Δx — перемещение якоря, а $\Delta \delta$ — уменьшение зазора.

Следует учитывать, что $x = \delta_0 - \delta$ (рис. 5-13, а). Тогда $dx = -d\delta$.

Для расчета силы, развиваемой электромагнитом, необходимо определить механическую работу A_3 , совершаемую электромагнитом при небольшом перемещении якоря, после чего разделить эту работу на изменение зазора, что в пределе дает:

$$F = - dA_3/d\delta. \quad (5-51)$$

Сила F действует в сторону уменьшения зазора.

Очевидно, что для каждого элементарного перемещения якоря можно определить свое значение A_3 и найти среднюю силу, развиваемую на данном участке хода якоря.

Ряд электромагнитов работают при неизменном токе в обмотке, равном установившемуся значению I_y . В этом случае будем иметь процесс, отображаемый рис. 5-14.

Зависимость тяговой силы электромагнита от величины рабочего зазора при неизменном значении тока в его обмотке называется статической тяговой характеристикой электромагнита.

Для зазора $\delta_{1cp} = \frac{\delta_1 + \delta_2}{2}$ силу можно найти с помощью формулы

$$F_1 = - \frac{m_i m_{\Psi} S_{Oab}}{\delta_2 - \delta_1}.$$

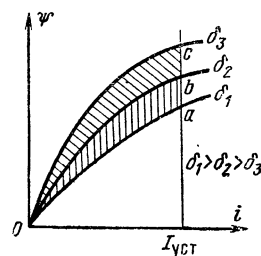


Рис. 5-14. Определение статической тяговой характеристики электромагнита.

Аналогично определяется сила

$$F_2 = - \frac{m_i m_{\Psi} S_{Obc}}{\delta_3 - \delta_2},$$

которая развивается при среднем зазоре

$$\delta_{2cp} = \frac{\delta_2 + \delta_3}{2}.$$

На готовом электромагните статическая характеристика может быть легко снята. Для этого в воздушный зазор электромагнита ставится немагнитная прокладка, после чего к электромагниту подводится напряжение. С помощью динамометра постепенно увеличивается противодействующая сила до тех пор, пока якорь не оторвется от сердечника. Эта сила в момент отрыва будет равна статическому усилию при зазоре, равном толщине прокладки. После этого меняют толщину прокладки и опыт повторяют при новом значении зазора.

Сила, развиваемая электромагнитом, может быть рассчитана с помощью формулы Максвелла, полученной им на основании анализа магнитного поля, действующего на поверхности полюсов [Л. 5-1, 5-5]. Если поле в рабочем зазоре равномерно и полюсы не насыщены, то

формула Максвелла для силы в одном зазоре имеет вид:

$$F = \frac{1}{2\mu_0} B_\delta^2 S = \frac{1}{2} \frac{\Phi_\delta^2}{\mu_0 S}. \quad (5-52)$$

в) **Аналитический расчет силы для ненасыщенных электромагнитов.** Исходя из закона сохранения энергии, можно показать, что энергия, полученная магнитным полем при элементарном перемещении якоря, равна механической работе, произведенной якорем, и изменению запаса электромагнитной энергии [Л.1-1]:

$$i d\Psi = F dx + dW_m, \quad (5-53)$$

где $i d\Psi$ — элементарная энергия, полученная полем при перемещении якоря;

$F dx$ — элементарная работа, произведенная якорем;

dW_m — приращение магнитной энергии.

Из уравнения (5-53) легко получить:

$$F = i \frac{d\Psi}{dx} - \frac{dW_m}{dx}.$$

Учитывая, что $dx = -d\delta$ и $W_m = \frac{1}{2} i\Psi$ (для линейной магнитной цепи), получаем:

$$F = -i \frac{d\Psi}{d\delta} + \frac{1}{2} i \frac{d\Psi}{d\delta} + \frac{1}{2} \Psi \frac{di}{d\delta}. \quad (5-54)$$

Для статической тяговой характеристики $\frac{di}{d\delta} = 0$, так как ток в цепи не меняется. Тогда

$$F = -\frac{1}{2} i \frac{d\Psi}{d\delta}. \quad (5-55)$$

Для клапанного электромагнита (рис. 5-5) потоко-сцепление зависит от рабочего потока и потока рассеяния:

$$\Psi = \Psi_\delta + \Psi_\sigma.$$

Поскольку цепь линейна (пренебрегаем насыщением стали), то потоко-сцепление Ψ_δ , обусловленное рабочим потоком Φ_δ , равно:

$$\Psi_\delta = \Phi_\delta w = I w^2 G_\delta.$$

Потоко сцепление Ψ_σ , обусловленное потоком рассеяния, в свою очередь равно

$$\Psi_\sigma = \int_0^l \frac{w}{l} \frac{Iw}{l} x^2 g dx = Iw^2 \frac{gl}{3}.$$

Подставив Ψ_δ и Ψ_σ в (5-55), получим:

$$F = -\frac{1}{2} (Iw)^2 \left[\frac{dG_\delta}{d\delta} + \frac{1}{3} \frac{d(gl)}{d\delta} \right].$$

Поскольку проводимость рассеяния от зазора δ не зависит, то $d(gl)/d\delta = 0$, и сила, развиваемая электромагнитом, равна:

$$F = -\frac{1}{2} (Iw)^2 \frac{dG}{d\delta}. \quad (5-56)$$

Если известна аналитическая зависимость $G_\delta = f(\delta)$, то $dG_\delta/d\delta$ находится дифференцированием. В уравнение (5-56) подставляется $dG_\delta/d\delta$ для интересующего нас значения зазора δ . Если G_δ определяется в результате графического построения поля, то вначале производится расчет G_δ для ряда положений якоря, после чего графически строится зависимость $G_\delta = f(\delta)$ и производится графическое дифференцирование.

При достаточно малом зазоре для системы рис. 5-5

$$G_\delta = \frac{\mu_0 S}{2\delta}.$$

Тогда сила F равна:

$$F = \frac{1}{4} (Iw)^2 \frac{\mu_0 S}{\delta^2} = \pi \cdot 10^{-7} (Iw)^2 \frac{S}{\delta^2}. \quad (5-57)$$

Согласно (5-57) сила, развиваемая электромагнитом, пропорциональна квадрату м. д. с. обмотки, площади полюса и обратно пропорциональна квадрату величины зазора. Зависимость $F = f(\delta)$ при неизменной м. д. с. представлена на рис. 5-15 (кривая 1). По мере уменьшения δ сила резко возрастает, причем при $\delta = 0$ сила принимает бесконечное значение. В действительности при δ , приближающемся к нулю, в магнитной цепи возрастает поток и увеличивается падение магнитного потенциала в маг-

нитепроводе, причем только часть м. д. с. оказывается приложенной к воздушному зазору. При выводе (5-57) мы считали, что вся м. д. с. приложена к воздушному зазору.

Кривая 2 на рис. 5-15 изображает зависимость $F = f(\delta)$, снятую экспериментально. Сравнение этих кривых показывает, что при больших зазорах, когда поток в системе мал и падением магнитного потенциала в сердечнике можно пренебречь,

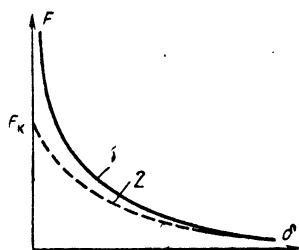


Рис. 5-15. Статическая тяговая характеристика.

расчетная и экспериментальная кривые почти совпадают. При малых зазорах сила, развиваемая электромагнитом, имеет конечное значение.

Указанное расхождение кривых 1 и 2 можно хорошо пояснить, если воспользоваться формулой Максвелла (5-52). При $\delta = 0$ вся м. д. с. тратится на проведение магнитного потока по цепи, причем поток

определяется ее магнитным сопротивлением. Если пренебречь потоком рассеяния и принять, что магнитная цепь имеет всюду неизменное сечение, то напряженность поля $H = I\omega / l_{ст}$. Индукция B находится по кривой намагничивания, а сила — по формуле (5-52). Так как поток имеет конечное значение, то и сила достигает значения F_k .

Многочисленные исследования [Л.5-1, 5-2] показали, что для расчета силы в насыщенных электромагнитах можно пользоваться формулой (5-56), но только вместо $I\omega$ берется $(I\omega)_\delta$ — падение магнитного потенциала в рабочем зазоре:

$$F = -\frac{1}{2} (I\omega)_\delta^2 \frac{dG_\delta}{d\delta}. \quad (5-58)$$

Значение $(I\omega)_\delta$ находят в результате расчета магнитной цепи.

Поскольку формула Максвелла (5-52) учитывает реальную индукцию между полюсами, то она также может быть использована при малом δ при условии, что поле в зазоре равномерно и вектор индукции перпендикулярен к поверхности полюса.

Характеристики силы от зазора $F(\delta)$ или момента от угла поворота $M(\alpha)$ могут меняться в широких пределах путем изменения формы полюсов и конструктивного исполнения (рис. 5-16) [Л.5-1, 3-4]. Выбор типа электромагнита диктуется характеристикой противодействующих сил или противодействующего момента.

В броневом электромагните (рис. 5-7) при перемещении якоря меняется поток рассеяния, что вызывает появ-

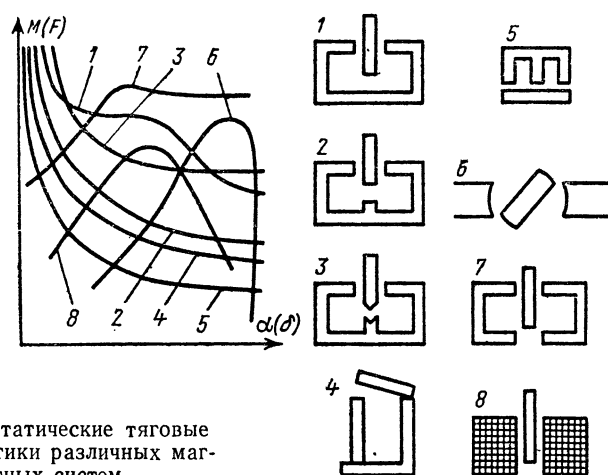


Рис. 5-16. Статические тяговые характеристики различных магнитных систем.

ление дополнительной составляющей силы за счет производной потокоцепления рассеяния по зазору. Воспользовавшись (5-18) и (5-55), получим:

$$F = -\frac{1}{2} (Iw)^2 \left[\frac{dG_\delta}{d\delta} + \frac{d}{dz} \frac{gZ^3}{3l^3} \frac{dZ}{d\delta} + \frac{d}{dZ} \frac{gm^3}{3l^3} \frac{dZ}{d\delta} \right]. \quad (5-59)$$

Согласно рис. 5-7, а $Z=l-m-\delta$. Так как при изменении зазора высота стопа m остается постоянной, сила, развиваемая электромагнитом броневых типа, без учета магнитного сопротивления стали в конечном виде получается равной:

$$F = -\frac{1}{2} (Iw)^2 \left[\frac{dG_\delta}{d\delta} - g \left(\frac{Z}{l} \right)^2 \right]. \quad (5-60)$$

Если сравнить (5-60) с (5-56) для клапанного электромагнита, то можно видеть, что в броневом электромагните создается дополнительная сила за счет потоков

рассеяния. В длинноходовых электромагнитах потоки рассеяния могут создавать до половины общего усилия. Благодаря этой особенности броневого электромагнита используются в тех случаях, когда требуется развить большое усилие и когда электромагнит должен иметь большой ход. При большом ходе начальное усилие создается в основном только за счет потоков рассеяния.

В том случае, когда падением потенциала в магнитопроводе пренебречь нельзя, так же как и в (5-58), необходимо учитывать не всю м. д. с., а только ту ее часть, которая приходится на рабочий зазор. Для точного расчета силы необходимо графически построить поле электромагнита для различных зазоров при различных токах и построить кривые $\Psi(i)$, после чего воспользоваться методом § 5-6, а.

г) **Сила тяги электромагнита переменного тока.** Рассмотрим задачу для клапанного электромагнита с двумя рабочими зазорами (рис. 5-8), сделав допущения: магнитное сопротивление стали, активное сопротивление обмотки и потери в стали равны нулю; напряжение, ток и поток меняются по синусоидальному закону.

В этом случае поток, а следовательно, потокосцепление не зависит от зазора ($d\Psi/d\delta=0$) (5-21). Тогда мгновенное значение силы по (5-54) равно:

$$F = \frac{1}{2} \Psi \frac{di}{d\delta}. \quad (5-61)$$

Но

$$i = I_m \sin \omega t; \quad (5-62)$$

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t; \quad (5-63)$$

$$\Psi = \Psi_m \sin \omega t. \quad (5-64)$$

Подставив (5-62) и (5-64) в (5-61), получим:

$$F = \frac{1}{2} \Psi_m \frac{dI_m}{d\delta} \sin^2 \omega t. \quad (5-65)$$

Поскольку Ψ_m и $dI_m/d\delta$ при данном зазоре δ не зависят от времени, можно записать:

$$\left. \begin{aligned} F &= F_m \sin^2 \omega t \\ \text{и} \\ F_m &= \frac{1}{2} \Psi_m \frac{dI_m}{d\delta} \end{aligned} \right\} \quad (5-66)$$

Производная $dI_m/d\delta$ может быть найдена графическим дифференцированием зависимости $I_m(\delta)$, которая получается из расчета магнитной цепи. Амплитуда потокоцепления $\Psi_m = \Phi_m w$ определяется приложенным напряжением из (5-21).

Силу F_m можно найти с помощью формулы Максвелла (5-52).

Для системы с двумя зазорами (рис. 5-9) получим:

$$F_m = 2 \frac{B_m^2}{2\mu_0} S = \frac{B_m^2 S}{\mu_0} = \frac{\Phi_m^2}{\mu_0 S}. \quad (5-67)$$

Мгновенное значение силы равно:

$$F = \frac{\Phi_m^2 \sin^2 \omega t}{\mu_0 S}.$$

Поскольку при изменении зазора амплитуды потока и индукции не изменяются, амплитуда силы от зазора не зависит. Однако если учесть активное сопротивление обмотки, то, как было показано в § 5-3, с ростом зазора поток в системе уменьшается, что приводит к уменьшению амплитуды силы.

Рассмотрим теперь изменение силы во времени. Согласно (5-66) сила изменяется во времени по следующему закону:

$$F = F_m \sin^2 \omega t.$$

Так как

$$\sin^2 \omega t = \frac{1 - \cos 2\omega t}{2},$$

то

$$F = \frac{F_m}{2} - \frac{F_m}{2} \cos 2\omega t. \quad (5-68)$$

Мгновенное значение силы пульсирует с двойной частотой по отношению к частоте тока. Среднее значение силы равно половине амплитудного значения;

$$F_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T F dt = \frac{F_m}{2}.$$

Для притяжения якоря необходимо, чтобы среднее значение силы было больше противодействующего усилия.

Изменение силы во времени отрицательно сказывается на работе электромагнита. В определенные моменты времени сила противодействующей пружины становится больше силы электромагнита, при этом происходит отрыв якоря от сердечника. По мере нарастания силы электро-

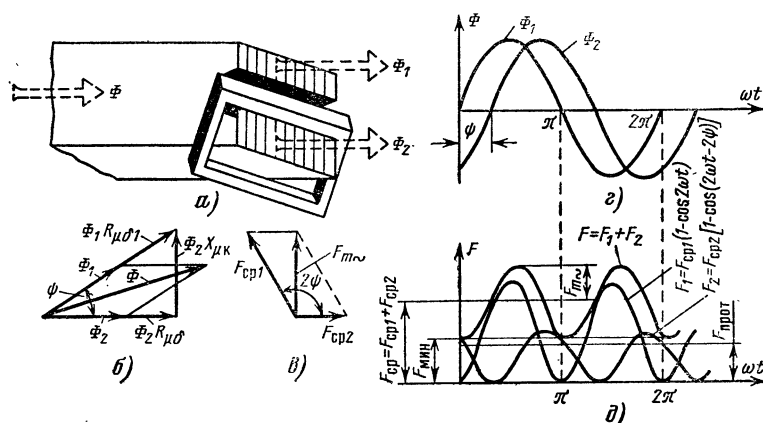


Рис. 5-17. Принцип работы электромагнита переменного тока с короткозамкнутым витком.

магнита снова происходит притяжение якоря. В результате якорь электромагнита будет непрерывно вибрировать, создавая шум и ненормальные условия работы механизма и контактов. В связи с этим принимаются меры для устранения вибраций.

В однофазных электромагнитах наибольшее распространение получило использование короткозамкнутого витка. Эскиз полюса такого электромагнита представлен на рис. 5-17, а. Наконечник полюса расщеплен, и на большую его часть насажен короткозамкнутый виток, выполненный из меди или алюминия. Для получения более ясной картины примем, что магнитное сопротивление стали равно нулю и существует только один рабочий зазор.

Благодаря наличию короткозамкнутого витка поток Φ_2 отстает по фазе относительно Φ_1 на угол ψ (рис. 5-17, б, в). Каждый из потоков под своей частью полюса создает свою силу F_1 и F_2 (рис. 5-17, д).

В верхней части полюса согласно (5-68) развивается сила F_1 , равная:

$$F_1 = F_{m1} \sin^2 \omega t = F_{cp1} - F_{cp1} \cos 2\omega t.$$

В нижней части полюса развивается сила F_2 , равная:

$$F_2 = F_{m2} \sin^2 (\omega t - \psi) = F_{cp2} - F_{cp2} \cos (2\omega t - 2\psi).$$

Результирующая сила, действующая на якорь, равна сумме сил F_1 и F_2 (рис. 5-17, д).

Если изобразить $F_{cp1} \cos 2\omega t$ и $F_{cp2} \cos (2\omega t - 2\psi)$ соответствующими векторами (рис. 5-17, е), то амплитуда переменной составляющей может быть найдена из векторной диаграммы

$$F_{m\sim} = \sqrt{F_{cp1}^2 + F_{cp2}^2 + 2F_{cp1} F_{cp2} \cos 2\psi}. \quad (5-69)$$

Обычно электромагнит проектируется таким образом, чтобы минимальная сила $F_{мин}$, развиваемая электромагнитом, была больше противодействующей силы:

$$F_{мин} = F_{cp} - F_{m\sim} > F_{прот}.$$

Очевидно, что чем меньше $F_{m\sim}$ тем меньше будет пульсация силы F . Из уравнения (5-69) следует, что $F_{m\sim}$ равно нулю при $F_{cp1} = F_{cp2}$ и $\psi = 90^\circ$.

Угол сдвига фаз ψ зависит от магнитного сопротивления зазора под витком $R_{\mu\delta 2}$ и параметров короткозамкнутого витка. Согласно § 5-3 имеем:

$$\operatorname{tg} \psi = \omega / r_k R_{\mu\delta 2}. \quad (5-70)$$

В соответствии с (5-70) угол $\psi = 90^\circ$ только при $r_k = 0$ ($R_{\mu\delta 2} \neq 0$). Это значит, что $X_{\mu k} = \omega / r_k = \infty$ и поток $\Phi_2 = 0$, что приводит к увеличению вибрации якоря. Условия $F_{cp1} = F_{cp2}$ и $\psi = 90^\circ$ выполнить невозможно. Для ненасыщенных систем наименьшее значение переменной составляющей имеет место при $\Phi_1 = \Phi_2$ и угле сдвига фаз $\psi = 60 \div 65^\circ$. При этом $F_{cp1} \neq F_{cp2}$. Поскольку короткозамкнутый виток уменьшает поток под нижней частью полюса, то с целью выравнивания потоков Φ_1 и Φ_2 этот виток охватывает большую часть полюса (обычно $2/3$).

Из (5-70) также следует, что чем больше рабочий зазор, а следовательно, и $R_{\mu\delta 2}$, тем меньше угол ψ . В связи с этим короткозамкнутый виток оказывает положитель-

ный эффект только при малых зазорах. При больших зазорах $R_{\delta 2} \gg \omega/r_k$ и угол $\psi = 0$. Следовательно, никакого сдвига фаз между потоками Φ_1 и Φ_2 не будет. Индуктивное сопротивление витка X_k также уменьшает угол ψ , поскольку при этом уменьшается $X_{\mu k}$ (§ 5-3). Обычно $\psi = 50 \div 60^\circ$.

При наличии трехфазного источника питания для уменьшения вибрации можно использовать естественный сдвиг потоков в этой системе.

Если принять, что в магнитном отношении все три фазы магнита симметричны и насыщение отсутствует, то сила, развиваемая под каждым полюсом, будет равна:

$$\begin{aligned} F_A &= F_m \sin^2 \omega t; \\ F_B &= F_m \sin^2 \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right); \\ F_C &= F_m \sin^2 \left(\omega t - \frac{4}{3} \pi \right). \end{aligned}$$

Результирующая сила, действующая на якорь, равна сумме этих сил:

$$F = \frac{3}{2} F_m. \quad (5-71)$$

Таким образом, в трехфазном электромагните результирующая сила, действующая на якорь, во времени не меняется. Однако и в этом электромагните вибрация якоря полностью не устраняется. При прохождении потока в каждой фазе через нуль сила, развиваемая этой фазой, также равна нулю. В результате точка приложения электромагнитной силы перемещается. Поскольку точка приложения противодействующей силы неизменна, то возникает перекачивание якоря, т. е. вибрация.

д) **Сравнение статических тяговых характеристик электромагнитов постоянного и переменного тока.** Для электромагнитов постоянного и переменного тока с двумя рабочими зазорами сила может быть рассчитана по формуле Максвелла (5-52) и (5-67):

$$F = \frac{B^2}{\mu_0} S \text{ или } F_m = \frac{B_m^2}{\mu_0} S.$$

Если площади полюсов электромагнитов одинаковы и одинаковы максимальные значения индукции в рабо-

чих зазорах, то максимальное значение силы в электромагните переменного тока равно силе, развиваемой электромагнитом постоянного тока. Поскольку среднее значение силы при переменном токе $F_{\text{ср}}$ равно $F_m/2$, то средняя сила, развиваемая электромагнитом переменного тока, в 2 раза меньше силы, развиваемой электромагнитом постоянного тока.

Таким образом, при той же затрате стали электромагнит постоянного тока развивает в 2 раза большее усилие, чем электромагнит переменного тока.

Теперь сравним характеристики $F=f(\delta)$ для электромагнитов постоянного и переменного тока клапанного типа. Как было показано (5-57), с ростом зазора сила изменяется обратно пропорционально квадрату зазора. В связи с этим клапанный электромагнит постоянного тока либо имеет малый рабочий ход якоря, чтобы развить большую силу, либо обмотка должна иметь большую м. д. с., чтобы создать необходимый поток при большом сопротивлении воздушного зазора.

В электромагните переменного тока средняя сила в 2 раза меньше, чем у электромагнита постоянного тока при том же значении индукции. Однако с ростом зазора, с одной стороны, растет магнитное сопротивление рабочего зазора, с другой — растет ток в обмотке, так что поток в рабочем зазоре падает только за счет активного падения напряжения в обмотке. Таким образом, электромагнит переменного тока как бы имеет автоматическую форсировку. При большем зазоре создается большая м. д. с. обмотки, которая обеспечивает необходимый поток в рабочем зазоре. В связи с этим электромагниты переменного тока могут работать при относительно больших ходах якоря.

5-7. Динамика и время срабатывания электромагнитов

а) **Время срабатывания.** До сих пор мы рассматривали только статические характеристики электромагнитов, когда по предположению в их обмотке проходит неизменный ток независимо от того, что якорь неподвижен либо движется. В таком режиме работают тормозные и удерживающие электромагниты. В большинстве электромагнитов процесс имеет динамический характер. В этом случае после включения обмотки электромагнита происходит нарастание потока в магнитной цепи до тех пор,

пока сила, развиваемая электромагнитом, не станет равна противодействующей силе. По достижении указанного равенства якорь начинает двигаться. При этом ток и поток изменяются по весьма сложному закону, определяемому параметрами электромагнита и противодействующей силой. После того как якорь придет в свое конечное положение, ток и поток в электромагните будут продолжать изменяться до тех пор, пока не достигнут установившегося значения.

Рассмотрим более подробно все эти три стадии для электромагнита постоянного тока с обмоткой напряжения. Первая стадия — с момента подачи напряжения до начала трогания якоря. После включения цепи напряжение источника уравнивается активным падением напряжения и противо-э. д. с. в обмотке:

$$U = iR + d\Psi/dt. \quad (5-72)$$

Так как в начальном положении якоря рабочий зазор имеет относительно большое значение, то магнитная цепь может считаться ненасыщенной, а индуктивность обмотки — постоянной величиной.

Поскольку потокосцепления $\Psi = Li$ и $L = \text{const}$, уравнение (5-72) можно преобразовать:

$$U = iR + L di/dt. \quad (5-73)$$

Решение этого уравнения относительно тока, как известно, имеет вид:

$$i = I_y(1 - e^{-t/T}), \quad (5-74)$$

где $I_y = U/R$ — установившееся значение тока;

$T = L/R$ — постоянная времени цепи.

Ток, при котором начинается движение якоря, называется током трогания $i_{\text{тр}}$, а время нарастания тока от нуля до $i_{\text{тр}}$ — временем трогания $t_{\text{тр}}$.

Для момента трогания (5-74) можно записать в виде

$$i_{\text{тр}} = I_y(1 - e^{-\frac{t_{\text{тр}}}{T}}). \quad (5-75)$$

Решив (5-75) относительно времени трогания, получим:

$$t_{\text{тр}} = \frac{L}{R} \ln \frac{1}{1 - \frac{i_{\text{тр}}}{I_y}}. \quad (5-76)$$

Таким образом, во-первых, время трогания пропорционально постоянной времени T , и, во-вторых, по мере приближения $i_{тр}$ к I_y время трогания быстро растет.

Как только начинается движение якоря, зазор уменьшается и индуктивность увеличивается, поскольку $L = \omega^2 G_\delta$. Так как при движении якоря индуктивность изменяется, то (5-72) примет вид:

$$U = iR + L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dt}. \quad (5-77)$$

При движении якоря $dL/dt > 0$, поэтому i и $\frac{di}{dt}$ начинают уменьшаться, поскольку сумма всех падений напряжения равна неизменному значению напряжения источника U . Зависимость тока от времени показана на рис. 5-18. Чем больше скорость движения якоря, тем больше спад тока. В точке b якорь достиг своего крайнего положения и уменьшение тока прекратилось. После остановки якоря ток будет увеличиваться до тех пор, пока не достигнет установившегося значения $I_y = U/R$, причем постоянная времени T_1 больше, чем T , поскольку конечный зазор δ_k меньше, чем начальный зазор δ_n . Так как в притянутом положении якоря рабочий зазор мал, то возможно насыщение магнитной системы, и закон нарастания тока может отличаться от экспоненциального, что необходимо учитывать при расчете времени установления потока.

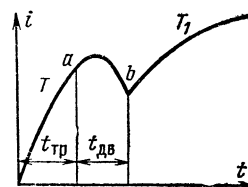


Рис. 5-18. Изменение тока в обмотке во времени при включении.

Имеется целый ряд методов расчета процессов в электромагните при движении якоря. Наиболее универсальным, пригодным и для насыщенных цепей является метод, предложенный Н. Е. Лысовым (§ 8-3) [Л. 5-7].

Как было показано на рис. 5-18, начало движения имеет место при токе $i_{тр} < I_y$. При движении якоря ток вначале еще немного нарастает, а затем падает до величины, меньшей тока трогания. Таким образом, в процессе движения якоря, когда зазор меняется от начального до конечного значения, величина тока в обмотке значительно меньше установившегося значения. Поскольку при

движении якоря во всех точках его пути ток в обмотке меньше установившегося значения, то и сила, развиваемая электромагнитом, в динамике значительно меньше, чем в статике при $I_y = \text{const}$. Расчет времени движения якоря с учетом реального тока в обмотке дан в § 8-3.

б) Ускорение и замедление срабатывания и отпуска электромагнита постоянного тока. Полное время срабатывания состоит из времени трогания и времени движения:

$$t_{\text{ср}} = t_{\text{тр}} + t_{\text{дв}}. \quad (5-78)$$

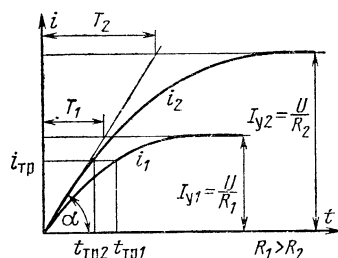


Рис. 5-19. Ток в обмотке электромагнита при различном активном сопротивлении цепи.

В большинстве случаев основную часть времени срабатывания составляет время трогания. Поэтому при ускорении и замедлении срабатывания воздействуют прежде всего на $t_{\text{тр}}$ (5-76).

Допустим, что ток трогания не изменяется (неизменна сила противодействующей пружины). Рассмотрим влияние активного сопротивления цепи при неизменной величине индуктивности и питающего напряжения. После включения электромагнита ток в обмотке изменяется по (5-74). Скорость нарастания тока равна:

$$\frac{di}{dt} = \frac{U}{L} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (5-79)$$

и при $t=0$

$$\left. \frac{di}{dt} \right|_{t=0} = \frac{U}{L}. \quad (5-80)$$

Таким образом, скорость нарастания тока в момент включения не зависит от активного сопротивления цепи и определяется только питающим напряжением и индуктивностью цепи. Изменение тока во времени для двух значений активного сопротивления цепи показано на рис. 5-19. Поскольку $R_1 > R_2$, $I_{y1} < I_{y2}$. Обе кривые в начале координат имеют общую касательную, так как $\left. \frac{di}{dt} \right|_{t=0}$ не зависит от активного сопротивления. Постоян-

ная времени для первого случая $T_1 = L/R_1$, для второго $T_2 = L/R_2$, так как $R_1 > R_2$, то $T_1 < T_2$. При уменьшении сопротивления R увеличивается установившийся ток и величина $\ln \frac{1}{1 - \frac{i_{тр}}{I_y}}$ уменьшается.

Можно показать, что логарифм уменьшается быстрее, чем растет постоянная времени T . В результате $t_{тр1} > t_{тр2}$ несмотря на то, что $T_1 < T_2$. Чем меньше активное сопротивление цепи, тем быстрее будет срабатывать электромагнит.

При уменьшении активного сопротивления обмотки растет мощность P , потребляемая ею:

$$P = U^2/R. \quad (5-81)$$

Для ограничения температуры нагрева необходимо развить у катушки поверхность охлаждения, т. е. ее размеры. Увеличение размеров обмотки потребует увеличения размеров магнитопровода.

Для ограничения размеров электромагнита в настоящее время широко применяется форсировка по схеме рис. 5-20. В отключенном положении резистор $R_{доб}$ шунтирован размыкающим контактом, связанным с якорем электромагнита. После замыкания контакта K малое сопротивление обмотки R способствует быстрому нарастанию тока до тока трогания. После начала движения якоря контакт размыкается и в цепь вводится сопротивление $R_{доб}$, благодаря чему ограничивается мощность P , выделяемая в обмотке:

$$P = \left(\frac{U}{R + R_{доб}} \right)^2 R. \quad (5-82)$$

Иногда для ускорения срабатывания резистор $R_{доб}$ шунтируют конденсатором C . В первый момент времени конденсатор уменьшает падение напряжения на этом резисторе, благодаря чему обеспечивается форсировка электромагнита. В установившемся режиме величина тока в цепи ограничивается резистором $R_{доб}$. Согласно

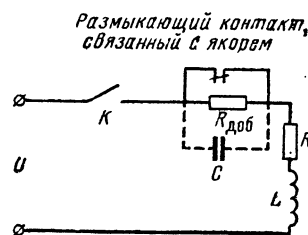


Рис. 5-20. Схема форсировки электромагнита.

[Л. 5-1] емкость конденсатора (мкФ) рекомендуется брать равной:

$$C = L \cdot 10^6 / R R_{\text{доб}}, \quad (5-83)$$

где L — индуктивность обмотки, Г;
 R — ее активное сопротивление, Ом;
 $R_{\text{доб}}$ — сопротивление добавочного резистора, Ом.

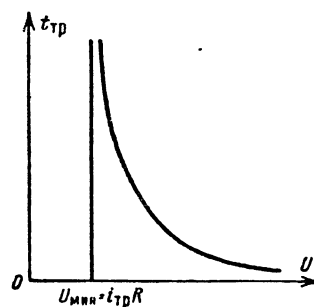


Рис. 5-21. Зависимость времени трогания от напряжения питания.

Теперь рассмотрим влияние питающего напряжения на время трогания. При уменьшении питающего напряжения уменьшается установившийся ток, что ведет к увеличению значения $\ln \frac{1}{1 - \frac{i_{\text{тр}}}{I_y}}$. При $i_{\text{тр}} = I_y$ время тро-

гания $t_{\text{тр}} = \infty$. С ростом напряжения время трогания уменьшается в соответствии с уменьшением $\ln \frac{1}{1 - \frac{i_{\text{тр}}}{I_y}}$.

Зависимость $t_{\text{тр}}(U)$ изображена на рис. 5-21.

Иногда возникает необходимость ускорить срабатывание уже готового электромагнита. Увеличение питающего напряжения без изменения активного сопротивления цепи ведет к ускорению срабатывания, но обмотка электромагнита может сгореть, если при номинальном значении питающего напряжения температура обмотки равна предельно допустимой. В этих случаях рекомендуется при повышении питающего напряжения в цепь включать добавочное сопротивление, чтобы величина установившегося тока оставалась неизменной и равной I_y . При этом ускорение срабатывания происходит за счет

уменьшения постоянной времени. Величина $\ln \frac{1}{1 - \frac{i_{тр}}{I_y}}$

остается неизменной.

На рис. 5-22 показано изменение токов в обмотке электромагнита при неизменном установившемся токе. Кривые показывают, что в данном случае чем больше постоянная времени, тем больше время трогания.

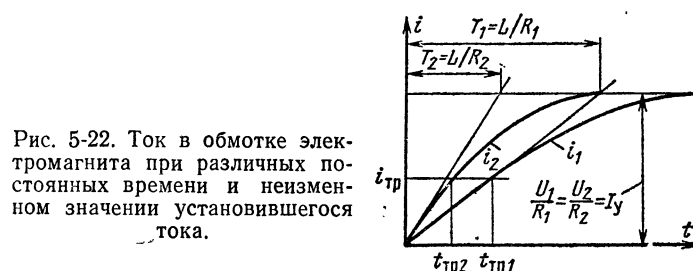


Рис. 5-22. Ток в обмотке электромагнита при различных постоянных времени и неизменном значении установившегося тока.

В заключение отметим, что при прочих равных условиях увеличение натяжения противодействующей пружины ведет к росту $i_{тр}$, при этом $t_{тр}$ также увеличивается.

Время отпущения электромагнита состоит из времени спада потока до потока отпущения, при котором сила электромагнита становится равной противодействующей силе и времени движения при отпущении.

В большинстве случаев время спада потока при отсутствии короткозамкнутых обмоток значительно меньше, чем время движения якоря при отпадании. Поэтому в основном считаются со временем движения. Для упрощения расчетов можно принять, что якорь и подвижные части двигаются равноускоренно под действием силы, равной средней силе пружины (§ 8-2).

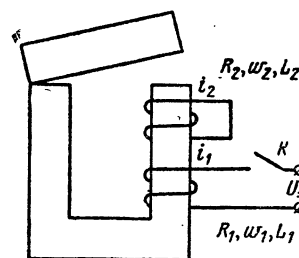


Рис. 5-23. Электромагнит с магнитным замедлением.

Для создания электромагнитов замедленного действия применяется короткозамкнутая обмотка или гильза. Эскиз электромагнита с короткозамкнутой обмоткой показан на рис 5-23.

При включении питающей обмотки в магнитной цепи нарастает поток. Этот поток наводит в короткозамкнутой обмотке э. д. с. Последняя вызывает ток такого направления, при котором поток короткозамкнутой обмотки направлен встречно намагничивающим. Результирующий поток равен разности этих потоков. Скорость нарастания потока уменьшается, а время трогания увеличивается.

Поток в системе нарастает во времени по экспоненте с суммарной постоянной времени $T_1 + T_2$ [Л. 5-12]:

$$\Phi = \Phi_y (1 - e^{-\frac{t}{T_1 + T_2}}), \quad (5-84)$$

где $\Phi_y = \frac{U}{R} \omega_1 G_\delta$ — установившийся поток; $T_1 = L_1/R_1$ и $T_2 = L_2/R_2$ — постоянные времени обмоток.

Если пренебречь потоками рассеяния, то индуктивности L_1 и L_2 согласно (5-14) равны:

$$L_1 = \omega_1^2 G_\delta; \quad L_2 = \omega_2^2 G_\delta. \quad (5-85)$$

Ввиду того, что при отпущенном якоре G_δ мало, суммарная постоянная времени $T_1 + T_2$ невелика и замедление электромагнита получается небольшим.

При отключении электромагнита с короткозамкнутой обмоткой можно считать, что ток в первичной обмотке практически мгновенно падает до нуля из-за быстрого нарастания сопротивления дугового промежутка в отключающем аппарате K .

Изменение потока определяется процессом затухания тока в короткозамкнутой обмотке. При спадании потока в короткозамкнутой обмотке ω_2 наводится э. д. с. и возникает ток, направленный так, что поток, создаваемый обмоткой ω_2 , препятствует изменению (уменьшению) потока в системе. Замедленное спадание потока создает в держку времени при отпуске.

Для вторичной короткозамкнутой обмотки ненасыщенной системы в этом случае можно записать:

$$0 = i_2 R_2 + L_2 \frac{di_2}{dt}. \quad (5-86)$$

Поскольку величина зазора уменьшилась, индуктивность при притяннутом якоре L'_2 больше, чем при отпущенном L_2 .

Решив (5-86) относительно тока, получим:

$$i_2 = I_{y2} e^{-t/T'_2}, \quad (5-87)$$

где

$$T'_2 = L'_2/R_2; \quad L'_2 = w_2^2 G'_\delta.$$

Умножив обе части (5-87) на G'_δ , после преобразования получим:

$$\Phi = \Phi_y e^{-t/T'_2}. \quad (5-88)$$

Благодаря тому, что рабочий зазор в притяннутом состоянии в десятки и даже сотни раз меньше, чем в отпущенном, $T'_2 \gg T_1 + T_2$ и можно получить время трогания при отпуске до 10 с, тогда как время трогания при притяжении составляет доли секунды.

При м. д. с., равной нулю, в цепи устанавливается поток, определяемый кривой размагничивания материала и воздушным зазором (§ 5-8). Этот остаточный поток может создавать силу притяжения, большую, чем сила, развиваемая пружиной. Произойдет залипание якоря. Для устранения залипания ставится немагнитная прокладка, снижающая величину остаточного потока.

В реальных конструкциях реле времени магнитная система при притяннутом положении якоря сильно насыщена.

Для насыщенной цепи справедливо уравнение

$$0 = i_2 R_2 + w_2 d\Phi/dt. \quad (5-89)$$

Решив уравнение относительно времени, получим:

$$t_{\text{тр}} = - \frac{w_2^2}{R_2} \int_{\Phi_0}^{\Phi_{\text{отп}}} \frac{d\Phi}{i_2 w_2},$$

где $\Phi_{\text{отп}}$ — поток, при котором сила, развиваемая пружиной, равна силе электромагнита.

Если рассеяние отсутствует, то $i_1 w_1 = i_2 w_2$, тогда $t_{\text{тр}}$ равно:

$$t_{\text{тр}} = - \frac{w_2^2}{R_2} \int_{\Phi_0}^{\Phi_{\text{отп}}} \frac{d\Phi}{i_1 w_1}. \quad (5-90)$$

Для определения значения интеграла рассчитывается зависимость потока в рабочем зазоре от м. д. с. После этого строится зависимость $1/i_1 \omega_1 = f(\Phi)$ и графическим интегрированием решается (5-90).

в) **Динамика электромагнитов переменного тока.** Рассмотрим магнитную цепь электромагнита, у которого магнитопровод не насыщен. Пусть включение происходит в нуль напряжения. В этом случае можно записать:

$$U_m \sin \omega t = iR + w d\Phi/dt. \quad (5-91)$$

Поскольку цепь линейна, ток можно выразить через поток

$$i = \Phi w/L. \quad (5-92)$$

Подставив (5-92) в (5-91), получим:

$$U_m \sin \omega t = \frac{R}{L} \Phi w + w \frac{d\Phi}{dt}.$$

Решив это уравнение относительно потока, найдем:

$$\Phi = \Phi_m (e^{-\frac{R}{L} t} - \cos \omega t), \quad (5-93)$$

где Φ_m — максимальное значение потока, определяемое (5-21) или (5-23).

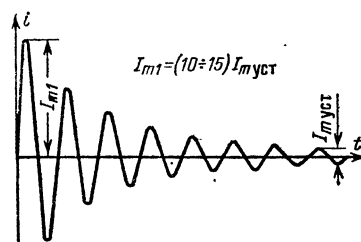
Согласно (5-93) при $t=0$ поток в системе также равен нулю. Через время $t=\pi/\omega$ поток достигает наибольшего значения, поскольку постоянная составляющая потока складывается с переменной составляющей. Если пренебречь затуханием, то через полпериода поток достигает величины, равной $2\Phi_m$.

По мере затухания постоянной составляющей потока пиковое значение потока будет уменьшаться, пока не достигнет Φ_m . Таким образом, в электромагните переменного тока наибольшие пиковые значения потока, а следовательно, и силы будут иметь место в начале процесса включения, причем пиковое значение потока и силы наступает примерно через 0,01 с после начала включения (при частоте тока 50 Гц). Это обеспечивает малое время трогания. Вопросы динамики рассмотрены в [Л. 5-14].

Если магнитная система насыщена, то возникновение постоянной составляющей потока в момент включения ведет к появлению большого, сильно искаженного, намагничивающего тока.

При включении в нуль тока (потока) постоянная составляющая не появляется и пиковое значение потока появляется через четверть периода после начала включения. Таким образом, в электромагнитах переменного тока обеспечивается быстрое трогание электромагнита без применения специальных мер.

Рис. 5-24. Зависимость тока в обмотке от времени при включении электромагнита переменного тока.



Аналитический расчет динамических характеристик электромагнитов переменного тока очень затруднен. Эту задачу удастся решить применением вычислительных машин [Л. 5-9]. Необходимо отметить, что в момент включения электромагнита рабочий зазор в магнитной цепи велик, что вызывает согласно (5-22) большой намагничивающий ток, в десятки раз больший, чем ток в притянутом положении якоря.

Зависимость тока в обмотке от времени в процессе движения якоря дана на рис. 5-24.

5-8. Магнитные цепи с постоянными магнитами

а) Общие сведения. Для создания постоянного магнитного поля в ряде электрических аппаратов используются постоянные магниты, которые изготавливаются из магнитно-твердых материалов, т. е. материалов, имеющих широкую петлю гистерезиса.

Работа постоянного магнита происходит на участке петли гистерезиса от $H=0$ до $H=-H_c$ (рис. 5-25). Эта часть петли называется кривой размагничивания.

Рассмотрим основные соотношения в постоянном магните, имеющем форму тороида с одним малым зазором δ (рис. 5-26). Благодаря форме тороида и небольшому зазору потоками рассеяния в таком магните можно пренебречь.

При малом зазоре магнитное поле в нем можно считать однородным.

Если пренебречь выпучиванием, то индукции в зазоре B_δ и внутри магнита B одинаковы.

На основании закона полного тока при интегрировании по замкнутому контуру 1231 рис. 5-26 получим:

$$H_\delta \delta + Hl = 0,$$

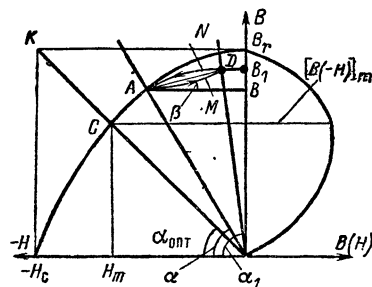


Рис. 5-25. Кривая размагничивания постоянного магнита.

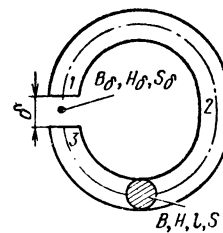


Рис. 5-26. Магнитная цепь постоянного магнита.

откуда

$$H_\delta = -Hl/\delta. \quad (5-94)$$

Таким образом, напряженность поля в зазоре направлена встречно напряженности в теле магнита. Для электромагнита постоянного тока, имеющего аналогичную форму магнитной цепи, без учета насыщения можно написать:

$$H_\delta = i\omega/\delta. \quad (5-95)$$

Сравнивая (5-94) и (5-95), можно видеть, что в случае с постоянным магнитом м. д. с., создающей поток в рабочем зазоре, является произведение напряженности в теле магнита на его длину с обратным знаком $-Hl$.

Воспользовавшись тем, что

$$B = B_\delta; \quad H_\delta = B_\delta / \mu_0 \text{ и } H_\delta = -Hl/\delta,$$

получим:

$$B = -\frac{Hl}{\delta} \mu_0 = -\frac{Hl}{\delta} \mu_0 \frac{S}{S} = -H \frac{G_\delta l}{S}$$

или

$$-\frac{B}{H} = \frac{G_{\delta} l}{S}, \quad (5-96)$$

где S — площадь полюса;

G_{δ} — проводимость воздушного зазора.

Уравнение (5-96) есть уравнение прямой, проходящей через начало координат во втором квадранте под углом α к оси $-H$. С учетом масштабов индукции m_B и напряженности m_H угол α определяется равенством

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{m_H}{m_B} \frac{G_{\delta} l}{S}. \quad (5-97)$$

Так как индукция и напряженность магнитного поля в теле постоянного магнита связаны кривой размагничивания, то пересечение указанной прямой с кривой размагничивания (точка A на рис. 5-25) и определяет состояние сердечника при заданном зазоре.

При замкнутой цепи $\delta=0$, $\operatorname{tg} \alpha=\infty$, $\alpha=90^\circ$ и $B=B_{\delta}=B_r$.

С ростом δ проводимость рабочего зазора и $\operatorname{tg} \alpha$ уменьшаются, индукция в рабочем зазоре падает, а напряженность поля внутри магнита увеличивается.

Магнитные материалы, применяемые для электромагнитных аппаратов постоянного и переменного тока, имеют достаточно высокие значения B_r и небольшие значения H_c . Если в притянутом положении якоря воздушный зазор в магнитной цепи достаточно мал, то после отключения катушки в рабочем зазоре останется поток $B_{ост}$, который определяется кривой размагничивания и $\operatorname{tg} \alpha = \frac{m_H}{m_B} \frac{G_{\delta} l}{S}$. Сила, развиваемая этим потоком, может быть достаточной, чтобы якорь остался притянутым. Для избежания этого явления в магнитную цепь вводится немагнитный зазор (латунные прокладки, штифты). При этом проводимость G_{δ} уменьшается, точка A спускается вниз и остаточный поток падает.

Одной из важных характеристик постоянного магнита является энергия магнитного поля в рабочем зазоре W_{δ} . Согласно [Л. 1-1], если учитывать что поле в зазоре однородно,

$$W_{\delta} = \frac{B_{\delta} H_{\delta}}{2} S \delta. \quad (5-98)$$

Подставляя значение H_δ из (5-94), получаем:

$$W_\delta = \frac{B(-H)}{2} Sl = \frac{B(-H)}{2} V_m = W_m, \quad (5-99)$$

где V_m — объем тела магнита.

Таким образом, энергия в рабочем зазоре равна энергии внутри магнита.

Зависимость произведения $B(-H)$ в функции индукции показана на рис. 5-25. Очевидно, что для точки C , в которой произведение $B(-H)$ достигает максимального значения, энергия в воздушном зазоре также достигает наибольшей величины, и с точки зрения использования постоянного магнита эта точка является оптимальной. Можно показать [Л. 5-11], что точка C , соответствующая максимуму произведения $B(-H)$, есть точка пересечения с кривой размагничивания луча OK , проведенного через точку с координатами $-H_c$ и B_r .

Рассмотрим более подробно влияние зазора δ на индукцию B (рис. 5-25). Если намагничивание магнита производилось при зазоре δ , то после снятия внешнего поля в теле магнита установится индукция, соответствующая точке A . Положение этой точки определяется зазором δ .

Уменьшим зазор до значения $\delta_1 < \delta$, тогда

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{m_H \mu_0 l}{m_B \delta_1} > \operatorname{tg} \alpha = \frac{m_H \mu_0 l}{m_B \delta}.$$

При уменьшении зазора индукция в теле магнита возрастает, однако процесс изменения индукции идет не по кривой размагничивания, а по ветви частной петли гистерезиса AMD . Индукция B_1 определяется точкой пересечения этой ветви с лучом, проведенным под углом α_1 к оси $-H$ (точка D).

Если мы снова увеличим зазор до значения δ , то индукция будет падать до значения B , причем зависимость $B(H)$ будет определяться ветвью DNA частной петли гистерезиса. Обычно частная петля гистерезиса $AMDNA$ достаточно узка и ее заменяют прямой AD , которую называют **прямой возврата**. Наклон к горизонтальной оси $(+H)$ определяется углом β , который связан

с коэффициентом возврата ρ :

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\Delta B m_H}{\Delta H m_B} = \rho \frac{m_H}{m_B}; \quad \rho = \frac{\Delta B}{\Delta H}.$$

Характеристика размагничивания материала обычно не приводится полностью, а задаются только индукция насыщения B_s , остаточная индукция B_r , коэрцитивная сила H_c . Для расчета магнита необходимо знать всю кривую размагничивания, которая для большинства магнитно-твердых материалов хорошо аппроксимируется формулой

$$B = \frac{H + H_c}{\frac{H_c}{B_r} + \frac{H}{B_s}}. \quad (5-100)$$

Кривая размагничивания, выражаемая (5-100), может быть легко построена графически, если известны B_s , B_r и H_c [Л. 5-10].

Данные по магнитно-твердым материалам, применяемым в аппаратостроении, приведены в [Л. 5-11].

б) Определение потока в рабочем зазоре для заданной магнитной цепи. В реальной системе с постоянным магнитом поток в рабочем зазоре отличается от потока в нейтральном сечении (середине магнита) из-за наличия потоков рассеяния и выпучивания (рис. 5-27).

Поток в нейтральном сечении равен:

$$\Phi_0 = \Phi_p + \Phi_{\text{вып}} + \Phi_\sigma, \quad (5-101)$$

где Φ_0 — поток в нейтральном сечении; $\Phi_{\text{вып}}$ — поток выпучивания у полюсов; Φ_σ — поток рассеяния; Φ_p — рабочий поток.

Коэффициент рассеяния σ определяется равенством

$$\sigma = \Phi_\sigma / \Phi_p. \quad (5-102)$$

Можно принять, что потоки Φ_p , $\Phi_{\text{вып}}$, Φ_σ создаются одной и той же разностью магнитных потенциалов [Л. 5-12], тогда

$$\sigma = \frac{G_p + G_{\text{вып}} + G_\sigma}{G_p}. \quad (5-103)$$

Проводимости могут быть найдены по методике, описанной выше (§ 5-1, б).

Индукцию в нейтральном сечении найдем, определив $\operatorname{tg} \alpha$:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{m_H}{m_B} \frac{G_p}{S_m} \sigma'_m \quad (5-104)$$

и воспользовавшись кривой размагничивания рис. 5-25.

Индукция в рабочем зазоре равна:

$$B_p = B_0 / \sigma, \quad (5-105)$$

поскольку поток в рабочем зазоре в σ раз меньше, чем поток в нейтральном сечении.

Очень часто намагничивание системы происходит в несобранном ее состоянии, когда проводимость рабочего зазора уменьшена из-за отсутствия деталей из ферромагнитного материала. В этом случае расчет ведется с использованием прямой возврата [Л. 5-11].

Если потоки рассеяния значительны, то расчет рекомендуется вести по участкам, так

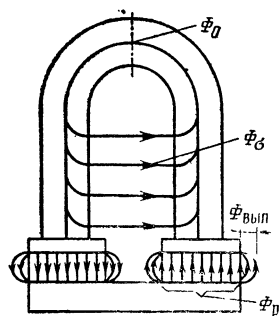


Рис. 5-27. К расчету индукции в рабочем зазоре.

же как и в случае электромагнита. Подробно этот метод применительно к постоянным магнитам изложен в [Л. 5-11].

Потоки рассеяния в постоянных магнитах играют значительно большую роль, чем в электромагнитах. Дело в том, что магнитная проницаемость магнитно-твердых материалов значительно ниже, чем у магнитно-мягких, из которых изготавливаются системы для электромагнитов. Потоки рассеяния вызывают значительное падение магнитного потенциала вдоль постоянного магнита и уменьшают м. д. с., а следовательно, и поток в рабочем зазоре.

Коэффициент рассеяния σ выполненных систем колеблется в довольно широких пределах (2—5). Расчет коэффициента рассеяния и потоков рассеяния связан с большими трудностями. Поэтому при разработке новой конструкции коэффициент рассеяния σ рекомендуется определить на специальной модели, в которой постоянный магнит заменен электромагнитом [Л. 5-12]. Намагничивающая обмотка выбирается такой, чтобы получить в рабочем зазоре необходимый поток.

в) Стабилизация характеристик магнита. В процессе работы магнита наблюдается уменьшение потока в рабочем зазоре системы — старение магнита. Различают структурное, механическое и магнитное старение.

Структурное старение наступает вследствие того, что после закалки материала в нем возникают внутренние напряжения, материал приобретает неоднородную структуру. В процессе работы материал становится более однородным, внутренние напряжения исчезают. При этом остаточная индукция B_r и коэрцитивная сила H_c уменьшаются. Для борьбы со структурным старением материал подвергается термообработке типа отпуска. При этом внутренние напряжения в материале исчезают. Его характеристики становятся более стабильными. Алюминиево-никелевые сплавы (альни и др.) не требуют структурной стабилизации.

Механическое старение наступает при ударах и вибрациях магнита. Для того чтобы сделать магнит нечувствительным к механическим воздействиям, его подвергают искусственному старению. Образцы магнита перед установкой в аппарат подвергаются таким ударам и вибрации, которые имеют место в эксплуатации.

Магнитное старение — изменение свойств материала под действием внешних магнитных полей. Положительное внешнее поле увеличивает индукцию по прямой возврата, а отрицательное снижает ее по кривой размагничивания. Для того чтобы сделать магнит более стабильным, его подвергают действию размагничивающего поля, после чего магнит работает на прямой возврата. Из-за меньшей крутизны прямой возврата влияние внешних полей уменьшается. При расчете магнитных систем с постоянными магнитами необходимо учитывать, что в процессе стабилизации магнитный поток уменьшается на 10—15%.

5-9. Пример расчета электромагнита постоянного тока

Определить параметры обмотки электромагнита постоянного тока, который должен развивать силу $F=350$ Н при зазоре $20 \cdot 10^{-3}$ м. Эскиз магнитной цепи представлен на рис. 5-28. Материал магнитопровода сталь марки 10. Напряжение питания 110 В. Поскольку вначале трудно судить о насыщении магнитной системы, проведем при-

близкий расчет м.д.с. обмотки без учета магнитного сопротивления стали. Согласно (5-60) имеем:

$$Iw = \sqrt{\frac{2F}{-\frac{dG_{\delta}}{d\delta} + g \left(\frac{Z}{l}\right)^2}}.$$

Поскольку δ и d соизмеримы, то при расчете $dG_{\delta}/d\delta$ желательно учитывать выпучивание. Для этого G_{δ} рассчитывают аналитически

или по картине поля и проводят графическое дифференцирование. Однако ради упрощения мы выпучиванием пренебрегаем.

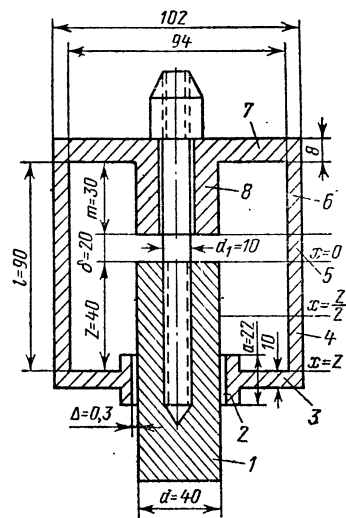


Рис. 5-28. Эскиз магнитной цепи электромагнита.

1 — якорь; 2 — паразитный зазор (воротничок); 3 — нижняя крышка; 4 — нижняя часть корпуса; 5 — средняя часть корпуса; 6 — верхняя часть корпуса; 7 — верхняя крышка; 8 — стоп.

$$-\frac{dG_{\delta}}{d\delta} = \frac{\mu_0 \pi \left(\frac{d^2}{4} - \frac{d_1^2}{4} \right)}{\delta^2} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \pi \left(\frac{0,4^2}{4} - \frac{0,1^2}{4} \right)}{0,2^2} = 3,7 \cdot 10^{-6} \frac{\Gamma}{\text{м}}$$

$$g = \frac{\mu_0 \cdot 2\pi}{\ln \frac{D}{d}} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 2\pi}{\ln \frac{0,45}{0,2}} = 9,5 \cdot 10^{-6} \frac{\Gamma}{\text{м}};$$

$$Iw_{\delta} = \sqrt{\frac{2 \cdot 350 \cdot 10^6}{3,7 + 9,5 \left(\frac{0,4}{0,9} \right)^2}} = 11,3 \cdot 10^3 \text{ А.}$$

Проводимость рабочего зазора

$$G_{\delta} = \frac{\mu_0 \pi \left(\frac{d^2}{4} - \frac{d_1^2}{4} \right)}{\delta} = 7,4 \cdot 10^{-8} \Gamma.$$

Рабочий поток

$$\Phi_{\delta} = I w_{\delta} G_{\delta} = 11,3 \cdot 10^3 \cdot 7,4 \cdot 10^{-8} = 83,5 \cdot 10^{-5} \text{ Вб.}$$

Падение магнитного потенциала на паразитном зазоре Δ

$$I w_{\Delta} = (\Phi_{\delta} + \Phi_{\sigma Z}) R_{\mu \Delta},$$

где $\Phi_{\sigma Z}$ — поток рассеяния, проходящий через основание якоря ($x=Z$);

$R_{\mu \Delta}$ — магнитное сопротивление воротничка.

Ввиду малого значения $R_{\mu \Delta}$ смещением нулевого магнитного потенциала пренебрегаем. Тогда

$$\Phi_{\sigma Z} = \frac{I w_{\delta}}{l} g \frac{Z^2}{2} = \frac{11,3 \cdot 10^3}{9} \cdot 9,5 \cdot 10^{-6} \frac{16}{2} = 95,5 \cdot 10^{-5} \text{ Вб};$$

$$R_{\mu \Delta} \approx \frac{\Delta}{\mu_0 \pi da} = \frac{0,03}{4\pi \cdot 10^{-9} \pi \cdot 4 \cdot 2,2} = 0,86 \cdot 10^5 \text{ 1/Г};$$

$$I w_{\Delta} = (83,5 \cdot 10^{-5} + 95,5 \cdot 10^{-5}) \cdot 0,86 \cdot 10^5 = 163 \text{ А.}$$

Полная м. д.с. катушки без учета стали

$$I w = I w_{\delta} + I w_{\Delta} = 11463 \text{ А.}$$

Учтем сталь, используя при определении индукции в различных частях системы метод коэффициентов рассеяния. Поток рассеяния якоря на расстоянии x от торца якоря. Согласно (5-15)

$$\Phi_{\sigma x} = \frac{I w}{l} g \left(Zx - \frac{x^2}{2} \right);$$

$$\Phi_x = \Phi_{\delta} + \Phi_{\sigma x}.$$

После определения потока находим B_x и H_x (по кривым намагничивания) и падение потенциала на якоре $H_{cp}Z$.

Расчет сводим в табл. 5-1.

Т а б л и ц а 5-1

$\Phi, \text{Вб}$ ($x=0$)	$\Phi, \text{Вб}$ ($x=Z/2$)	$\Phi, \text{Вб}$ ($x=Z$)	$B, \text{Т}$ ($x=0$)	$B, \text{Т}$ ($x=Z/2$)	$B, \text{Т}$ ($x=Z$)	$H, \text{А/м}$ ($x=0$)	$H, \text{А/м}$ ($x=Z/2$)	$H, \text{А/м}$ ($x=Z$)
$83,5 \cdot 10^{-5}$	$156 \cdot 10^{-5}$	$178 \cdot 10^{-5}$	0,707	1,32	1,51	220	600	1500

Среднюю напряженность магнитного поля H_{cp} находим по формуле Симпсона:

$$H_{cp} = \frac{H_0 + 4H_{Z/2} + H_Z}{6} = 695 \text{ А/м.}$$

Падение магнитного потенциала в якоре

$$I\omega_{\text{якоря}} = H_{\text{ср}}Z = 6,25 \cdot 4 = 27,8 \text{ А.}$$

Аналогичный расчет проводим для всех участков цепи. Падение магнитного потенциала на нижней крышке 10,7 А, на нижней части корпуса 19,8 А, на средней части корпуса 4,4 А, на верхней части корпуса 8,85 А, на верхней крышке 10,35 А и на стопе 9,7 А. Полное падение магнитного потенциала в стали $\Sigma I\omega_{\text{ст}} = 81,6 \text{ А.}$

Полная м. д. с. обмотки с учетом стали

$$I\omega = I\omega_{\delta} + I\omega_{\Delta} + \Sigma I\omega_{\text{ст}} = 11\,554 \text{ А.}$$

Падение потенциала в стали не превышает 10% общей м. д. с. обмотки.

Расчет обмотки. Примем, что толщина стенок каркаса 2 мм. Тогда внутренний диаметр обмотки $D_1 = 44 \text{ мм}$, внешний диаметр $D_2 = 90 \text{ мм}$, длина катушки $l = 86 \text{ мм}$.

Согласно (5-39)

$$d = \sqrt{\frac{2I\omega(D_1 + D_2)\rho}{U}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 11\,554(0,044 + 0,09) \cdot 2,2 \cdot 10^{-8}}{110}} = 7,85 \cdot 10^{-4} \text{ м.}$$

Выбираем провод марки ПЭЛ с $d = 0,8 \text{ мм}$ и $d_{\text{из}} = 0,85 \text{ мм}$.

Число витков обмотки (5-40)

$$\omega = f_m \frac{Q_k \cdot 4}{\pi d^2} = 0,65 \frac{86 \cdot 46 \cdot 4}{\pi \cdot 0,8^2} = 5120;$$

$$f_m = 0,65 \text{ по [Л.5-6]}$$

Мощность, потребляемая обмоткой по (5-41),

$$P = \frac{U^2 \left(\frac{\pi d^2}{4} \right)^2}{\rho \pi \frac{D_1 + D_2}{2} f_m Q_k} = \frac{110^2 \left[\frac{3,14 (8 \cdot 10^{-4})^2}{4} \right]^2}{2,2 \cdot 10^{-8} \pi (0,044 + 0,09) \cdot 0,65} = 318 \text{ Вт.}$$

Ток в обмотке $I = P/U = 2,9 \text{ А.}$

Сопротивление обмотки $R = U/I = 38,0 \text{ Ом.}$

Отношение

$$\sigma_{\text{расч}} = \frac{S_{\text{бок}}}{P} = \frac{\pi D_2 l}{P} = \frac{\pi \cdot 9 \cdot 8,6 \cdot 10^{-4}}{318} = 0,76 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^2}{\text{Вт}}.$$

Согласно (5-42) $\sigma_{\text{доп}} = 8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{Вт.}$

Поскольку $\sigma_{\text{расч}} < \sigma_{\text{доп}}$, то электромагнит может включаться в сеть только кратковременно.

Определим допустимое время включения. Положим, что процесс нагрева идет без отдачи тепла. Максимальная допустимая температура равна 250°С . Согласно (2-32) имеем:

$$t = \frac{cM\theta}{I^2 R} = \frac{0,39 \cdot 3920 \cdot 250}{2,9^2 \cdot 38} = 1200 \text{ с.}$$

МАГНИТНЫЕ УСИЛИТЕЛИ

6-1. Общие сведения

а) **Принцип действия.** Магнитный усилитель (МУ) — это электрический аппарат, в котором для усиления сигнала используется управляемое индуктивное сопротивление. Схема простейшего дроссельного МУ представлена на рис. 6-1. Замкнутый магнитопровод

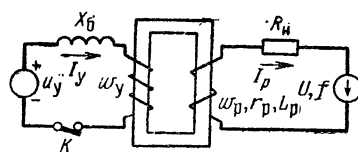


Рис. 6-1. Схема МУ на одном сердечнике.

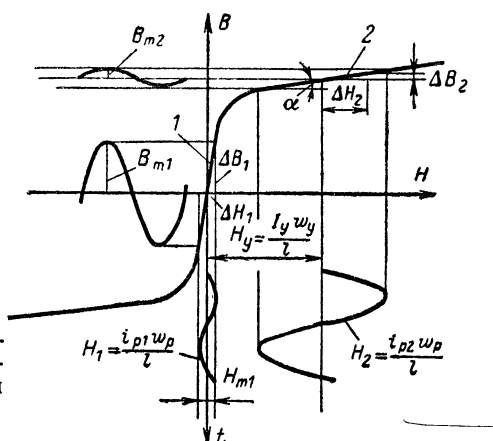


Рис. 6-2. Изменение индукции B , напряженности H и тока i_p при $i_y = 0$ и $i_y = i_{y, \text{макс}}$.

имеет две обмотки — рабочую обмотку (переменного тока) w_p , включенную в цепь нагрузки R_n , и обмотку управления w_y , на которую подается управляющий ток I_y . Кривая намагничивания материала сердечника дана на рис. 6-2. При прохождении переменного тока по обмотке w_p на обмотке w_y будет наводиться э. д. с. Эта э. д. с. будет создавать переменный ток в цепи управления. Для ограничения этого тока в цепи управления включается балластный дроссель $X_б$.

Рассмотрим вначале соотношения в дросселе при отсутствии тока управления (цепь управления разомк-

нута). Индуктивное сопротивление обмотки ω_p равно:

$$X_p = \omega L_p = \omega \frac{\omega_p \Delta \Phi}{\Delta I} = \omega \mu_a \frac{S \omega_p^2}{l},$$

где S — активное сечение магнитопровода; ω_p — число витков рабочей обмотки; l — длина средней магнитной линии магнитопровода.

При неизменных конструктивных параметрах S , ω_p и l индуктивность определяется магнитной проницаемостью μ_a . Если ток управления отсутствует, то сердечник работает в ненасыщенной зоне I (рис. 6-2). В этой зоне магнитная проницаемость $\mu_{a1} = \Delta B_1 / \Delta H_1$ велика и индуктивное сопротивление дросселя

$$X_{p1} = \mu_{a1} \frac{\omega_p^2 S}{l} \omega$$

велико. Сопротивление нагрузки R_n обычно очень мало по сравнению с X_{p1} , поэтому ток в рабочей обмотке определяется только индуктивным сопротивлением дросселя и мал по величине.

Подадим в обмотку управления такой постоянный ток управления I_y , чтобы перенести рабочую зону полнотой в область 2. В этой области из-за насыщения материал имеет малую магнитную проницаемость $\mu_{a2} = \Delta B_2 / \Delta H_2$. Индуктивное сопротивление рабочей обмотки дросселя резко уменьшается, что ведет к уменьшению полного сопротивления цепи и возрастанию тока в нагрузке. Величины X_{p2} и R_n выбираются таким образом, чтобы $X_{p2} \ll R_n$. Тогда ток в цепи определяется сопротивлением самой нагрузки. При этом все напряжение источника питания приложено к сопротивлению нагрузки.

Мы рассмотрели два крайних режима усилителя — режим холостого хода, когда $I_y = 0$ и ток в нагрузке имеет минимальное значение $I_{н0}$, и режим максимальной отдачи, когда ток в нагрузке достигает наибольшего значения.

При плавном увеличении тока управления I_y ток в нагрузке плавно увеличивается от $I_{н0}$ до максимального значения $I_{н.макс}$ за счет уменьшения магнитной проницаемости μ_a .

Характеристика управления МУ приведена на рис. 6-3. По оси абсцисс отложен ток управления, приведенный к рабочей обмотке $I'_y = I_y \omega_y / \omega_p$. В линейной

Рис. 6-3. Характеристика управления.

зоне характеристики соблюдается равенство средних значений м. д. с. обмоток [Л. 6-1, 6-4]:

$$I_p \omega_p = I_y \omega_y, \text{ или } I_p = I_y' \quad (6-1)$$

Вследствие низких значений коэффициентов усиления, большой массы дроссельные МУ в настоящее время применяются редко, в основном как измерительные трансформаторы постоянного тока и напряжения [Л. 6-3]. В первом случае измеряемый ток $I = I_y$ пропускается по шине, которая является одновитковой обмоткой управления (§ 13-10). Магнитоэлектрический амперметр через выпрямительный мост включен в цепь рабочей обмотки и измеряет ток I_p пропорциональный постоянному току:

$$I_p = I_y \omega_y / \omega_p = I_y / \omega_p.$$

6-2. Усилитель с самонасыщением (МУС)

а) **Процессы в усилителе с самонасыщением.** Если в цепь рабочей обмотки включить вентиль, то под действием постоянной составляющей выпрямленного тока происходит подмагничивание сердечника. Такие усилители называются усилителями с самоподмагничиванием или с самонасыщением (МУС).

При рассмотрении процессов в таком усилителе (рис. 6-4) мы считаем, что обратное сопротивление вентиля равно бесконечности. Прямое сопротивление учитывается сопротивлением R_B . В цепи управления включено балластное сопротивление X_B , которое препятствует возникновению перемен-

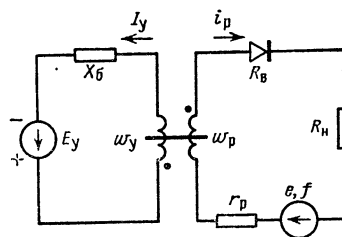
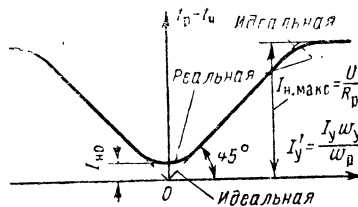


Рис. 6-4. Схема однополупериодного МУС.

ного тока в этой цепи. Направление напряжения источника, при котором клапан проводит ток, примем за положительное, полупериод, при котором ток проходит через нагрузку, назовем рабочим.

Петля гистерезиса материала, применяемого для усилителей, изображена на рис. 6-5, а. На рис. 6-5, б даны зависимости от времени индукции B , напряжения пи-

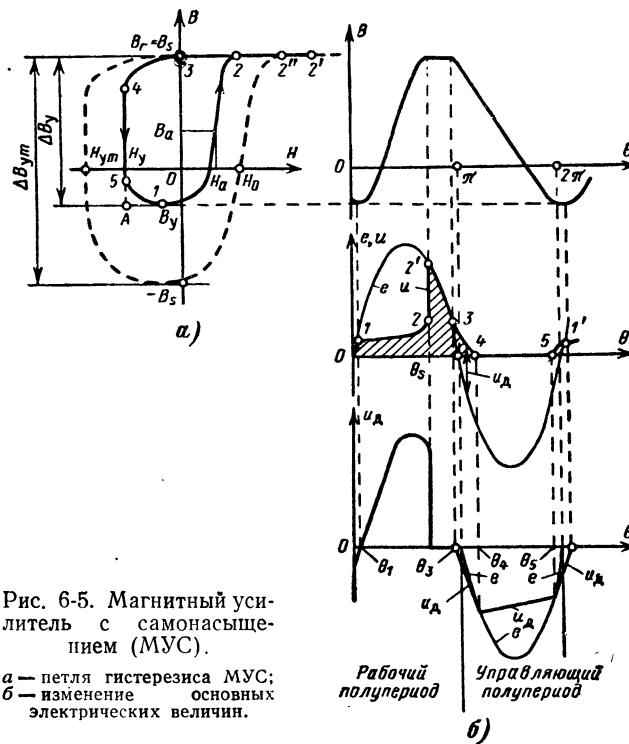


Рис. 6-5. Магнитный усилитель с самонасыщением (МУС).

а — петля гистерезиса МУС;
б — изменение основных электрических величин.

тания e , выходного напряжения $u = e - u_d$ и напряжения на дросселе $u_d = \omega_p S dB/dt$.

При отсутствии управляющего поля H_y в сердечнике устанавливается остаточная индукция $+B_r$. Если следует рабочий полупериод, то с ростом тока точка, характеризующая магнитное состояние, будет перемещаться по участку $3-2'$. Так как сердечник насыщен, то все напряжение цепи приложено к активному сопротивлению $r_p + R_n + R_b$. К концу рабочего полупериода

магнитное состояние сердечника вновь изображается точкой 3.

В следующий полупериод клапан не пропускает ток, и весь полупериод магнитное состояние характеризуется точкой 3 (напряжение источника приложено к клапану). Таким образом, при отсутствии сигнала управления в рабочий полупериод проходит ток нагрузки, равный:

$$\frac{e}{R_n + R_k + r_p} = \frac{e}{R_p}.$$

При наличии отрицательного поля управления — H_y начальное магнитное состояние перед рабочим полупериодом переместится в точку 1. Под действием напряжения источника питания рабочая точка будет перемещаться по ветви частной петли гистерезиса 1—2, при этом сердечник будет находиться в ненасыщенном состоянии.

Ток рабочей обмотки w_p определяется из следующих соображений. Для того чтобы в магнитопроводе создавалась индукция B_a , необходимо, чтобы в нем имелась напряженность поля H_a , равная:

$$H_a = -H_y + H_p = -\frac{I_y w_y}{l} + \frac{i_p w_p}{l}, \quad (6-2)$$

где l — средняя длина магнитопровода.

Каждому значению H_a соответствует свое значение тока i_p . С ростом индукции ток i_p увеличивается. Если пренебречь активным падением напряжения от намагничивающего тока, то на участке 1—2 все напряжение источника уравнивается противо-э. д. с. рабочей обмотки:

$$-e_d = u_d = u = w_p S \frac{dB}{dt}; \quad u = U_m \sin \omega t = U_m \sin \theta; \quad \theta = \omega t.$$

Проведя интегрирование, получим:

$$B = -\frac{U_m}{w_p S \omega} \cos \theta + C = -B_m \cos \theta + C. \quad (6-3)$$

Приближенно можно принять, что при $\theta=0$, $B=B_y$

$$B = B_y + B_m (1 - \cos \theta). \quad (6-4)$$

По этому закону индукция будет возрастать до тех пор, пока не достигнет значения индукции насыщения B_s (точка 2). После насыщения сердечника напряжение на дросселе u_d становится равным нулю и ток в цепи определяется только активным сопротивлением $R_n + R_v + r_p$. В точке 3 напряженность поля $H_a = 0$, так как $-H_y = H_p$ и ток $i_p = H_y l / w_p$.

После точки 3 индукция B спадает до значения, определяемого точкой 4. На участке петли 3—4 вентиль остается открытым, несмотря на то, что после $\theta = \pi$ э. д. с. источника питания e меняет знак. Дело в том, что на этом участке э. д. с. рабочей обмотки $e_d = -u_d$ больше э. д. с. источника и к аноду диода приложен положительный потенциал, а к катоду — отрицательный. В точке 4 э. д. с. источника становится больше э. д. с. рабочей обмотки, и диод закрывается. Ток i_p становится равным нулю. После точки 4 закон изменения индукции во времени определяется свойствами сердечника, э. д. с. и параметрами цепи управления. На участке 4—5 э. д. с. источника питания больше э. д. с. рабочей обмотки, поэтому диод закрыт. В точке 5 э. д. с. источника питания становится меньше э. д. с. дросселя e_d и диод снова открывается, несмотря на то, что $e < 0$. В точке 1' угол $\theta = \theta_1 + 2\pi$ и напряжение на дросселе $u_d = 0$. При $\theta \geq 2\pi + \theta_1$ напряжение на дросселе меняет знак и становится положительным. При этом $dB/dt > 0$, индукция начинает нарастать. Следует отметить, что магнитный материал имеет узкую петлю гистерезиса, намагничивающий ток i_p , протекающий на участке 1—2, 3—4, 5—1, мал и им можно пренебречь.

Полупериод, в котором индукция изменяется от значения $+B_r$ до B_y под действием сигнала управления, называется управляющим полупериодом.

Чем больше отрицательное поле управления $-H_y$, тем ниже опускается точка 1, тем позже наступает насыщение сердечника и меньше ток, проходящий через нагрузку.

б) Основные соотношения в усилителе с самонасыщением. Для любого момента времени в рабочий полупериод можно записать:

$$u = i_p R_p + w_p S \frac{dB}{dt}.$$

Умножим правую и левую части на $d\theta$ и возьмем интеграл; тогда

$$\int_0^\pi u d\theta = \int_0^\pi i_p R_p d\theta + \int_{B_y}^{+B_s} \omega \omega_p S dB. \quad (6-5)$$

Среднее значение напряжения источника питания за полупериод равно:

$$U = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} u dt = \frac{2}{T} \int_0^\pi \frac{1}{\omega} u d\theta = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi u d\theta.$$

Среднее за полупериод значение напряжения на сопротивлении R_p рабочей цепи равно:

$$U_{p\pi} = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} i_p R_p dt = \frac{2}{T\omega} \int_0^\pi i_p R_p d\theta = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi i_p R_p d\theta.$$

Среднее значение напряжения U_p за период равно:

$$U_p = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi i_p R_p d\theta. \quad (6-6)$$

Из (6-5) и (6-6) получим:

$$\pi U = 2\pi U_p + \omega_p S \omega [B_s - B_y] = 2\pi U_p + \omega_p S \omega \Delta B_y, \quad (67)$$

где ΔB_y — изменение индукции за полупериод, равное $B_s - B_y$.

После простых преобразований (6-7) получим:

$$U_p = 0,5 (U - 2f\omega_p S \Delta B_y). \quad (6-8)$$

При изменении сигнала управления изменяется только ΔB_y . Если $\Delta B_y = 0$, то весь рабочий полупериод магнитопровод насыщен и

$$U_p = 0,5U,$$

т. е. ток через нагрузку проходит в течение всего рабочего полупериода. В следующий, управляющий полупериод ток в нагрузке равен нулю, если пренебречь обрат-

ным током вентиля. Другой крайний случай имеет место, когда $\Delta B_y = 2B_m$:

$$U_p = 0,5 (U - 2f\omega_p S \cdot 2B_m). \quad (6-9)$$

При этом выходное напряжение U_p равно нулю, так как индукция B_m связана с напряжением питания уравнением

$$U = 4f\omega_p S B_m.$$

Обычно $B_m = B_s$. Если $\Delta B_y = B_s - B_y = 2B_m$, то в течение всего полупериода не наступает насыщения сердечника.

В реальном МУС в этом режиме напряжение $U_p = I_{н0} R_p \neq 0$, так как в рабочей цепи протекает небольшой намагничивающий ток $I_{н0}$.

Напряжение на нагрузке в режиме максимальной отдачи, очевидно, равно:

$$U_n = I_n R_n = \frac{0,5U}{R_n + r_p + R_b} R_n = \eta U_p,$$

где

$$\eta = \frac{R_n}{R_n + r_p + R_b} \text{ — к. п. д. цепи рабочей обмотки МУС.}$$

Тогда имеем:

$$U_n = 0,5 \eta [U - 2f\omega_p S \Delta B_y]. \quad (6-10)$$

Для того чтобы построить характеристику управления усилителя $U_n = f(I_y)$, необходимо знать зависимость $\Delta B_y = f(I_y)$. Эту кривую получают экспериментальным путем. Для снятия этой зависимости используется схема, представленная на рис. 6-6. Магнитопровод имеет три обмотки: обмотку управления ω_y , рабочую обмотку ω_p и измерительную $\omega_{изм}$. Обмотка ω_y питается постоянным током I_y от источника тока. Частота источника переменного тока f должна быть равна частоте, при которой будет работать МУС.

Ток I_p выбирается так, чтобы обеспечить насыщение сердечника при любом значении H_y . Среднее значение напряжения измерительной обмотки равно:

$$U = \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} \omega_{изм} S \frac{dB}{dt} dt = \frac{1}{T/2} \int_{B_y}^{B_s} \omega_{изм} S dB = 2f\omega_{изм} S \Delta B_y,$$

где ΔB_y — изменение индукции в магнитопроводе.

Изменяя ток управления I_y и соответственно H_y , получают различные величины ΔB_y . На рис. 6-7 изобра-

жены частные петли гистерезиса при различных H_y и соответствующая им динамическая кривая размагничивания $\Delta B_y = f(H_y)$.

Зная зависимость $\Delta B_y = f(H_y)$, с помощью (6-10) можно построить характеристику управления $U_n = f(I_y)$. На рис. 6-8, а представлена линеаризованная динамическая кривая размагничивания, а на рис. 6-8, б соответствующая ей характеристика управления. Там же показаны мгновенное напряжение на нагрузке u_n и частные циклы намагничивания.

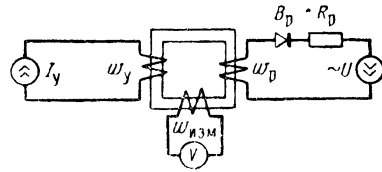


Рис. 6-6. Схема для снятия динамической кривой размагничивания.

При токе управления I_{y1} , т. е. $H_y = H_{y1}$, имеет место режим максимальной отдачи.

Если $B_m = B_s$ и $H_y = H_{y3}$, то согласно (6-10) выходное напряжение $U_n = 0$. В действительности через нагрузку протекает намагничивающий ток холостого хода I_{n0} , определяемый петлей гистерезиса.

Напряжение на нагрузке будет равно:

$$U_{n0} = I_{n0} R_n.$$

Ток I_{n0} определяется уравнением

$$I_{n0} = H_0 l_c / w_p.$$

Напряженность поля H_0 (среднее значение) определяется по основной кривой намагничивания материала магнитопровода при $B = B_m$.

Согласно [Л.6-2] приближенно H_0 можно найти по динамической кривой размагничивания рис. 6-8:

$$H_0 = H_{y2} = \frac{H_{y1} + H_{y3}}{2}.$$

Напряженность холостого хода H_0 определяется абсциссой точки 2, лежащей на середине динамической кривой размагничивания.

Режим при $I_y = I_{y3}$ называется режимом холостого хода (точка минимального выхода характеристики управления МУС).

При $I_y < 0$ и $|I_y| > |I_{y3}|$ усилитель работает в режиме, близком к режиму дроссельного усилителя [Л.6-1].

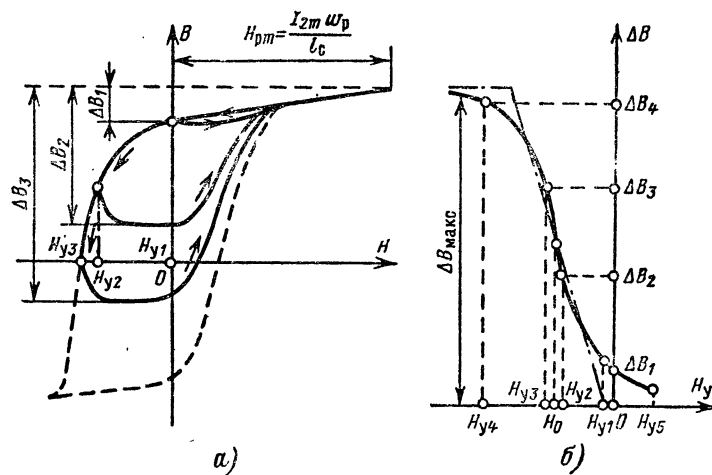


Рис. 6-7. Перемагничивание магнитопровода МУС.

а — приближенная картина частных циклов перемагничивания при различных полях управления H_y ; б — динамическая кривая размагничивания.

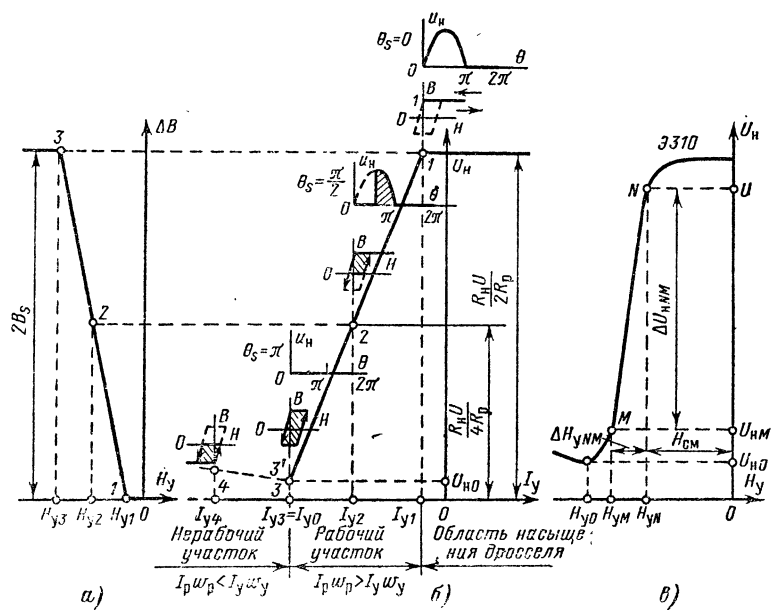


Рис. 6-8. Характеристика управления МУС и ДКР.

Ввиду низких коэффициентов усиления эта область для работы не используется.

Реальная характеристика «вход — выход» имеет вид кривой, представленной на рис. 6-8, в. Для того чтобы выходной сигнал U_n был пропорционален входному H_y , используется линейная часть MN характеристики. В этом случае на сердечник наматывается обмотка смещения. Постоянный ток в этой обмотке создает $H_{см}$ и смещает ось ординат (U_n) в точку N . При подаче сигнала управления H_y напряжение на нагрузке U_n уменьшается пропорционально H_y . Можно получить нарастающую зависимость $U_n(H_y)$ (рис. П-3).

6-3. Двухполупериодные схемы МУС

Однополупериодная схема (рис. 6-4) обладает рядом недостатков, из-за которых она не нашла применения.

1. Для ограничения наведенных токов в обмотке управления необходимо балластное (реактивное) сопротивление, которое увеличивает инерционность усилителя.

2. Прохождение тока лишь в течение одного полупериода уменьшает мощность нагрузки.

3. Схема пригодна для питания нагрузки только выпрямленным током.

На рис. 6-9, а изображена двухполупериодная схема усилителя с нагрузкой на постоянном токе.

Положим, что вторичная обмотка питающего трансформатора имеет полярность, обозначенную на рис. 6-9, а. Тогда в верхнем усилителе имеет место рабочий полупериод, а в нижнем — полупериод управления.

В следующем полупериоде нижний дроссель будет находиться в рабочем полупериоде, а верхний в полупериоде управления.

Если в цепи управления включено большое сопротивление R_y , то переменная составляющая напряжения, появляющаяся на обмотках w_y в результате трансформации со стороны обмоток w_p , создает малый переменный ток, которым можно пренебречь.

По цепи управления протекает только ток I_y . Такой режим работы МУС называется режимом вынужденного намагничивания. В этом случае условия работы каждого дросселя аналогичны условиям, рассмотренным в § 6-2.

Обычно усилитель работает при сравнительно небольших значениях сопротивления цепи управления R_y , и для компенсации э. д. с., наводимых на обмотках w_y со стороны рабочих обмоток w_p , начала и концы обмоток должны соединяться так, как показано на рис. 6-9, а—в.

Две обмотки управления могут быть заменены одной.

Для схемы 6-9, а необходимо изменить направление включения рабочих обмоток w_p (рис. 6-10). Для схем рис. 6-9, б и в направление включения рабочих обмоток при этом сохраняется. На рис. 6-11, б—г представлены токи i_{p1} и i_{p2} в рабочих обмотках дросселей и тока в нагрузке i_n

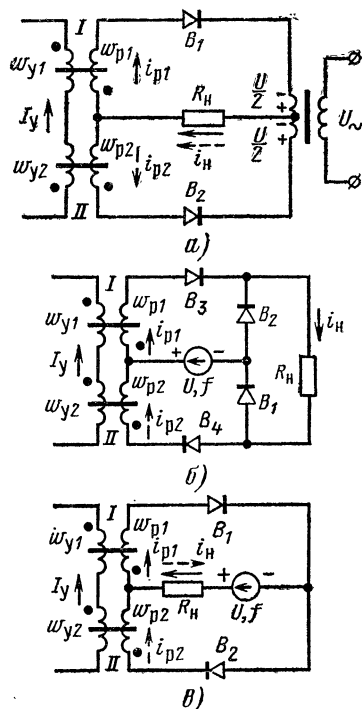


Рис. 6-9. Схема двухполупериодных МУС.

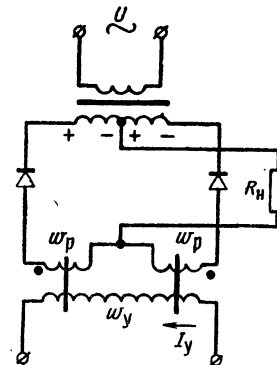


Рис. 6-10. МУС с общей обмоткой управления.

для усилителя по схеме 6-9, а при $B_y=0$. В двухполупериодном усилителе ток через нагрузку протекает оба полупериода, поэтому среднее напряжение удваивается по сравнению со схемой рис. 6-4, а мощность увеличивается в 4 раза.

$$U_n = \eta (U - 2f w_p S \Delta B_y). \quad (6-11)$$

Мостовая схема рис. 6-9, б имеет нагрузку на посто-

янном токе (без трансформатора), схема рис. 6-9, в имеет нагрузку на переменном токе.

Рассмотрим работу МУС при конечном значении сопротивления цепи управления R_y . В рабочий полупериод дросселя I индукция в нем меняется от B_y до $+B_s$. При этом в его обмотке управления наводится э. д. с. $e_{y1} = -\omega_{y1} S \frac{dB_1}{dt}$. В это время дроссель II находится в полупериоде управления и его сердечник размагничивается не только под действием э. д. с. управления $E_y < 0$, но и под действием э. д. с. e_{y1} . Если положить, что сопротивление $R_y = 0$, то $I_y R_y = 0$; э. д. с. e_{y1} приложена к дросселю II , и до момента насыщения дросселя I размагничивание дросселя II производится только за счет э. д. с. e_{y1} , так как напряжением управления E_y можно пренебречь. При этом $-e_{y1} = \omega_{y1} S \frac{dB_1}{dt} = \omega_{y2} S \frac{dB_2}{dt} = \frac{\omega_{y1}}{\omega_p} U_m \sin \theta$.

Тогда

$$B_1 = B_m (1 - \cos \theta) + B_{y1}; B_2 = B_m (1 - \cos \theta) + (-B_s).$$

Таким образом, индукции B_1 и B_2 отличаются только постоянными составляющими. При $\theta = \theta_s$;

$$\cos \theta_s = 1 - \Delta B_y / B_m; B_1 = +B_s; B_2 = B_{y2}.$$

В действительности из-за того, что $R_y \neq 0$, индукция B_2 к моменту $\theta = \theta_s$ не принимает значения B_{y2} . После насыщения дросселя I ($\theta > \theta_s$) э. д. с. e_{y1} становится равной нулю. За счет действия E_y индукция B_2 достигает значения $-B_y$. Следует сказать, что при $0 < \theta \leq \theta_s$ размагничивание дросселя II происходит под действием большой э. д. с. e_{y1} по динамической (широкой) петле гистерезиса, так как $|dB_2/dt|$ велико. В интервале $\theta_s \leq \theta \leq \pi$ размагничивание идет под действием малой э. д. с. E_y по петле, близкой к статической. В следующий полупериод э. д. с. e_{y2} , наводимая во II дросселе, участвует в процессе размагничивания дросселя I .

На рис. 6-11, д представлено изменение индукции в дросселях при условии, что $R_y = 0$ для схемы рис. 6-9, а. Электродвижущие силы e_{y1} и e_{y2} в любой момент времени в сумме равны нулю — взаимно компенсируют друг друга, что позволяет в цепь управления не вводить сопротивление X_6 . Из-за того, что размагничивание дросселей

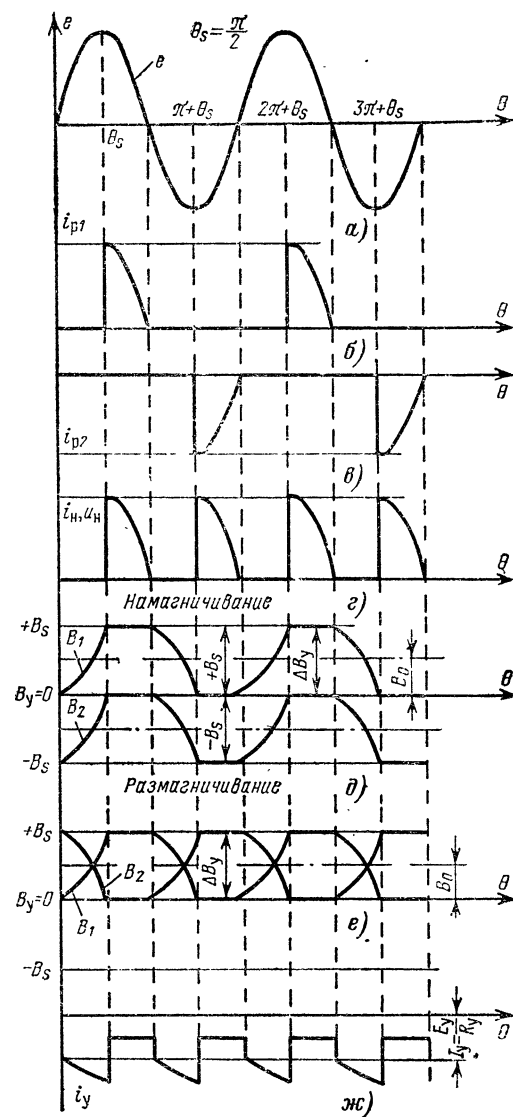


Рис. 6-11. Закон изменения основных электрических величин в двух полупериодном МУС.

идет сначала по динамической петле гистерезиса, а потом — по статической, в цепи управления появляется переменная составляющая в токе управления рис. 6-11, ж [Л. 6-1, 1-9]. Поскольку процесс в цепи управления повторяется каждый полупериод частоты источника, то ток управления имеет четные гармоники.

Чем меньше сопротивление R_y по сравнению с $X_{д.у}$ — сопротивлением обмотки ω_y дросселя, находящегося в режиме управления, тем большая часть наведенной э. д. с. e_{y1} прикладывается к обмотке ω_y дросселя II и тем больше один дроссель влияет на другой.

Изменение индукции в дросселях МУС по схемам рис. 6-9, б и в показано на рис. 6-11, е.

Описанная связь дросселей через цепь управления изменяет статическую характеристику (§ 6-6) и значительно увеличивает инерционность усилителя (§ 6-4).

Очень часто усилитель работает на нагрузку, имеющую активно-индуктивный характер (рис. 6-12). Пусть дроссель I находится в рабочем полупериоде, а дроссель II в полупериоде управления. При $\theta = \theta_s$ сердечник I насыщается и течет ток i_{p1} , определяемый как активным R_n , так и реактивным сопротивлением ωL_n . При этом ток i_{p1} отстает по фазе от напряжения на нагрузке u_n . При $\theta = \pi$ клапан D_1 закрывается и ток i_{p1} через дроссель I прекращается. После закрытия диода D_1 ток нагрузки i_n замыкается через диоды D_4 и D_3 , причем ток спадает с постоянной времени L_n/R_n . (Диоды D_4 и D_3 открыты под действием э. д. с. — $L_n di_n/dt$). В момент насыщения дросселя II ($\theta = \pi + \theta_s$) в обмотке ω_p протекает ток i_{p2} и ток в нагрузке i_n начинает нарастать.

Напряжение на нагрузке имеет ту же форму, что и при активной нагрузке. Поэтому расчетное уравнение для выходной характеристики (6-11) остается в силе. Изменяются формы тока нагрузки и рабочего тока. Среднее значение напряжения на индуктивности за период всегда равно нулю. Поэтому среднее значение тока нагрузки не зависит от индуктивности и по-прежнему определяется средним напряжением на нагрузке U_n и активным сопротивлением нагрузки R_n . Действующие значения токов i_n , i_p и коэффициент формы будут другими, чем при активной нагрузке.

Если постоянная времени нагрузки $T_n = L_n/R_n \gg 1/2f$, то рабочий ток i_p имеет прямоугольную форму, а ток в нагрузке не имеет пульсаций (рис. 6-12, в).

В случае схемы МУС по рис. 6-9, а нагрузка должна быть зашунтирована диодом D_0 . Через этот диод нагрузка будет закорачиваться в интервале $0 - \theta_s$.

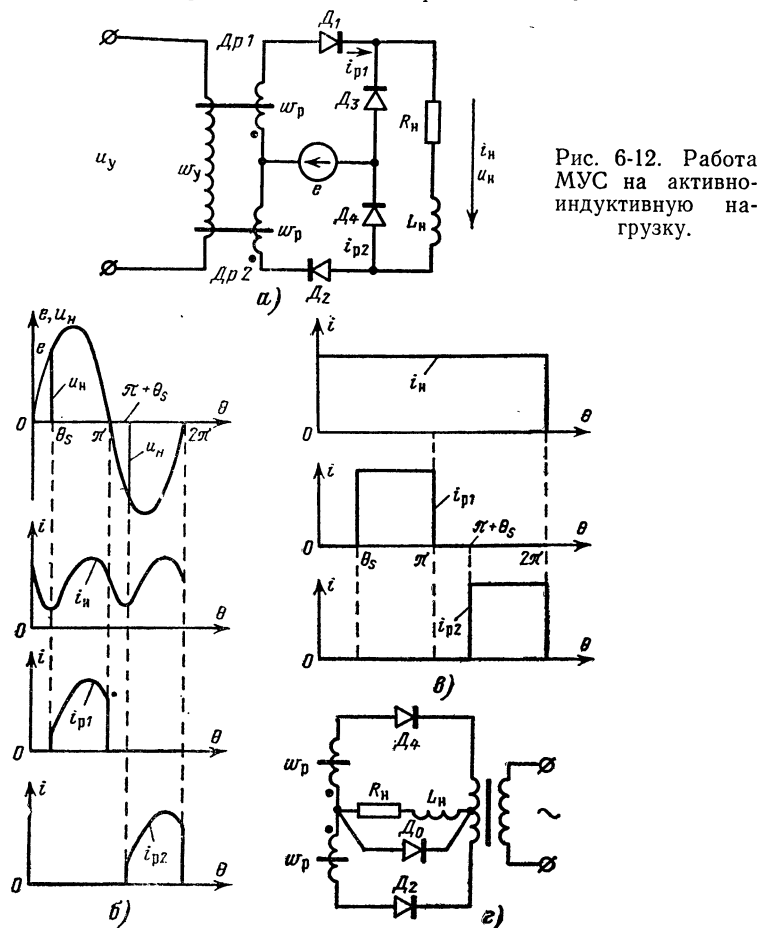


Рис. 6-12. Работа МУС на активно-индуктивную нагрузку.

6-4. Статические и динамические параметры МУС

Статические параметры

а) Крутизна характеристики управления. Для МУС характерной является зависимость выходного напряжения U_p только от ΔB_y :

$$U_p = U - 2f\omega_p S \Delta B_y. \quad (6-12)$$

Напряжение на нагрузке U_n равно:

$$U_n = \eta U_p = \eta (U - 2f\omega_p S \Delta B_y).$$

Изменение индукции ΔB_y определяется током управления I_y . Как видно из (6-12), выходное напряжение U_p не зависит от сопротивления рабочей цепи, и при данном токе управления МУС является источником напряжения. Если сопротивление $R_n \gg R_b + r_p$, то напряжение на нагрузке U_n мало зависит от ее сопротивления (§ 6-5).

Характеристикой управления МУС называется зависимость выходного напряжения от тока управления $U_p(I_y)$ или зависимость напряжения на нагрузке от тока управления $U_n(I_y)$.

Крутизна характеристики управления k_R :

$$k_R = \frac{\partial U_n}{\partial I_y} = \frac{\Delta U_n}{\Delta I_y}.$$

Подставляя в это выражение значение U_n из (6-11), получаем, что

$$k_R = \frac{\partial \eta (U - 2f\omega_p S \Delta B_y)}{\partial I_y} = -2f\eta\omega_p S \frac{\partial \Delta B_y}{\partial I_y}.$$

Но

$$I_y = H_y l / \omega_y. \quad (6-13)$$

Следовательно,

$$k_R = -2f\eta\omega_p \omega_y \frac{S}{l} \frac{\partial (\Delta B_y)}{\partial H_y}.$$

Производная $\partial \Delta B_y / \partial H_y$ характеризует наклон кривой размагничивания и условно может определяться эквивалентной магнитной проницаемостью размагничивания $\mu_p = -\partial \Delta B_y / \partial H_y$.

Введем понятие индуктивного сопротивления размагничивания:

$$X_p = \omega L_p = \omega \frac{\omega_p^2 S}{l} \mu_p. \quad (6-14)$$

Тогда из (6-13) и (6-14) имеем:

$$k_R = \frac{1}{\pi} \eta X_p \frac{\omega_y}{\omega_p}. \quad (6-15)$$

Таким образом, крутизна характеристики управления пропорциональна индуктивному сопротивлению размагничивания X_p и отношению чисел витков обмоток управления и рабочей обмотки.

б) **Коэффициенты усиления МУС.** Коэффициент усиления тока

$$k_i = \frac{\Delta I_n}{\Delta I_y} = \frac{\Delta I_n R_n}{\Delta I_y R_n} = \frac{\Delta U_n}{\Delta I_y R_n} = \frac{k_R}{R_n} = \frac{1}{\pi} \eta \frac{X_p}{R_n} \frac{\omega_y}{\omega_p} = \\ = \frac{1}{\pi} \frac{X_p}{R_p} \frac{\omega_y}{\omega_p}.$$

Коэффициент усиления напряжения

$$k_U = \frac{\Delta U_n}{\Delta U_y} = \frac{\Delta U_n}{\Delta I_y R_y} = \frac{k_R}{R_y}.$$

Коэффициент усиления мощности

$$k_P = k_i k_U = \frac{k_R^2}{R_y R_n}.$$

Динамические параметры

а) **Запаздывание в МУС.** Простейший однополупериодный МУС с большим сопротивлением цепи управления R_y имеет малую постоянную времени, так как последняя обратно пропорциональна R_y (6-20). Однако даже если постоянная времени очень мала, МУС имеет запаздывание.

Пусть напряжению управления U_{y1} соответствует напряжение на нагрузке U_{n1} , а при увеличении напряжения управления до U_{y2} на нагрузке должно установиться напряжение U_{n2} . Значение напряжения на нагрузке определяется значением B_y в начале рабочего полупериода (РП) (§ 6-2). В течение РП МУС неуправляем. Поэтому если мы подадим новое значение напряжения управления в начале РП (рис. 6-13, а), то новое значение B_{y2} , соответствующее новой величине U_{y2} , установится только во втором полупериоде. В третьем полупериоде установится новое напряжение на нагрузке U_{n2} , соответствующее U_{y2} .

Если напряжение U_{y2} появится в начале полупериода управления (ПУ), рис. 6-13, б, то новое значение напряжения на нагрузке установится во втором полупериоде. Таким образом, даже в идеальном случае, когда R_y равно бесконечности, МУС имеет запаздывание, которое может достигать 1—1,5 периода частоты питания. В двухполупериодном МУС запаздывание уменьшается до 0,5—1 периода. Такие усилители называются быстродействующими. Выбирая частоту питания (500—1000 Гц), можно получить очень малую инерционность усилителя.

б) **Постоянная времени. Добротность.** В усилителе с малым сопротивлением R_y процесс перехода от одного стационарного режима к другому сильно замедляется. Пусть МУС по схеме рис. 6-9, а имеет минимальное выходное напряжение ($U_{H0}=0$, $\theta_s=\pi$). Уменьшим E_y до 0 в момент $\theta=0$. В дросселе I в первом полупериоде напряжение на нагрузке остается U_{H0} , поскольку он нахо-

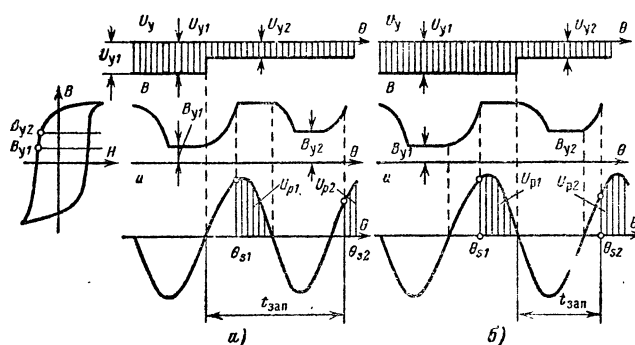


Рис. 6-13. Запоздывание в МУС.

а — напряжение управления изменилось в начале РП; б — напряжение управления изменилось в начале ПУ.

дится в рабочем полупериоде и $B_{нач} = -B_s$. Если бы $R_y = \infty$, то в дросселе II индукция осталась бы без изменения равной $-B_s$ (рис. 6-11, д) и во втором полупериоде в этом дросселе протекал максимальный ток нагрузки. Переходный процесс закончился. Поскольку R_y мало, то магнитопровод II в первом полупериоде подвергается воздействию э. д. с. e_{y1} и индукция изменяется до значения, меньшего $+B_s$. В результате во втором полупериоде ток нагрузки не достигнет максимального значения. Во втором полупериоде размагничивание магнитопровода I происходит за счет e_{y2} . Это размагничивание меньше, чем в первом полупериоде претерпел магнитопровод дросселя II , поскольку среднее значение размагничивающей э. д. с. $e_{y2} < e_{y1}$. От полупериода к полупериоду размагничивание дросселя за счет связи магнитопроводов через обмотки управления уменьшается, и в новом установившемся режиме $e_{y2} = e_{y1} = 0$. Переходный процесс может длиться десятки полупериодов частоты источника. При этом условии в течение полупериода можно считать, что среднее значение постоянной состав-

ляющей индукции B_0 не меняется. Для расчета постоянной времени цепи управления T_y можно использовать уравнение

$$\frac{d\Psi_y}{dt} + i_y R_y = E_y. \quad (6-16)$$

Поскольку для схемы рис. 6-9, а э. д. с., наводимые в обмотках w_y от рабочих обмоток w_{p1} и w_{p2} , вычитаются, то

$$\Psi_y = w_y S B_1 - w_y S B_2 = w_y S (B_1 - B_2).$$

Так как переменные составляющие индукций B_1 и B_2 одинаковы (рис. 6-10), то B_1 и B_2 различаются только постоянными составляющими:

$$B_1 - B_2 = 2B_0. \quad (6-17)$$

Из уравнений (6-16) и (6-17) можно получить:

$$\begin{aligned} T_y \frac{di_y}{dt} + i_y R_y &= \frac{E_y}{R_y}; \\ T_y &= \frac{2w_y S}{R_y} \frac{dB_0}{di_y}. \end{aligned} \quad (6-18)$$

Из рис. 6-11, б следует, что при $B_y = 0$ постоянная составляющая индукции B_0 равна:

$$B_0 = B_s - \Delta B_y / 2; \quad \frac{dB_0}{di_y} = -\frac{1}{2} \frac{d\Delta B_y}{di_y}.$$

Это справедливо для любого значения B_y . Согласно (6-12)

$$\Delta B_y = \frac{U - U_p}{2f w_p S} \text{ и } \frac{1}{2} \frac{d(\Delta B_y)}{di_y} = -\frac{1}{4f w_p S} \frac{dU_p}{di_y}. \quad (6-19)$$

Из (6-18), (6-19) с учетом (6-11) следует:

$$T_y = \frac{1}{2f} \frac{w_v}{w_p} \frac{1}{\eta} k_U = \frac{1}{2f} \frac{w_y}{w_p} \frac{1}{\eta R_y} k_R. \quad (6-20)$$

Таким образом, постоянная времени определяется крутизной статической характеристики управления $U_n = f(I_y)$.

С ростом коэффициентов усиления увеличивается k_R , а следовательно, и постоянная времени T_y .

Для оценки быстродействия МУС вводится понятие добротности усилителя $D = k_p / T_y$.

Чем больше добротность D , тем больше быстродействие МУС. Воспользовавшись (6-20), получим:

$$D = 2f\eta \frac{\omega_p}{\omega_y} \frac{k_R}{R_H} = 2f\eta \frac{\omega_p}{\omega_y} \frac{R_y}{R_H} k_U.$$

В переходном режиме МУС можно представить инерционным звеном первого порядка с запаздыванием.

В операторной форме процесс описывается так:

$$(T_y p + 1) \Delta U_H(p) = k_U e^{-\tau p} \Delta U_Y(p),$$

где τ — время запаздывания, которое можно принять $1/4 f$ [Л.6-5].

6-5. Влияние различных факторов на работу МУС

а) Влияние свойств магнитного материала. На характеристику управления большое влияние оказывают свойства материала магнитопровода.

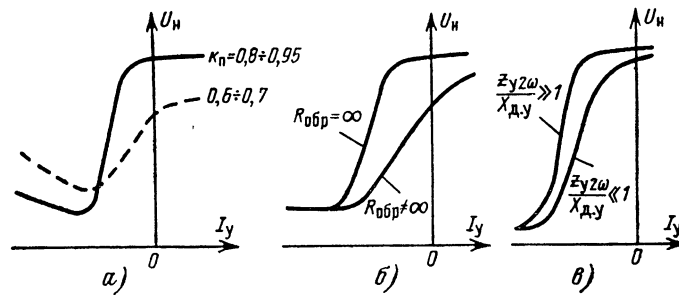


Рис. 6-14. Влияние различных факторов на характеристики МУС.

а — влияние коэффициента прямоугольности k_n ; б — влияние обратного сопротивления вентилей ($R_{обп}$); в — влияние сопротивления цепи управления.

Для характеристики материала вводится понятие коэффициента прямоугольности $k_n = B_r/B_s$. Обычно, чем больше коэффициент k_n , тем круче характеристика управления, тем больше линейная часть характеристики (рис. 6-14, а).

В режиме максимальной отдачи напряжение на нагрузке согласно (6-12) равно:

$$U_{HN} = \eta (U - 2f\omega_p S \Delta B_{y.H}),$$

где $\Delta B_{y.n}$ — перепад индукции, соответствующий концу линейного участка MN (рис. 6-8, в).

Из (6-12) можно получить:

$$U_{нN} = \eta U \left(1 - \frac{\Delta B_{y.n}}{2B_m} \right) = \beta \eta U,$$

где
$$\beta = 1 - \frac{\Delta B_{y.n}}{2B_m}.$$

Коэффициент β характеризует часть напряжения, которая ложится на дроссель в режиме максимальной отдачи. С ростом k_n коэффициент $\Delta B_{y.n}/2B_m$ уменьшается, а β увеличивается.

б) **Влияние свойств вентиляй.** Прямое сопротивление вентиляй входит в общее сопротивление рабочей цепи. С увеличением прямого сопротивления уменьшается к. п. д. рабочей цепи усилителя η .

На характеристику усилителя с самонасыщением сильное влияние оказывает обратное сопротивление вентиляй $R_{обр}$ (рис. 6-14, б). Если $R_{обр} \neq \infty$, то в управляющий полупериод через рабочую обмотку проходит обратный ток, размагничивающий магнитопровод (увеличивается ΔB_y), при этом напряжение на нагрузке и ток в ней уменьшаются.

Напряженность от обратного тока равна:

$$H_{обр} = I_{обр} \omega_p / l.$$

Для того чтобы обратный ток не сказывался на работе усилителя, необходимо соблюдение неравенства

$$H_{обр} \ll \Delta H_y, \quad (6-21)$$

где ΔH_y — напряженность поля управления, которая обеспечивает изменение тока I_n от $I_{мин}$ до $I_{макс}$.

Чем лучше магнитный материал, тем меньше ΔH_y требуется для управления усилителем, тем меньше значение допустимого обратного тока.

в) **Влияние питающего напряжения.** Согласно (6-11) напряжение на нагрузке равно:

$$U_n = \eta (U - 2f\omega_p S \Delta B_y).$$

При неизменном токе управления ΔB_y постоянно и напряжение на нагрузке прямо пропорционально питающему напряжению U . Если напряжение питания $U >$

$> 4 f \omega_p S B_s$, то напряжение холостого хода $U_{н0}$ растет пропорционально напряжению сети.

г) **Влияние сопротивления нагрузки.** Уравнение (6-11) можно записать в следующем виде:

$$U_n = \frac{1}{1 + \frac{R_B + r_p}{R_n}} (U - 2f \omega_p S \Delta B_y). \quad (6-22)$$

Очевидно, что с ростом сопротивления нагрузки R_n знаменатель (6-22) уменьшается, а напряжение на нагрузке растет. Однако обычно $R_n \gg r_p + R_B$, поэтому, напряжение на нагрузке при этом условии мало зависит от сопротивления R_n . Значение тока нагрузки $I_n = U_n / R_n$, очевидно, будет меняться обратно пропорционально сопротивлению R_n . Таким образом, усилитель с самонасыщением ведет себя как источник напряжения.

д) **Влияние сопротивления цепи управления.** Режим вынужденного намагничивания имеет место при условии

$$z_{y2\omega} / X_{д.у} \gg 1,$$

где $z_{y2\omega}$ — эквивалентное сопротивление цепи управления при удвоенной частоте питания; $X_{д.у}$ — динамическое сопротивление обмотки управления при удвоенной частоте в полупериод управления:

$$X_{д.у} = \frac{2\omega \mu_p \omega_y^2 S}{l}.$$

При $z_{y2\omega} / X_{д.у} \ll 1$ имеет место режим свободного намагничивания (малое сопротивление цепи управления четным гармоникам тока). При уменьшении сопротивления цепи управления характеристика сдвигается вправо и изменяется крутизна характеристики [Л. 6-8] — рис. 6-14, в.

Фундаментальное исследование МУС при различных видах нагрузки и различных сопротивлениях цепи управления проведено в [Л. 6-3].

6-6. Быстродействующие магнитные усилители

Для того чтобы двухполупериодный усилитель был быстродействующим, необходимо, чтобы рабочие полупериоды одного сердечника не влияли на управляющие полупериоды другого.

Рассмотрим сначала работу однополупериодного МУС по схеме рис. 6-15, а. В отличие от схемы рис. 6-4 в цепь управления включе-

ны вентиль B_1 и источник опорного переменного напряжения U_{\sim}' . Полярности включения источников U_{\sim} и U_{\sim}' должны соответствовать рис. 6-15, а.

Пусть в рабочей цепи имеет место РП, т. е. к аноду вентиля приложен положительный потенциал, а к катоду отрицательный. В это время опорное напряжение U_{\sim}' создает на аноде вентиля B_1 отрицательный потенциал, а на катode положительный. В результате этот вентиль запирается и цепь управления оказывается разорванной.

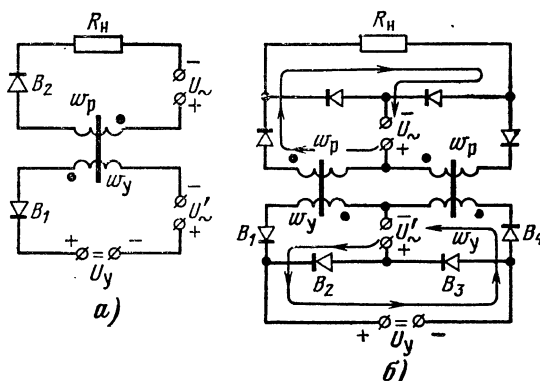


Рис. 6-15. Быстродействующий магнитный усилитель с малым сопротивлением цепи управления.

Электродвижущая сила, возникающая на обмотке управления w_y в результате изменения индукции под действием напряжения U_{\sim} , не создает в цепи управления тока, так как вентиль B_1 заперт. Не проходит ток и от источника сигнала U_y .

В следующий, управляющий полупериод вентиль B_2 в рабочей цепи запирается и ток в ней не проходит. В цепи управления в связи с изменением полярности U_{\sim}' вентиль B_1 открывается и процесс размагничивания сердечника определяется суммой напряжений U_y и U_{\sim}' . Если U_y отсутствует, то размагничивание сердечника производится только за счет опорного напряжения U_{\sim}' . Величина его выбирается такой, чтобы к концу ПУ индукция достигла значения $-B_s$. При наличии сигнала U_y в цепи действует разность напряжений U_y и U_{\sim}' . В результате к концу ПУ индукция в сердечнике не достигнет значения $-B_s$. По мере увеличения сигнала U_y изменение индукции в ПУ будет уменьшаться. Если сигнал U_y создает индукцию $+2B_s$, то изменение индукции в ПУ равно нулю. К концу ПУ индукция будет такая же, как и к началу этого полупериода, т. е. $+B_s$. В этом случае в следующий РП в нагрузке будет проходить максимальный рабочий ток.

Таким образом, схема рис. 6-15, а позволяет устранить влияние рабочей цепи на цепь управления. Вентиль B_1 играет роль коммути-

рующего устройства в цепи управления. В РП сопротивление вентиля B_1 равно бесконечности, и рабочая цепь не влияет на цепь управления. В управляющий полупериод сопротивление вентиля B_1 равно нулю, и процесс размагничивания определяется только цепью управления. Таким образом, и при конечном сопротивлении цепи управления МУС по схеме рис. 6-15, а будет быстродействующим.

Эта же идея использована в двухполупериодной схеме рис. 6-15, б. Рабочая цепь не отличается от этой цепи по схеме рис. 6-9, б. В цепь управления введены диоды и опорное напряжение U'_\sim . При взятой полярности источника питания рабочей цепи в левом сердечнике будет РП, а в правом — ПУ.

Направление прохождения рабочего тока указано стрелкой. Под действием опорного напряжения U'_\sim диод B_1 заперт. В результате цепь этой обмотки управления разорвана и э. д. с., возникающая в ней под действием изменения индукции в сердечнике, не оказывает влияния на работу обмотки управления правого сердечника, который в это время находится в ПУ.

Под действием опорного напряжения открываются два других диода B_2 и B_4 , и процесс размагничивания второго сердечника происходит под действием напряжения U'_\sim и напряжения U_y . На рис. 6-15, б стрелкой показано прохождение размагничивающего тока, создаваемого опорным напряжением U'_\sim . Обычно опорное напряжение получается с помощью специального трансформатора, который подключен к источнику питания рабочей цепи. Имеется большое число схем БМУ [Л. 6-5], но принцип их действия сводится к тому, чтобы устранить взаимное влияние сердечников.

6-7. Реверсивные усилители

а) Принцип действия. Особенности характеристики управления. Все рассмотренные ранее усилители обладали общей чертой: при изменении полярности сигнала управления ток в нагрузке не изменял своей фазы или знака. Для реверса двигателей переменного тока необходимо, чтобы изменилось направление вращения поля в машине, что достигается изменением фазы потока на 180° в одной из обмоток. Для регулирования частоты вращения таких двигателей применяются реверсивные МУ. В этих усилителях при изменении знака тока управления фаза тока в нагрузке изменяется на 180° . Схема реверсивного дроссельного усилителя изображена на рис. 6-16. Вторичная обмотка питающего трансформатора имеет среднюю точку. Проходящий через нагрузку ток I_n равен разности токов $I_n = I_1 - I_2$, где I_1 — ток, определяемый левым МУ; I_2 — ток, определяемый правым МУ. Поскольку через нагрузку проходит разность токов I_1 и I_2 , схема называется дифференциальной.

Эти МУ нашли широкое применение в различных областях техники [Л. 6-1, 13-1].

Рассмотрим случай, когда $I'_{cm1} = I'_{cm2} = 0$. Для получения симметричной выходной характеристики оба усилителя должны быть идентичными. В этом случае ток, проходящий через нагрузку, будет равен нулю, поскольку при любом значении тока управления соблюдается равенство $I_1 = I_2$. Создадим поле смещения в усилителях таким образом, чтобы характеристика МУ₁ переместилась влево на

$I'_{cm1} = I_{cm} \omega_{cm} / \omega_p$, а характеристика MY_2 вправо на $I'_{cm2} = I_{cm} \omega_{cm} / \omega_p$. При отсутствии сигнала управления ток в нагрузке должен быть равен нулю. Точная установка нуля производится сопротивлением R_{cm} . При положительном сигнале ток I_1 будет возрастать, а ток I_2 снижается.

Если принять, что зависимости $I_1(I_y)$ и $I_2(I_y)$ линейны, то можно написать:

$$I_H = I_1 - I_2 = I_0 + I'_{cm} + I'_y - (I_0 + I'_{cm} - I'_y) = 2I'_y.$$

Таким образом, в реверсивном усилителе коэффициент усиления тока возрастает в 2 раза (рис. 6-17) по сравнению с обычным одноконтурным усилителем.

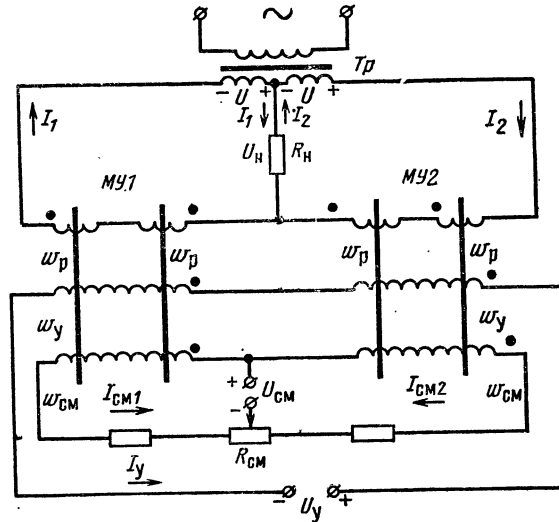


Рис. 6-16. Реверсивная схема на дроссельных усилителях.

Для работы выбирают линейный участок. По сравнению с одноконтурным усилителем линейная зона характеристики управления значительно увеличивается. Поскольку результирующий ток холостого хода равен нулю, то кратность изменения тока в нагрузке приобретает бесконечно большое значение (см. § 13-1).

Работа усилителей MY_1 и MY_2 была рассмотрена таким образом, как будто эти усилители работают совершенно независимо, не влияя друг на друга. В действительности эти усилители связаны друг с другом через нагрузку R_n . Положим, что внутреннее сопротивление питающего трансформатора равно нулю. При положительном сигнале на сопротивлении нагрузки появляется падение напряжения U_n . Это напряжение, складываясь с напряжением правой половины обмотки трансформатора, действует на правый усилитель. В результате напряжение, приложенное к правому дросселю, увеличивается,

что ведет к возрастанию тока холостого хода и изменению характеристики MU_2 . При полном насыщении MU_1 к MU_2 прикладывается удвоенное напряжение. В связи с этим напряжение, на которое должен рассчитываться каждый дроссель, равно:

$$U_d = 2U_n.$$

Мощность каждого дросселя соответственно равна:

$$P = 2U_n I_n.$$

Полная мощность реверсивного каскада равна:

$$P_{\Sigma} = 2P = 4U_n I_n.$$

Таким образом, полная мощность реверсивного усилителя равна учетверенной мощности нагрузки. Это в свою очередь ведет к увеличению в 4 раза затраты активных материалов

Из-за влияния дросселей друг на друга увеличивается ток холостого хода каждого усилителя, снижается коэффициент усиления мощности.

б) **Схемы реверсивных усилителей.** На рис. 6-18 изображена схема на двух МУС. Схема принципиально не отличается от предыдущей. Ради упрощения обмотка w_{cm} не показана. На рис. 6-19 изображено влияние смещения характеристик отдельных тактов на характеристику управления усилителя. В случае рис. 6-19, а усилитель имеет хорошую линейность характеристики управления и большой коэффициент усиления тока. В режиме максимальной отдачи

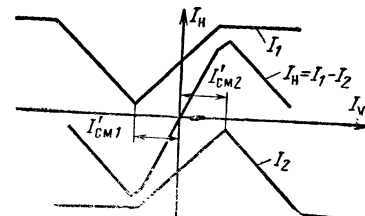


Рис. 6-17. Характеристика управления реверсивного усилителя.

к одному усилителю прикладывается удвоенное напряжение источника питания.

При нагрузке на постоянном токе широкое распространение получила схема рис. 6-20. Каждый из усилителей, собранный по схеме рис. 6-10, а, работает на балластную нагрузку R_6 . Полезная нагрузка R_n включается на напряжение, равное разности напряжений на балластных сопротивлениях R_6 , т. е. имеем дифференциальный усилитель. Для того чтобы уменьшить взаимное влияние усилителей, сопротивление нагрузки берется значительно выше балластных сопротивлений.

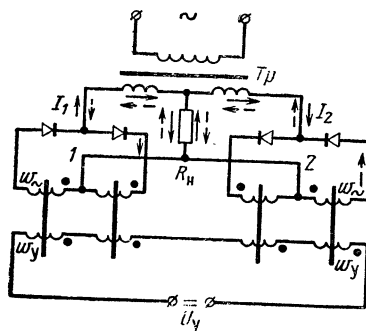


Рис. 6-18. Реверсивный усилитель на двух МУС.

Рассмотрим основные соотношения для такого усилителя [Л. 6-2]. Реальную характеристику каждого усилителя представим линеаризированной рис. 6-21, а. Смещение выбрано так, что напряжение холостого хода U_0 составляет половину U_m . На участке АВ МУС является источником напряжения, и для МУС может быть

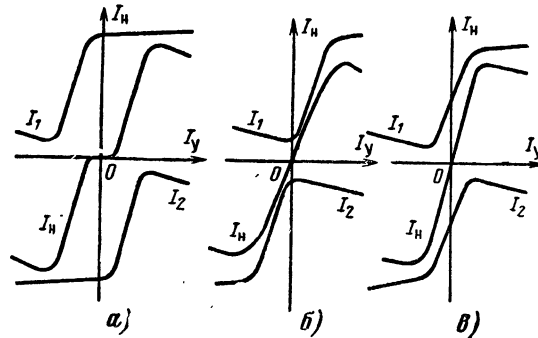


Рис. 6-19. Характеристика управления реверсивного МУС при различных м. д. с. смещения.

а — смещение отсутствует; б — характеристики смещены так, что при $I_y = 0$ в усилителях протекает минимальный ток нагрузки; в — при $I_y = 0$ каждый усилитель работает на середине своей характеристики управления.

составлена схема замещения рис. 6-21, б. На участке ВС дроссель насыщен и при $I_y > I_{ym}$ напряжение на нагрузке остается постоянным. На участке $I_y < 0$ и $|I_y| > I_{y0}$ можно считать, что МУС ведет

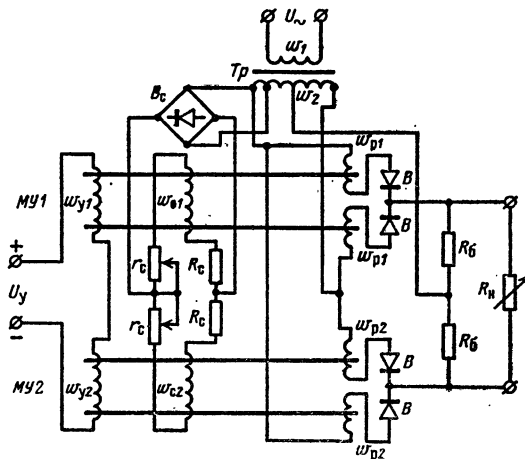


Рис. 6-20. Схема реверсивного МУС с нагрузкой на постоянном токе.

себя как дроссельный усилитель [Л. 6-2]. Ввиду того, что крутизна характеристики этого участка по сравнению с крутизной участка AB очень мала, можно считать, что AD идет параллельно оси абсцисс. Таким образом, при $I_y < 0$ и $|I_y| > |I_{y0}|$ усилитель работает в режиме холостого хода. Так как дроссельный усилитель является источником тока [Л. 6-1], то схема замещения представлена на рис. 6-21, $в$.

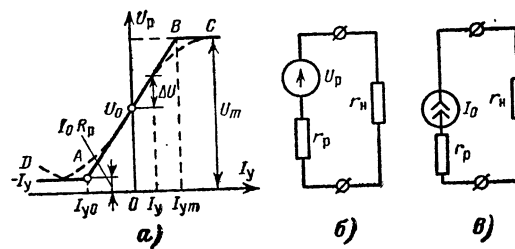


Рис. 6-21. Линеаризованная характеристика управления такта усилителя и схемы замещения для различных режимов работы.

В общем случае возможны три режима работы усилителя:

1. Двухтактный режим, когда оба усилителя работают на линейном участке AB .
2. Однотактный режим, когда один из усилителей работает на линейном участке AB , а другой в режиме холостого хода — участок AD .
3. Режим насыщения, когда один из усилителей работает в зоне насыщения — участок BC , и другой в режиме холостого хода — участок AD .

Если $R_6 \ll R_n$, то работу усилителей можно считать независимой. Характеристику управления получаем сложением характеристик верхнего и нижнего усилителей (рис. 6-22). На участке CD имеем двухтактный режим, на участке DE однотактный режим ($MУC_2$ работает на холостом ходу); на участке EF режим насыщения ($MУC_1$ насыщен). При переходе с двухтактного режима на однотактный крутизна характеристики уменьшается в 2 раза. Для анализа работы усилителя в двухтактном режиме используем схему замещения рис. 6-23.

Здесь

$$U_1 = U_0 + \Delta U = U_0 + k_R I_y \text{ — выходное напряжение одного плеча,}$$

$$U_2 = U_0 - \Delta U = U_0 - k_R I_y \text{ — выходное напряжение второго плеча.}$$

Схему рис. 6-23, $а$ с помощью теоремы об эквивалентном генераторе можно привести к схеме рис. 6-23, $б$. Эквивалентная э.д.с. генератора равна:

$$U_{э.д} = \frac{U_1 - U_2}{1 + \frac{r_p}{R_6}} = \frac{2\Delta U}{1 + \frac{r_p}{R_6}}.$$

Эквивалентное сопротивление генератора равно:

$$r_{\text{э.д}} = \frac{2r_p R_6}{r_p + R_6}. \quad (6-23)$$

Напряжение на нагрузке равно:

$$U_H = \frac{2\Delta U R_H}{\left(1 + \frac{r_p}{R_6}\right) R_H + r_{\text{э.д}}}. \quad (6-24)$$

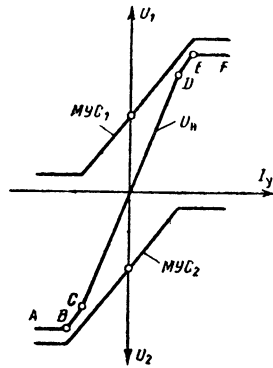


Рис. 6-22. Характеристика управления реверсивного МУС по схеме рис. 6-20.

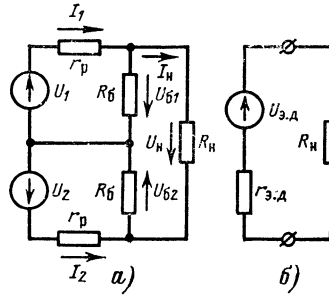


Рис. 6-23. Схема замещения двухтактного реверсивного усилителя с нагрузкой на постоянном токе.

Введем относительную величину сопротивлений

$$\alpha = R_6/R_H; \quad \gamma = r_p/R_6. \quad (6-25)$$

Используя (6-23) — (6-25), получаем:

$$U_H = \frac{2\Delta U}{1 + \gamma + 2\alpha\gamma} = \frac{2k_R}{1 + \gamma + 2\alpha\gamma} I_y = k_{RD} I_y, \quad (6-26)$$

где k_{RD} — коэффициент усиления двухтактного усилителя.

Токи в каждом из плеч и напряжения на балластных сопротивлениях можно найти, с помощью схемы замещения рис. 6-23, а:

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \frac{U_1 + \alpha U_H}{R_6(1 + \gamma)}; & U_{61} &= \frac{U_1 - \alpha\gamma U_H}{1 + \gamma}; \\ I_2 &= \frac{U_2 - \alpha U_H}{R_6(1 + \gamma)}; & U_{62} &= \frac{U_2 + \alpha\gamma U_H}{1 + \gamma}. \end{aligned} \right\} \quad (6-27)$$

При увеличении положительного тока I_y растет напряжение на нагрузке согласно (6-26), а ток I_2 падает до тех пор, пока не станет равным току холостого хода:

$$I_2 = I_0.$$

Двухтактный режим переходит в одноктактный.

На рис. 6-24 показаны характеристики «вход — выход» при $U_0 = 0,5 U_m$, $\gamma = 0,1$ и переменном значении α . Эти кривые показывают:

1. С ростом α сокращается линейная зона, хотя крутизна характеристики меняется незначительно.

2. При увеличении α резко падает крутизна характеристики одноктактного режима.

Согласно рис. 6-24 крутизна характеристики одноктактного режима при $\alpha = 1$ уменьшается в 3,5 раза, а коэффициент усиления мощности падает более чем в 12 раз по сравнению с двухтактным режимом. По этой причине параметры α , γ и ток смещения должны выбираться таким образом, чтобы во всем рабочем диапазоне усилитель не выходил из зоны двухтактного режима.

Обычно смещение выбирается таким образом, что двухтактный режим сменяется насыщением, т. е. когда одновременно одно плечо выйдет в режим насыщения, а второе в режим холостого хода.

Аналитический расчет характеристики управления в одноктактном режиме приведен в [Л. 6-2].

Необходимо отметить, что рассмотренная схема имеет существенный недостаток — низкий к. п. д. рабочей цепи. Дело в том, что $R_b \ll R_n$ и поэтому большая часть выходной мощности усилителя тратится бесполезно в балластном сопротивлении. Такая схема применяется при малых мощностях в нагрузке. При больших мощностях используются схемы с повышенным к. п. д. (рис. 13-4, б) [Л. 6-3, 6-2, 6-5].

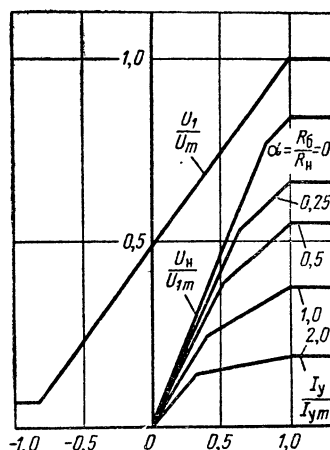


Рис. 6-24. Характеристика управления реверсивного МУС при различных α .

6-8. Материалы и магнитопроводы, применяемые для усилителей. Расположение обмоток

а) **Материалы.** Основные материалы, используемые в усилителях, можно разбить на две группы — электротехнические стали (сплавы железа и кремния) и пермаллой — (сплавы железа, никеля и других легирующих добавок). Подробные данные о свойствах материалов можно найти в [Л. 6-7]. Выбор материала магнитопровода довольно сложен и рассмотрен в [Л. 6-1].

Выходная мощность усилителя связана с индукцией насыщения B_s . Чем больше B_s , тем большая мощность может быть снята с сердечника [Л. 6-1, 6-2, приложение I].

В усилителях малой мощности (до 1 Вт) целесообразно применять дорогие сплавы 79НМ, 79НМА, 80НХС, 74НМД, 76НХД, имеющие небольшую индукцию насыщения, позволяющие получить высокую чувствительность МУС.

При больших мощностях усилителя целесообразно применять более дешевые холоднокатаные стали, имеющие высокую индукцию насыщения.

б) **Магнитопровод.** К магнитопроводам усилителей предъявляется ряд требований: максимальное использование магнитных свойств материала, малый отход материала при изготовлении магнитопровода, возможность изготовления усилителя с минимальными габаритами и массой, технологичность изготовления как магнитопроводов, так и обмоток.

С точки зрения лучшего использования свойств магнитного материала необходимо, чтобы воздушные зазоры в магнитной цепи были полностью исключены. Воздушные зазоры даже в десятые доли миллиметра приводят к резкому ухудшению характеристик усилителя, так как м.д.с., которая необходима для проведения потока управления через воздушный зазор, может быть соизмерима с м.д.с., которая тратится в магнитопроводе для создания поля управления. При этом ухудшаются коэффициенты усиления, чувствительность и другие параметры. С этой точки зрения лучшим является тороидальный магнитопровод, набранный из кольцеобразных штампованных пластин. Однако применение такого магнитопровода связано с рядом недостатков — велик отход материала, для таких магнитопроводов могут быть использованы только изотропные материалы. Текстурированные материалы типов 65НП, Э310 и др., имеющие лучшие магнитные свойства, применять не рекомендуется, так как нельзя полностью использовать их хорошие магнитные характеристики. Тороидальные магнитопроводы из кольцевых пластин трудно изготовить из материалов малой толщины, при этом тяжело создать надежную изоляцию между отдельными листами.

Более совершенным является ленточный тороидальный магнитопровод. Он позволяет применять текстурированный магнитный материал, свести к минимуму отходы при изготовлении. Воздушный зазор в магнитной цепи, образуемый за счет неплотного прилегания ленты друг к другу, исключительно мал, и им можно пренебречь. Положительным свойством тороидального магнитопровода является отсутствие магнитного рассеяния.

Недостатками тороидальных магнитопроводов являются низкий коэффициент заполнения окна сердечника медью обмотки и сложность намотки обмоток. Для нанесения обмоток требуются специальные намоточные станки с относительно низкой производительностью. При более полном заполнении окна обмоткой (для получения малых габаритов усилителя) приходится прибегать к ручной намотке.

Тороидальные магнитопроводы применяются в том случае, когда мощность усилителя невелика и требуется высокая чувствительность и высокие коэффициенты усиления.

Магнитные свойства железоникелевых сплавов в значительной степени зависят от механических воздействий на магнитопровод. Причем чем выше магнитная проницаемость, тем сильнее заметно влияние механических усилий. В связи с этим тороидальные магнитопроводы помещаются в специальный штампованный алюминиевый корпус. Крышка корпуса изготавливается из пластмассы, дабы не образовать короткозамкнутого витка вокруг магнитопровода. Магни-

топковод укрепляется в корпусе путем заливки специальной массой, обладающей эластичностью (смягчает удары), малой усадкой и низким коэффициентом температурного расширения.

Основные параметры тороидальных магнитопроводов, рекомендуемые Межведомственной нормалью, приведены в [Л. 6-2, 6-7].

При использовании горячекатаной (нетекстурованной) стали применяются Ш-образные магнитопроводы (рис. 6-25, а). Для уменьшения влияния воздушного зазора сердечник собирается так, чтобы

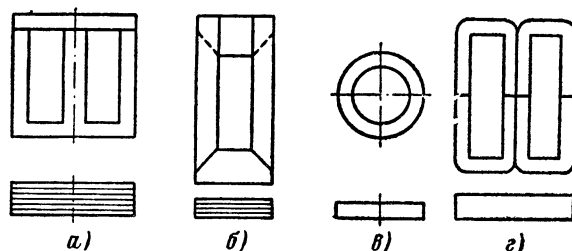


Рис. 6-25. Магнитопроводы магнитных усилителей.

а — Ш-образные; б — П-образные с косым срезом; в — ленточный тороидальный; г — ленточный броневого.

перемычка одного слоя находилась против основания Ш-образной пластины другого слоя.

При использовании холоднокатанных текстурованных сталей используют сердечники П-образной формы (рис. 6-25, б). Длинные стороны магнитопровода идут вдоль проката стали. Достоинством штампованных магнитопроводов является возможность изготовления обмоток на высокопроизводительных станках. Параметры пластин таких магнитопроводов приведены в [Л. 6-7, 6-8].

Хорошими свойствами обладают разрезной ленточный магнитопровод, выполненный согласно рис. 6-25, г. Сердечник наматывается из ленты на прямоугольную оправку. После отжига сердечник разрезается на две части. Места стыков тщательно подгоняются друг к другу с помощью шлифовки для уменьшения магнитного сопротивления. Обмотки такого усилителя изготавливаются на высокопроизводительных станках. После сборки усилителя половины магнитопровода надежно прижимаются друг к другу с помощью специальных стяжек. Такие сердечники применяются при средних и больших мощностях.

в) **Расположение обмоток.** В зависимости от схемы усилителя и применяемого сердечника меняется место расположения обмоток (рис. 6-26). В МУ на двух Ш-образных сердечниках рабочая обмотка и обмотка управления располагаются на среднем стержне (рис. 6-26, а). Если МУ имеет общую обмотку управления, то обмотки располагаются согласно рис. 6-26, б. Применение общей обмотки управления позволяет снизить габарит усилителя и уменьшить сопротивление обмотки управления. Облегчаются требования к изоляции, так как поток рабочих обмоток не наводит большой э.д.с. в обмотке управления. Следует отметить, что при общей обмотке управления утяжеляется технология производства и ухудшаются условия тепло-

отдачи. Расположение обмоток на П-образных и тороидальных сердечниках показано на рис. 6-26, *в* — *е*. В случае общей обмотки управления рабочие обмотки w_p включаются встречно (рис. 6-10, *а*).

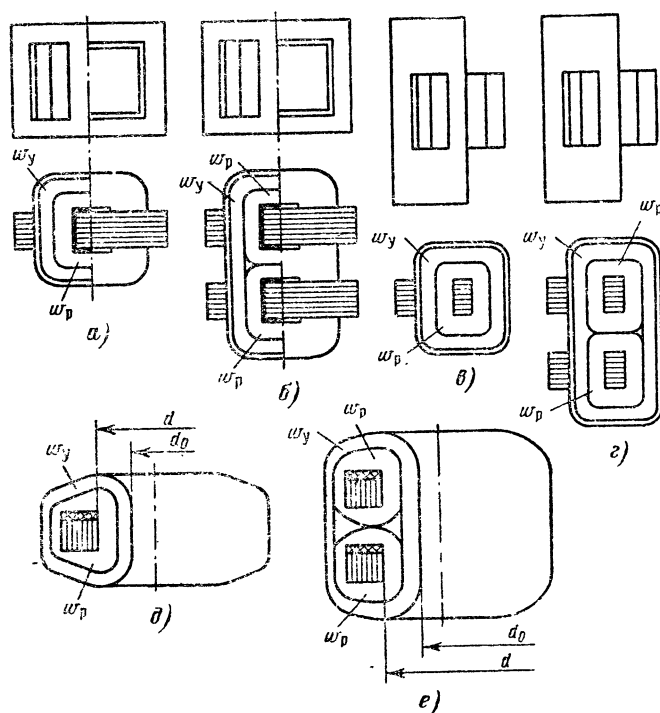


Рис. 6-26. Расположение обмоток на магнитопроводе.

а — Ш-образный с отдельной обмоткой w_y ; *б* — Ш-образный с общей w_y ; *в* — П-образный с отдельной w_y ; *г* — П-образный с общей w_y ; *д* — тороидальный с отдельной w_y ; *е* — тороидальный с общей w_y .

Глава седьмая

ИЗОЛЯЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ*

7-1. Условия работы изоляции и требования, предъявляемые к ней

Токоведущие части аппаратов во время работы находятся под напряжением и должны быть изолированы соответствующим образом.

* При составлении этой главы частично использован материал из [Л. 1-8].

Надежность работы аппарата, его масса, габариты и стоимость в значительной степени определяются изоляцией. Особенно это относится к аппаратам с номинальным напряжением выше 3 кВ.

Для коммутационных аппаратов необходимо обеспечить изоляцию между следующими элементами конструкции: между контактами одного полюса в отключенном положении; между токоведущими частями различных полюсов; между токоведущими частями и заземленными деталями.

При наличии защитных оболочек (кожухов) меняется расстояние от подвижных контактов до заземленных частей. Изоляция между токоведущими частями и землей должна проверяться как во включенном, так и отключенном положениях аппарата.

В аппаратах, имеющих электромагнитные элементы, обмотки электромагнитов должны быть надежно изолированы от магнитопроводов, поскольку эти магнитопроводы могут либо заземляться, либо находиться под потенциалом токоведущей части полюса.

Изоляция аппарата зависит от его номинального напряжения.

Под номинальным напряжением аппарата понимается линейное напряжение трехфазной системы, в которой должен работать аппарат. В аппаратах постоянного тока номинальное напряжение аппарата равно напряжению между зажимами источника энергии.

Т а б л и ц а 7-1

Номинальные рабочие напряжения в установках с напряжением ниже 1000 В (ГОСТ 721-74)

Номинальные постоянные напряжения, В	12	24	36	48	60	110	220	440
Номинальные междуфазные переменные напряжения, В	36	42	220	380	660	—	—	—
Номинальные однофазные напряжения, В	12	24	36	42	127	220	380	—

Номинальное напряжение определяет свойства изоляции или класс изоляции аппарата. Из-за особенностей условий работы аппаратов и требований эксплуатации они делятся на аппараты с номинальным напряжением до 1000 В и свыше 1000 В.

Шкала стандартных номинальных напряжений аппаратов первой группы приведена в табл. 7-1 и второй — в табл. 7-2.

Т а б л и ц а 7-2

Номинальные и наибольшие рабочие напряжения для трехфазных систем свыше 1000 В и частотой 50 Гц

Номинальные междуфазные напряжения, кВ	3	6	10	15	20	35	110	150	220	330	500
Наибольшие рабочие на- пряжения, кВ	3,6	7,2	12,0	17,5	24	40,5	126	172	252	363	525

Для компенсации падения напряжения в сети и в обмотках источников питания напряжение на зажимах этих источников поддерживается несколько выше номинального. В связи с этим, кроме номинального напряжения, устанавливается наибольшее рабочее напряжение, при котором аппарат должен работать сколько угодно долго. В аппаратах с $U_n < 1000$ В наивысшее рабочее напряжение составляет $1,05 U_n$. Для аппаратов с $U_n > 1000$ В наибольшее рабочее напряжение составляет $1,15 U_n$, если $U_n < 220$ кВ. Для аппаратов $U_n = 330$ кВ наибольшее рабочее напряжение на 10% выше номинального, а при $U_n = 500$ кВ всего на 5% выше номинального.

В процессе работы аппарата его изоляция подвергается воздействию напряжений, значительно превышающих номинальное значение. Изоляция аппарата должна надежно выдерживать эти повышенные напряжения, величины которых приведены в ГОСТ 1516-73 [Л.7-1].

В аппаратах на напряжение свыше 1000 В различают внутреннюю и внешнюю изоляцию.

Внутренняя изоляция — это часть конструкции аппарата, где изолирующей средой является жидкий, полужидкий, твердый диэлектрик или газ под давлением. Электрическая прочность этой изоляции опреде-

ляется пробоем промежутков в этой среде или перекрытием в жидком или полужидком диэлектрике по изолирующим поверхностям.

Основным свойством внутренней изоляции является практическая независимость ее электрической прочности от внешних атмосферных условий.

Внешняя изоляция — часть изолирующего устройства, где изолирующей средой является атмосферный воздух и электрическая прочность которой определяется пробоем воздушных промежутков или перекрытием в воздухе по изолирующим поверхностям. Основным признаком внешней изоляции является зависимость ее прочности от атмосферных условий.

Рассмотрим в качестве примера трансформатор тока ТФН-35 (рис. 7-1). Его первичная обмотка 1 изолирована от земли по классу изоляции 35 кВ. Вторичная обмотка 2 изолируется от сердечника 3 и имеет испытательное напряжение 2 кВ. Для обеспечения безопасности обслуживания один конец вторичной обмотки заземляется.

В качестве изолирующего материала между первичной обмоткой, находящейся под высоким напряжением, и заземленной вторичной используется кабельная бумага в масле 4. Изоляция между первичной и вторичной обмотками называется внутренней. При повреждении внутренней изоляции внутри аппарата возникает электрическая дуга, которая ведет к разрушению аппарата, поскольку кожух не рассчитан на большие внутренние избыточные давления. Пробой внутренней изоляции обычно ведет к тяжелой аварии. Поскольку этот аппарат предназначен для работы на открытом воздухе, он защи-

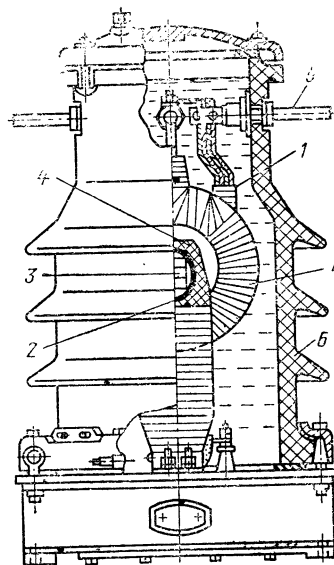


Рис. 7-1. Трансформатор тока напряжением 35 кВ типа ТФН-35.

щен фарфоровым кожухом 6, имеющим развитую ребристую поверхность. Ребра позволяют получить необходимую электрическую прочность даже в том случае, когда изолятор подвергается воздействию дождя, пыли и грязи, содержащихся в окружающем воздухе. Повреждение внешней изоляцией сопровождается возникновением дуги между выводом аппарата 5 и основанием. При появлении такого повреждения срабатывает релейная защита и отключает участок сети, на котором находится поврежденный аппарат. Поскольку длительность короткого замыкания невелика и дуга загорается в воздухе, после отключения цепи и погасания дуги аппарат полностью восстанавливают свою работоспособность. Иногда дуга может вызвать небольшое оплавление ребер фарфора, которое мало сказывается на прочности изоляции.

В процессе эксплуатации аппарата свойства его изоляции ухудшаются. В низковольтных аппаратах пыль и грязь, осаждающиеся на поверхности, вызывают понижение сопротивления изоляции и появление токов утечки. Это может привести к возникновению разряда по поверхности и повреждению изоляции возникающей дугой.

Гигроскопические материалы — гетинакс, текстолит и другие слоистые пластики — поглощают влагу из окружающей среды. При этом качество изоляции — ее пробивное напряжение — резко снижается.

Изоляционные свойства аппаратов, использующих трансформаторное масло, также ухудшаются в процессе эксплуатации.

Под действием тепла, выделяемого в токоведущих частях, масло разлагается. Продукты разложения отрицательно воздействуют на хлопчатобумажную и другую органическую изоляцию.

Если внутренняя полость аппарата сообщается с атмосферой через большое отверстие или в эту полость попадает влага, то происходит увлажнение масла и резкое ухудшение его изоляционных свойств. В масляных выключателях в процессе работы образуется углерод в виде сажи. Осаждаясь на изоляционных поверхностях, сажка может привести к ухудшению изоляции и пробоем по поверхности, что, как правило, ведет к разрушению аппарата.

Прочность изоляции выбирается с учетом ухудшения ее свойств в процессе эксплуатации.

В специальных случаях, когда изоляция работает в условиях сильного загрязнения пылью и проводящими осадками, она должна иметь повышенные запасы электрической прочности по поверхности. Токоведущие части аппаратов обычно укрепляются с помощью опорных изоляторов. При коротком замыкании на токоведущие части действуют электродинамические усилия (гл. 1).

Ввиду трудности и неточности расчетов электродинамической стойкости аппаратов берутся большие запасы по механической прочности. Так, для аппаратов наружной установки разрушающее усилие изоляторов должно быть в 3 раза выше максимальных нагрузок, которые ожидаются в эксплуатации. Изоляция этих аппаратов испытывает дополнительные механические нагрузки, возникающие из-за ветра, инея, гололеда и других факторов. Аппараты внутренней установки подвергаются меньшим механическим нагрузкам, поэтому их изоляторы имеют примерно двукратный запас механической прочности. Таким образом, изоляция при работе аппаратов подвергается как электрическим, так и механическим перегрузкам и должна иметь соответствующие запасы прочности.

7-2. Кратности коммутационных и атмосферных перенапряжений

Кратностью перенапряжений называется отношение максимального значения повышения напряжения относительно земли к амплитудному значению наибольшего рабочего фазного напряжения.

В зависимости от причин, вызвавших повышение напряжения, различают внутренние, или коммутационные и атмосферные перенапряжения.

Коммутационные перенапряжения возникают либо при включении и отключении элементов электрической цепи, либо при повреждениях.

Природа перенапряжений при отключениях индуктивности и емкости рассмотрена в гл. 4.

Причиной перенапряжений могут являться феррорезонансные явления, возникающие при повреждениях на линиях с обрывом линии и перемежающейся дугой на землю. Природа этого явления подробно изложена в

[Л.4-6]. Кратность перенапряжения при феррорезонансных явлениях может достигать 3,5—4,3. На основании исследований и большого эксплуатационного опыта были определены расчетные кратности внутренних перенапряжений. Эти кратности, как правило, уменьшаются с ростом номинального напряжения. Так, например, при $U_n=3$ кВ наибольшая кратность равна 5,2, а при $U_n=500$ кВ эта кратность значительно ниже 2,5—3.

Изоляция, безусловно, должна выдерживать указанные перенапряжения, если не применяются разрядники.

Что касается изменения напряжения во времени, то в большинстве случаев внутренние перенапряжения имеют колебательный характер с частотой до тысячи герц. Длительность существования этих перенапряжений велика и может достигать нескольких секунд.

Атмосферные перенапряжения могут появляться как от индуцированных зарядов, так и в результате прямого удара молнии в токоведущий элемент установки [Л.4-6]. Этот вид перенапряжений характеризуется малой продолжительностью (десятки — сотни микросекунд) и весьма большими амплитудами, которые могут достигать миллионов вольт.

Основную опасность создают прямые удары молнии, когда ток в десятки и даже сотни килоампер, протекая по проводникам, создает падения напряжения, измеряемые миллионами вольт. Если создать аппараты и оборудование, которые выдержат такие напряжения, то стоимость установок и их размеры резко возрастут.

Для облегчения изоляции величину перенапряжений ограничивают с помощью специальных аппаратов, разрядников. Электрическая прочность изоляции аппаратов при наличии разрядников определяется тем максимальным напряжением, которое остается на разряднике при протекании импульсного тока молнии. Его называют остаточным напряжением.

Электрическая прочность изоляции аппаратов при воздействии кратковременных импульсов напряжения зависит от длительности воздействия перенапряжений. Чем короче время воздействия, тем больше должна быть амплитуда импульса для разрушения изоляции. Зависимость амплитуды импульса, разрушающего изоляцию, от времени воздействия называется вольт-секундной характеристикой. Типичная кривая прочности внешней изоляции высоковольтного ввода

приведена на рис. 7-2 (кривая 1). Очевидно, что разрядник должен иметь вольт-секундную характеристику, расположенную ниже характеристики защищаемого объекта. Кривая 2 на рис. 7-2 изображает вольт-секундную характеристику вентильного разрядника.

Перенапряжение зависит от способа заземления нулевых точек генераторов или трансформаторов. В эксплуатации применяются глухое заземление, заземление через настроенные индуктивности, системы с изолированной, незаземленной нейтралью.

В первом случае нулевые точки генераторов или трансформаторов соединяются с заземлением непосредственно или через сопротивление небольшой величины, ограничивающее величину тока короткого замыкания на землю. Такое соединение с землей стабилизирует потенциалы фаз относительно земли, что ведет к резкому уменьшению перенапряжений и снижению остающегося напряжения на вентильных разрядниках. Это позволяет значительно облегчить изоляцию. Поэтому в сетях с напряжением 110 кВ и выше, где вопросы облегчения изоляции стоят особенно остро, эта система нашла преимущественное распространение.

Заземление одной из фаз в такой системе ведет к короткому замыканию и отключению поврежденного участка сети.

Заземление нуля через настраиваемую индуктивность способствует уменьшению емкостного тока в месте замыкания провода фазы на землю и ускоряет процесс гашения дуги, а следовательно, сокращает длительность и величину дуговых перенапряжений.

Такая система применяется в сетях напряжением 35 кВ и ниже. Применение указанного способа заземле-

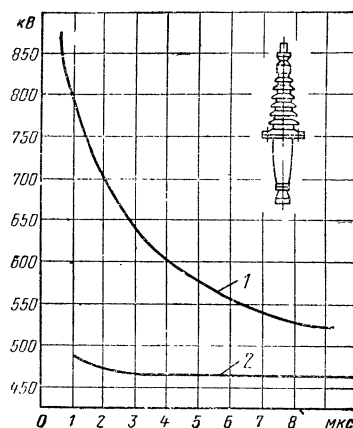


Рис. 7-2. Вольт-секундные характеристики защищаемого объекта (ввода) и вентильного разрядника.

ния ограничивает величину и длительность воздействия перенапряжений и позволяет продолжать работу энергоустановки при одной заземленной фазе.

Сети с изолированной нейтралью хотя и позволяют работать при заземлении одной фазы, но они способствуют развитию внутренних перенапряжений при значительной емкости фаз на землю. Такие системы применяются при напряжениях ниже 35 кВ в случаях малой емкости сети относительно земли. При малом номинальном напряжении легче создать необходимый запас прочности изоляции для того, чтобы она работала в условиях повышенных перенапряжений.

В сети с номинальным напряжением меньше 1000 В способ заземления нейтрали определяется в основном соображениями техники безопасности.

7-3. Испытательные напряжения аппаратов. Испытание изоляции

Изучение кратности внутренних перенапряжений позволяет установить напряжения, которые должен выдерживать аппарат при испытаниях. Испытательное напряжение учитывает также возможность ухудшения изоляции в аппаратах.

По своему характеру внутренние перенапряжения довольно полно могут быть отражены испытательным напряжением частотой 50 Гц. Низковольтные аппараты ($U_n < 1000$ В) общепромышленного применения не подвергаются воздействию атмосферных перенапряжений. Испытательные напряжения для низковольтных аппаратов общепромышленного применения приведены в табл. 7-3.

Тяговые электрические аппараты работают в более тяжелых условиях, испытательные напряжения для этих аппаратов приведены в [Л. 4-4]. Комплектные распределительные устройства, собранные из отдельных аппаратов, имеют испытательные напряжения на 15% ниже приведенных в таблице при условии, что все установленные аппараты прошли полное испытание в соответствии с таблицей. Мощность испытательного оборудования выбирается из расчета $0,5 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ на 1000 В одноминутного испытательного напряжения. Катушки аппаратов испытываются путем приложения напряжения между их за-

Таблица 7-3

Нормы испытательных напряжений

Вид электрооборудования	Продолжительность испытания	
	1 мин	1 с
	Испытательное напряжение, В	
Аппараты на номинальное напряжение до 500 В	2000	2500
Аппараты на номинальное напряжение до 250 В	1500	1900
Катушки на номинальное напряжение 48 В	500	—
Катушки на номинальное напряжение 24 В	250	—

короченными зажимами и сердечником, на котором они сидят.

Испытание междувитковой изоляции катушки производится следующим образом: катушка с разомкнутыми зажимами помещается на сердечник, в котором поток изменяется с частотой 50 Гц или повышенной частотой. Междувитковая изоляция подвергается воздействию индуцированной э. д. с. Наличие короткозамкнутых витков в обмотке легко определяется специальным прибором, описанным в [Л.7-3].

Для контроля качества выпускаемых образцов аппаратов они подвергаются контрольным испытаниям, которые устанавливают годность аппарата.

Если изменяется конструкция аппарата или технология, то такой аппарат подлежит типовым, более объемным испытаниям.

Контрольные испытания проводятся на каждом выпускаемом образце.

Для простых аппаратов — предохранителей, бытовых выключателей — разрешается проводить испытание изоляции у небольшой партии выпущенных аппаратов (2,5%). Если наблюдается пробой изоляции хотя бы у одного аппарата, то отбирается для проверки двойное количество образцов. Вся партия аппаратов бракуется, если хотя бы у одного из выбранных вторично аппаратов изоляция не выдерживает испытания.

О состоянии изоляции низковольтных аппаратов хорошее представление дает измерение токов утечки или сопротивления изоляции. Измерение производится с помощью специальных мегомметров. В аппаратах с номинальным напряжением 24 и 48 В измерения производятся при напряжении 250 В.

Во всех других аппаратах ($U_n \geq 48$ В) измерение сопротивления производится при напряжении 500 В. Обычно при номинальном напряжении до 500 В и нормальной относительной влажности в холодном состоянии сопротивление изоляции должно быть порядка 100 МОм. При нагреве сопротивление изоляции падает вдвое на каждые 10°C . В горячем состоянии сопротивление изоляции должно быть не менее 3—6 МОм. После пребывания во влажной среде в соответствии с условиями работы (1—5 суток при температуре 20°C и относительной влажности 95%) сопротивление в холодном состоянии должно быть не ниже 0,5—1 МОм.

Испытательные напряжения и методика проведения испытаний аппаратов высокого напряжения ($U_n > 1000$ В) регламентированы ГОСТ 1516-73. Изоляция электрических аппаратов должна иметь запас относительно испытательного напряжения. Так, пробивное напряжение фарфоровых изоляторов должно быть больше испытательного в 1,6 раза. Особенно важно обеспечить необходимый коэффициент запаса маслonaполненных аппаратов, так как пробой масляной изоляции ведет к взрыву аппарата.

Аппараты, предназначенные для наружной установки, должны испытываться в наихудших условиях, когда их поверхность подвергается воздействию дождя. В качестве эталона принимается дождь, идущий с интенсивностью 3 мм/мин. Удельное сопротивление воды должно быть в пределах 9,50—105,000 Ом·м.

Обычно при этих условиях испытательное напряжение снижается на 20—30%.

Следует отметить, что электрическая прочность внешней изоляции в большой степени зависит от температуры воздуха, давления и влажности. Указанные в ГОСТ 1516-73 значения отнесены к нормальным условиям (температура $T=293$ К, давление 10^5 Па и содержание влаги в воздухе 11 г/м³). Если при испытаниях условия отличаются от нормальных, то надо вводить поправки [Л.1-6]. Изменение температуры и давления ведет к из-

менению плотности воздуха. С уменьшением плотности воздуха разрядное напряжение падает. Поправка на относительную плотность δ равна:

$$\delta = \frac{293}{10^5} \frac{p}{T}.$$

Если $p=10^5$ Па, а $T=293$ К, то $\delta=1$.

Влажность воздуха учитывается поправкой k :

$$U = U_0 \delta / k,$$

где U_0 — испытательное напряжение при нормальных условиях;

U — испытательное напряжение, учитывающее реальные давление, температуру и влажность.

Поправка на влажность k определяется с помощью специальных кривых [Л.7-1].

Наибольшее влияние влажность оказывает при резко неравномерном поле.

С ростом влажности увеличивается масса заряженных частиц, что приводит к уменьшению их скорости. В результате электрическая прочность с ростом влажности увеличивается.

Как указывалось в § 7-2, атмосферные перенапряжения имеют импульсный характер. Поэтому испытательные напряжения для проверки прочности внешней изоляции при атмосферных перенапряжениях должны иметь форму импульсов напряжения. Как правило, полярность этих импульсов берется отрицательной, поскольку атмосферные перенапряжения дают такую полярность.

Форма испытательного импульсного напряжения должна соответствовать форме импульсов, воздействующих на изоляцию в эксплуатации. Для испытания изоляции применяют импульсы двух видов — полный импульс (рис. 7-3, а) с длиной фронта $\tau_{\phi}=1,5\pm0,2$ мкс и длиной импульса $\tau_{\psi}=40\pm4$ мкс и срезанный импульс (рис. 7-3, б).

Срезанный импульс возникает при срабатывании разрядника, который пропускает через себя «хвост» импульса. Срезанный импульс можно рассматривать как полный импульс, на который накладывается положительный импульс с очень крутым фронтом.

В § 7-2 указывалось, что атмосферные перенапряжения снижаются с помощью разрядников. Оборудование

подвергается фактически воздействию остающегося напряжения на разряднике. Гарантированную прочность внешней изоляции при номинальных условиях берут немного больше остающегося напряжения при импульсном токе 5 кА:

$$U = 1,1 U_{\text{ост}} + 15 \text{ кВ.}$$

Если учитывать возможность накопления скрытых дефектов внутренней изоляции, испытательные импульс-

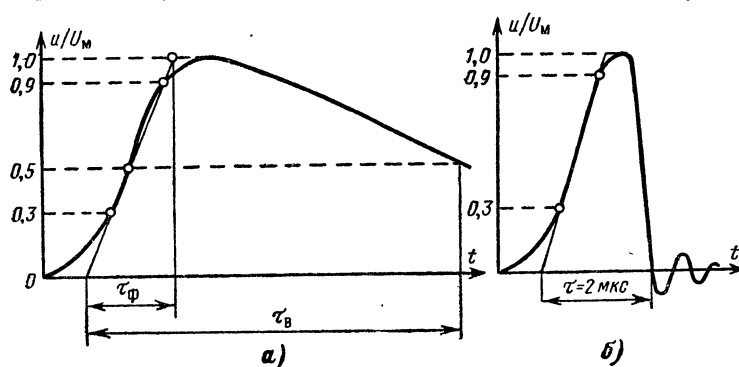


Рис. 7-3. Формы стандартного испытательного импульсного напряжения.

ные напряжения для нее должны быть взяты на 10% выше указанной гарантированной прочности изоляции.

Следует отметить, что согласно ГОСТ аппараты могут работать на высоте до 1000 м над уровнем моря при температуре окружающей среды до $+40^{\circ}\text{C}$. Это вызывает уменьшение прочности воздуха. Поэтому гарантированная прочность внешней изоляции при импульсах определяется равенством

$$U = \frac{1,1 U_{\text{ост}} + 15}{0,84} \text{ кВ.}$$

Испытательное напряжение внешней изоляции при срезанной волне на 25% больше, чем при полной волне.

Испытания внешней изоляции проводятся в следующем порядке. Вначале 3 раза прикладывается полный отрицательный импульс, а затем 3 раза — срезанный импульс. При этом не должно наблюдаться пробоя или

повреждения изоляции. Внутренняя изоляция аппаратов высокого напряжения проверяется импульсами как положительного, так и отрицательного знака.

7-4. Минимальные изоляционные расстояния и пути утечки

Электрическая прочность воздуха в равномерном поле равна 3,0 МВ/м. Поскольку испытательное напряжение для аппаратов до 1000 В составляет всего 2 кВ, то необходимый воздушный промежуток — зазор, выдерживающий испытательное напряжение, составляет всего 1—2 мм. В процессе эксплуатации в таком зазоре могут скапливаться влага, пыль и грязь, что ведет к резкому сокращению разрядного напряжения. Поэтому в таких аппаратах зазоры между частями, находящимися под различными потенциалами, выбираются с учетом загрязнения.

Помимо электрических зазоров в воздухе, решающую роль играет прочность по поверхности изоляции. Расстояние между деталями составляет несколько миллиметров. Пыль, влага и грязь, осаждаясь на поверхности диэлектрика, уменьшают электрическое сопротивление изоляции, в результате чего появляются точки утечки, которые могут разрушать изоляцию или приводить к перекрытию. Расстояние по поверхности между элементами аппарата, находящимися под напряжением, называется расстоянием утечки.

Расчет электрических зазоров и расстояний утечки при учете загрязнения пылью и грязью затруднен. Выбор этих расстояний производится на основании опытных данных.

Для аппаратов общепромышленного применения электрические зазоры и расстояния утечки рекомендуются выбирать согласно табл. 7-4а и 7-4б [Л.3-7].

Для тяговых электрических аппаратов, работающих в более тяжелых условиях, минимальные зазоры и расстояния утечки выбираются согласно [Л.4-4].

Что касается расчета и выбора толщины изоляционного материала на пробой, то в аппаратах низкого напряжения эта величина определяется из конструктивных соображений, так как электрическая прочность материалов, обычно применяемых в аппаратостроении, значительно выше прочности воздуха. Для аппаратов на напряжение свыше 1000 В воздушные зазоры и толщина

Т а б л и ц а 7-4а

Рекомендуемые расстояния между токоведущими частями
разных потенциалов и до заземленных частей для установок
на напряжение до 1000 В

Назначение цепи или аппарата	Характеристика возможного пути образования дуги	Рекомендуемые расстояния, мм, при номинальных напряжениях, В		
		от 100 до 250	от 251 до 400	от 401 до 600
Аппаратура управле- ния и распределительных устройств	Электрический зазор	4	5	7
Аппаратура распре- делительных устройств, предназначенная для за- щиты установки	Расстояние утечки (независи- мо от расположе- ния поверхности)	15	17	22
Главные цепи аппа- ратов управления, защи- щенных аппаратурой рас- пределительных уст- ройств	Расстояние утечки по обра- щенной вверх по- верхности	10	12	15
	Расстояние утечки по верти- кальной или обра- щенной вниз по- верхности	8	10	12
Аппараты и их части, включаемые в цепи уп- равления и сигнализации	Расстояние утечки по обра- щенной вверх по- верхности	7	9	11
Главные цепи аппа- ратов на малый номи- нальный ток (не выше 15 А)	Расстояние утечки по верти- кальной или обра- щенной вниз по- верхности	5	7	9

изоляции выбираются в соответствии с испытательным напряжением.

Если электрическое поле в воздухе или изоляционном материале легко рассчитать, то определяется максимальный градиент напряжения при приложении испытательного напряжения; расчетное значение градиента сравнивается с допустимым для данного материала.

Однако в большинстве случаев электрическое поле в аппаратах резко неравномерно. В этих случаях выбор

Таблица 7-4б

Рекомендуемые минимальные электрические расстояния в воздухе для аппаратов на напряжение свыше 1000 В

Вид промежутка	Номинальное напряжение, кВ						
	3	6	10	35	110	154	220
Разрядный промежуток для закрытых установок, м	0,075	0,100	0,120	0,310	—	—	—
Разрядный промежуток для открытых установок, м	—	0,15	0,2	0,4	1,0	1,4	2,1

изоляционных расстояний рекомендуется проводить по разрядным кривым [Л.7-2].

Для воздушной изоляции опытным путем получены пробивные напряжения для различных электродов. Наименьшую прочность воздух имеет при резко неравномерном поле — стержень — плоскость (рис. 7-4). Поскольку для внешней изоляции, как правило, используется воздух, то перекрытие воздушных промежутков должно происходить при напряжениях выше испытательных и составляющих обычно 110% от $U_{исп}$. В качестве внутренней изоляции рекомендуется широко применять конденсаторную бумагомасляную изоляцию, которая позволяет более равномерно нагрузить изоляционный материал и получить конструкцию наименьших габаритов и массы [Л.1-6].

Электрическая прочность изоляции между электродами, расположенными на чистой и сухой поверхности диэлектрика в воздухе, приближается к прочности воздушного промежутка при резко неравномерном поле (острие — острие). Наличие влаги и загрязнений ведет к резкому снижению электрической прочности и появлению тока утечки между электродами. Загрязнение изоляции зависит от условий эксплуатации.

В аппаратах на напряжение свыше 1000 В при работе в чистом воздухе длина удельного пути утечки по поверхности выбирается не менее $1,5 \cdot 10^{-2}$ м/кВ, а в сильно загрязненном воздухе $2,5 \cdot 10^{-2}$ м/кВ [Л.1-6].

Под удельным путем утечки понимаем расстояние по поверхности диэлектрика, приходящееся на каждый киловольт номинального рабочего напряжения.

При погружении поверхности диэлектрика в трансформаторное масло электрическая прочность изоляции по поверхности возрастает примерно в 2 раза.

Следует остановиться на скользящем разряде, развивающемся по поверхности диэлектрика.

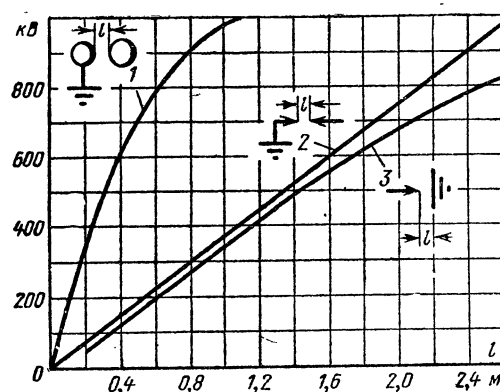


Рис. 7-4. Электрическая прочность воздушных промежутков, образованных электродами различной формы.

Такой разряд имеет место в проходных изоляторах (рис. 7-5, а).

Внешний цилиндрический электрод 2 заземлен. Внутренний стержень 1 изолирован. На острых краях зазем-

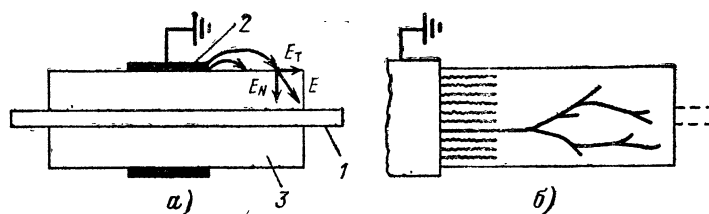


Рис. 7-5. Скользящий разряд.

ленного электрода создаются градиенты напряжения, достаточные для возникновения короны. Большая емкость между внешним и внутренним электродами увеличивает ток коронного разряда. Электрическое поле

имеет большую нормальную составляющую градиента напряжения E_N .

Благодаря большому току разряда он имеет высокую температуру. Значительная проводимость разряда как бы приближает внешний электрод к стержню. При этом возрастает напряженность поля E_T вдоль поверхности, что приводит к появлению перекрытия.

Разряд как бы скользит по поверхности диэлектрика (рис. 7-5, б).

Решающую роль в возникновении этого разряда играет емкость между внешней поверхностью изоляции и внутренним электродом. Напряжение (кВ) скользящего разряда можно определить с помощью формулы

$$U_{ск} = \frac{1,36}{(C \cdot 10^{-4})^{0,44}} \cdot 10^{-4},$$

где C — емкость каждого квадратного метра внешней поверхности изоляции $З$ по отношению к внутреннему электроду 1, Ф/м².

Для фарфоровых проходных изоляторов с изоляционным расстоянием по фарфору менее 0,3 м средняя напряженность перекрытия в сухом состоянии поверхности $(4,0—4,5) \cdot 10^2$ кВ/м.

При постоянном во времени напряжении емкостная проводимость становится равной нулю и скользящий разряд исчезает. Для борьбы со скользящим разрядом принимают следующие меры: а) уменьшают удельную емкость C ; б) принимают меры, способствующие ограничению коронирующего разряда у заземленного электрода; в) уменьшают напряжение между электродами; г) создают ребристую поверхность, затрудняющую движение ионов вдоль поверхности диэлектрика.

Наличие скользящего разряда вдоль поверхности органических материалов ведет к образованию обугленных каналов и порче изоляции.

Скользкий разряд вдоль поверхности материала, расположенного в масле, разлагает масло с выделением водорода и сажи. Последняя, откладываясь на поверхности, ведет к снижению разрядного напряжения.

Даже на поверхности фарфора в воздухе скользящий разряд образует глубокие каналы. Иногда происходит растрескивание фарфора из-за термического воздейст-

вия разряда. В связи с этим в номинальном режиме скользящие разряды должны быть полностью исключены.

7-5. Контроль состояния изоляции высоковольтных аппаратов

В высоковольтных аппаратах основным способом контроля изоляции в эксплуатации является измерение сопротивлений утечки и тангенса угла диэлектрических потерь. Иногда применяется испытание приложением напряжения.

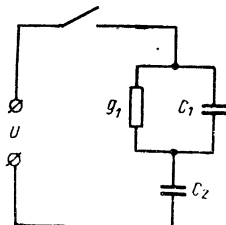


Рис. 7-6. Упрощенная схема замещения изоляции с местным дефектом.

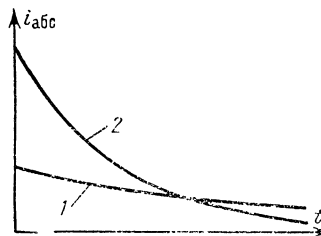


Рис. 7-7. Изменение тока абсорбции во времени.

Для грубого контроля используется изменение сопротивления утечки с помощью мегомметров или высоковольтных выпрямительных кенотронных установок. Учитывая, что сопротивление изоляции у высоковольтных аппаратов значительно выше, чем у низковольтных, метомметр должен иметь напряжение 2500 В.

Ток, текущий через изоляцию после приложения напряжения, приближенно можно разбить на три составляющие: ток заряда геометрической емкости изоляции; ток абсорбции, обусловленный дефектами в элементах изоляции; сквозной ток — ток утечки.

Изоляцию, у которой имеются местные дефекты, можно представить упрощенной схемой замещения (рис. 7-6). Здесь C_2 — емкость «здоровой» части изоляции, C_1 — емкость дефектной части, g_1 — проводимость, обусловленная, например, увлажнением. При подаче постоянного напряжения вначале протекает большой ток заряда геометрической емкости $\frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$. Этот ток быстро спадает. После этого начинается разряд емкости C_1 и заряд емкости C_2 до полного напряжения U . В этот момент по внешней цепи протекает ток, называемый током абсорбции. Этот ток определяется уравнением [Л. 4-6]

$$i_{abc} = U g_1 \left(\frac{C_2}{C_1 + C_2} \right)^2 e^{-\frac{t}{T}}; T = \frac{C_1 + C_2}{g_1}.$$

Чем больше увлажнена изоляция, тем больше g_1 . Возрастает пик тока абсорбции и уменьшается постоянная времени T .

Зависимость тока i_{abc} от времени приведена на рис. 7-7, где в случае 1 проводимость g_1 в 3 раза меньше, чем в случае 2. Таким образом, характер спада тока абсорбции позволяет судить о качестве изоляции.

Следует отметить, что токи абсорбции малы (десятки микроампер), ток заряда геометрической емкости велик. Поэтому необходимо предусмотреть специальное устройство, которое шунтирует чув-

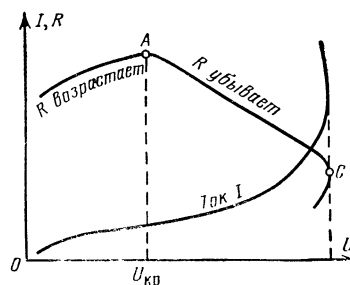
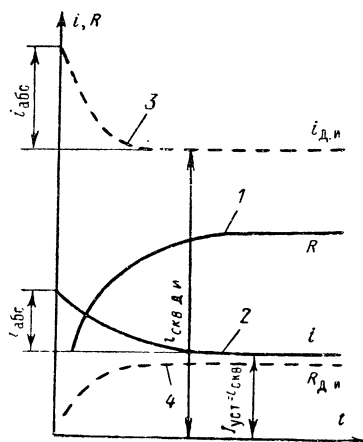


Рис. 7-9. Зависимость сопротивления и тока утечки изоляции от приложенного напряжения.

Рис. 7-8. Изменение результирующего тока и сопротивления во времени.

ствительный измеритель на время прохождения тока заряда геометрической емкости. После окончания переходного процесса протекает сквозной ток утечки $i_{св}$. Изменение во времени результирующего тока $i = i_{abc} + i_{св}$ и сопротивления изоляции R приведено на рис. 7-8. Кривые 1 и 2 относятся к качественной изоляции, а кривые 3 и 4 — к дефектной.

Оценку увлажнения изоляции можно производить по коэффициенту абсорбции [Л. 7-4]

$$k_{abc} = R_{t2}/R_{t1},$$

где R_{t2} — сопротивление изоляции к моменту времени $t_2 = 60$ с;
 R_{t1} — сопротивление изоляции к моменту времени $t_1 = 15$ с.

Для реальных изоляционных конструкций, чем суше изоляция, чем меньше в ней посторонних примесей, тем выше коэффициент абсорбции. Поскольку k_{abc} зависит также и от температуры, то измерения ведут при температуре изоляции 20—40° С.

Сопротивление изоляции, не имеющей дефектов, не зависит от величины приложенного напряжения. Изоляция, имеющая дефекты, имеет сопротивление, сильно зависящее от приложенного напряжения.

На рис. 7-9 изображены зависимости сопротивления изоляции и тока утечки от приложенного напряжения. При напряжении, меньшем $U_{кр}$, дефект изоляции не выявляется, сопротивление может да-

же расти за счет спада абсорбционного тока. При напряжении, большем $U_{кр}$, наблюдается резкое возрастание тока утечки и снижение сопротивления изоляции, что в конечном счете ведет к ее пробое.

Сопротивление изоляции измеряется мегомметром с напряжением 2500 В или кенотронным аппаратом с напряжением до 20 кВ. Если измерение с помощью мегомметра дает сопротивление ниже нормы, то для выявления дефектности необходимо применение кенотронного аппарата [Л. 7-4].

О состоянии изоляции можно также судить по спаду напряжения на объекте после зарядки до определенного напряжения. В полноценной изоляции сопротивление велико и постоянная разряда получается значительной.

При дефектной изоляции напряжение быстро падает из-за малой постоянной времени.

Весьма совершенным способом контроля и дефектоскопии изоляции является измерение тангенса угла диэлектрических потерь.

Измерение зависимости $\operatorname{tg} \delta$ от напряжения позволяет определить границу тепловой устойчивости изоляции.

Нагрев диэлектрика приводит к тому, что сквозной ток через него увеличивается, сопротивление его падает, что в свою очередь приводит к росту потерь и дальнейшему повышению температуры изоляции.

В конце концов нарастание температуры ведет к тепловому пробое [Л. 1-6]. При номинальном напряжении в диэлектрике должно устанавливаться такое тепловое равновесие, при котором максимальная установившаяся температура не превышает допустимых значений для данного материала. Измерение $\operatorname{tg} \delta$ позволяет определить критическое значение напряжения, при котором начинается усиленная ионизация материала, предшествующая тепловому пробое.

Зависимость $\operatorname{tg} \delta$ от напряжения изображена на рис. 7-10. При напряжении $U > U_{кр}$ начинается резкое возрастание $\operatorname{tg} \delta$. При этом напряжении тепловая устойчивость изоляции может быть нарушена.

Измерение $\operatorname{tg} \delta$ в эксплуатации позволяет определить дефекты изоляции и своевременно предупреждать тяжелые аварии. Особенно хорошие результаты этот метод контроля изоляции дает для оборудования с малой емкостью порядка 200—300 пФ. В этом случае удается обнаружить развивающиеся местные дефекты изоляции.

Измерение $\operatorname{tg} \delta$ производится с помощью мостов переменного тока. При напряжении вплоть до номинального значения $\operatorname{tg} \delta$ мало зависит от напряжения, поэтому при испытаниях напряжение на объекте берется равным 10 кВ.

Следует отметить, что на результаты измерений в сильной степени может влиять температура. При температуре в диапазоне от -10 до $+10^\circ\text{C}$ влага воздуха, осаждающаяся на поверхности диэлектрика, приводит к увеличению $\operatorname{tg} \delta$, что может привести к ложному заключению о дефектности изоляции. Поэтому измерение $\operatorname{tg} \delta$ рекомендуется проводить при температуре окружающей среды $+10+$

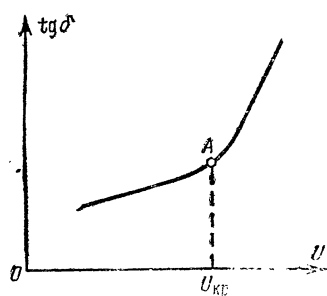


Рис. 7-10. Зависимость $\operatorname{tg} \delta$ от приложенного напряжения.

+40° С. В этом диапазоне температур $\operatorname{tg} \delta$ мало зависит от температуры окружающей среды. При более высокой температуре $\operatorname{tg} \delta$ увеличивается из-за роста потерь в диэлектрике.

Схемы мостов и порядок измерения подробно рассмотрены в [Л. 7-4]. Часто $\operatorname{tg} \delta$ определяют не в абсолютном значении, а в процентах:

$$\operatorname{tg} \delta \% = 100 \operatorname{tg} \delta.$$

Необходимо отметить, что мост дает возможность определить не только $\operatorname{tg} \delta$, но и емкость образца. Сравнивая емкость со значением, указанным в заводском паспорте, можно также судить о состоянии изоляции. При увлажнении изоляции из-за высокой диэлектрической проницаемости воды емкость образца увеличивается. Если емкость конденсаторной изоляции возросла, то это говорит о том, что один из конденсаторов может быть пробит.

При измерениях $\operatorname{tg} \delta$ необходимо иметь в виду, что на результаты измерений могут оказать большое влияние посторонние магнитные и электрические поля. Поэтому измерения желательно проводить вне зоны действия этих полей. При непосредственных измерениях на подстанциях с напряжением 110—220 кВ необходимо принимать меры для борьбы с этими помехами.

Для повышения надежности работы энергосистем рекомендуется в заключительной стадии проводить испытание изоляции повышенным напряжением (до 75% от испытательного напряжения по ГОСТ 1516-73) при длительности воздействия не более 1 мин [Л. 7-4].

Глава восьмая

МЕХАНИЗМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

8-1. Требования, предъявляемые к механизмам аппаратов

Надежность электрических аппаратов, имеющих в качестве исполнительного органа контактную систему, в большой степени зависит от работы механизма.

В работе механизма следует различать две стадии: движение при отключении цепи и движение при включении.

Время отключения аппарата складывается из собственного времени отключения и времени дуги.

Собственное время отключения — это время с момента подачи сигнала на отключение до момента прекращения соприкосновения контактов. Время дуги зависит и от механизма аппарата и от дугогасительной системы. Гашение дуги как на низком, так и на высоком напряжении зависит от скорости расхождения контактов.

Ускорение подвижных частей аппарата при отключении, как правило, происходит за счет энергии, накопленной при включении в отключающих и контактных пружинах аппарата.

Наибольшее ускорение подвижных частей имеет место в начальной стадии отключения (до момента расхождения контактов и во время процесса гашения дуги). После гашения дуги подвижные контакты продолжают расходиться для того, чтобы между контактами образовался промежуток, выдерживающий испытательное напряжение. В некоторых аппаратах ход контактов определяется условиями гашения дуги при малых токах.

Для предупреждения деформации механизма от удара, исключения отброса и вибрации контактов в отключенном положении механизм снабжается буферными устройствами, поглощающими кинетическую энергию, накопленную в подвижных частях механизма.

Отказ в работе механизма может привести к длительному горению дуги и разрушению не только самого аппарата, но и всего распределительного устройства в целом. Поэтому к механизму предъявляется требование высокой надежности.

С точки зрения быстрого действия аппарата при отключении, износа контактов, длительности горения дуги почти всегда желательно увеличивать скорость отключения. Однако необходимость увеличения скорости отключения влечет за собой необходимость увеличения сил, развиваемых пружинами отключения, и ведет к росту энергии, накопленной в этих пружинах.

Возрастание сил, развиваемых пружинами, и скоростей движения ведет к необходимости повышения механической прочности деталей механизма, требует применения более мощных буферных устройств. С другой стороны, рост энергии, накапливаемой в пружинах, ведет к увеличению работы, которую должно произвести включающее устройство — привод. В результате возрастают масса, габариты аппарата, его стоимость и количество энергии, потребляемой при включении. Поэтому скорость расхождения контактов аппарата не следует выбирать более такой, которая обеспечит надежное отключение цепи в заданное время.

Таким образом, к механизму аппарата с точки зрения процесса отключения цепи предъявляются следующие требования:

1. Механизм аппарата должен сообщить контактам определенную скорость в момент расхождения контактов и на пути гашения дуги.

2. Механизм аппарата должен иметь буферные устройства, обеспечивающие плавную остановку и отсутствие отброса контактов в конце процесса отключения.

3. Отключающий механизм должен надежно работать при самых тяжелых условиях, на которые рассчитан аппарат.

4. Механизм должен быть простым как в изготовлении, так и в эксплуатации, легкодоступным для ремонта и осмотра. Междуреви́зионный срок должен быть значительно большим, чем у контактов и дугогасительного устройства.

Собственное время включения контактного аппарата состоит из времени трогания и времени движения до момента соприкосновения контактов.

Время трогания — время с момента подачи команды на включение до начала движения контактов. Это время определяется типом привода: в электромагнитном приводе высоковольтного выключателя оно определяется временем срабатывания пускового контактора и временем трогания главного электромагнита; в пневматическом приводе это время складывается из времени срабатывания пускового электромагнита, вспомогательных пневматических клапанов и времени, необходимого для нарастания давления под главным поршнем привода до давления трогания.

Время движения зависит как от характеристик примененного привода, так и от самого механизма. Включающий механизм аппарата должен сообщить такую скорость контактам, чтобы обеспечить требуемое значение времени включения.

В особо тяжелых условиях работают механизмы аппаратов, предназначенных для включения на большие токи короткого замыкания (автоматы, выключатели). В этих аппаратах в момент включения в токоведущих контурах возникают электродинамические силы, которые препятствуют включению.

При включении высоковольтных выключателей на существующее короткое замыкание мощная дуга между контактами загорается раньше, чем замкнутся контакты (предварительный пробой). Это утяжеляет работу аппа-

рата (§ 19-4). Длительность возникшей дуги должна не превышать 0,005 с, что достигается высокой скоростью в конце включения.

Для уменьшения ударов в механизме, исключения вибрации механизма в положении «включено» энергия, накопленная в подвижных частях механизма, в конце хода должна быть поглощена в специальных буферных устройствах. Механизм аппарата должен препятствовать возникновению вибрации контактов аппарата, усиливающей их износ.

Общие требования к механизму при включении.

1. Скорость движения должна обеспечить требуемое время включения аппарата.

2. Мощность привода должна быть достаточной для включения аппарата при самых тяжелых условиях работы (включение на короткое замыкание, пониженное напряжение питания, пониженное давление в системе питания пневматических приводов и т. д.).

8-2. Отключение механизма аппарата

Основным параметром, характеризующим механизм при отключении, является скорость. Для определения ее удобно пользоваться уравнением Лагранжа. Изменение кинетической энергии системы равно разности работ, совершенных движущими и тормозными силами:

$$\Delta \frac{\Sigma m_{\text{пр}} v^2}{2} = A_{\text{движ}} - A_{\text{торм}}, \quad (8-1)$$

где $\Sigma m_{\text{пр}}$ — суммарная масса, приведенная к контакту, кг;

v — скорость контакта, м/с;

$A_{\text{движ}}$ — работа движущих сил, Н·м;

$A_{\text{торм}}$ — работа тормозных сил, Н·м.

Расчет приведенных масс звеньев механизма производится по известным законам механики [Л.8-1]. Величина $\Sigma m_{\text{пр}}$ является функцией положения механизма. В уравнении (8-1) масса $\Sigma m_{\text{пр}}$ берется для того положения механизма, при котором определяется скорость.

Как правило, основную роль играет масса подвижного контакта и деталей, которые непосредственно с ним связаны.

Механизмы аппаратов сильно отличаются своей сложностью, но все они имеют подобные узлы. Наиболее

сложными являются механизмы высоковольтных выключателей. Контактные и реле имеют более простой механизм (гл. 10 и 11).

Рассмотрим механизм маломасляного выключателя типа ВМП-35 на напряжение 35 кВ и ток 600 А (рис. 8-1).

Неподвижный контакт 1 укреплен на изоляторе 2. Подвижный контакт 3 движется в направляющих 14. Через рычаги 4—8 он связан с валом 9.

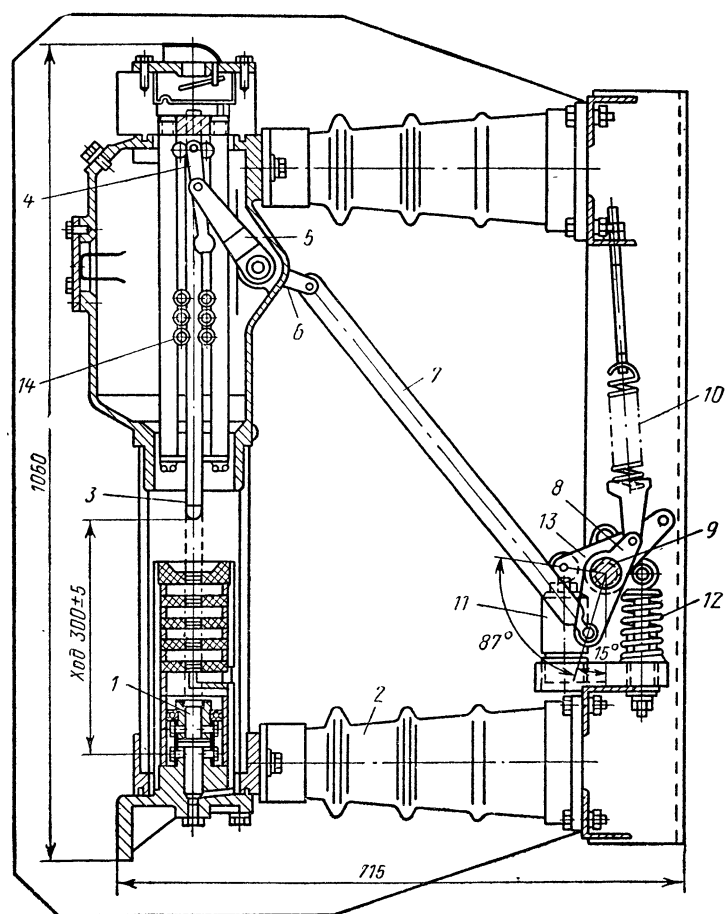


Рис. 8-1. Маломасляный выключатель ВМП-35 (разрез одного полюса).

Отключение происходит под действием пружины 10. Плавное торможение при отключении осуществляется масляным буфером 11 через рычаг 13.

Включение выключателя производится электромагнитным приводом (§ 19-4), связанным с валом 9. Пружинный буфер 12, действующий только на ходе в контактах, обеспечивает поглощение избыточной кинетической энергии при включении.

Рассмотрим основные соотношения при отключении для механизма рис. 8-1. Движущими силами в данном механизме являются сила отключающих пружин $F_{отк}$ и сила буферных пружин $F_{буф}$ (берутся силы, приведенные к контакту).

Работа движущих сил к моменту размыкания контактов равна:

$$A_{двиг} = \int_0^{h_k} (F_{отк.прив} + F_{буф.прив}) \eta dh, \quad (8-2)$$

где h_k — ход, соответствующий размыканию, м; η — к. п. д. механизма, при ориентировочных расчетах коэффициент $\eta = 0,6 \div 0,7$; при точных — определяется сила трения в шарнирах механизма и находится реальное значение η [Л. 8-1].

Тормозные силы создаются в контактах $F_{тр.конт}$, весом контактов $G_{конт}$. Приведенная масса подвижных элементов механизма $G_{мех.прив}$ может тормозить или помогать отключению.

Работа тормозных сил на ходе в контактах

$$A_{торм} = (F_{тр.конт} + G_{конт} \pm G_{мех.прив}) h_k. \quad (8-3)$$

Сила трения подвижного контакта в розеточных контактах может быть рассчитана по формуле

$$F_{тр.конт} = mnF_k \mu,$$

где m — число розеток на выключатель;

n — число ламелей в розетке;

F_k — сила нажатия ламели на стержень подвижного контакта;

μ — коэффициент трения в масле, который можно принять равным 0,15—0,2.

Скорость (м/с) в момент размыкания контактов можно найти с помощью уравнения

$$v_k = \sqrt{\frac{2}{\Sigma m_{пр.к}} (A_{двиг.к} - A_{торм.к})}. \quad (8-4)$$

Буферная пружина обычно регулируется так, что она действует только на ходе контактного стержня в розетке.

Задаваясь различным, все возрастающим значением h , можно найти зависимость скорости от хода.

После того, как погаснет дуга, механизм необходимо плавно остановить. Для этого используют различные буферы (рис. 8-2).

Весьма простым по конструкции и эффективным в действии является масляный буфер с постоянной силой торможения. Устройство такого буфера показано на рис. 8-2, в. В момент начала торможения рычаг механизма (поз. 13, рис. 8-1) воздействует на шток 1 поршня 2. Под действием поршня масло через узкую щель 3 вытесняется из-под поршня. Энергия торможения переходит в тепловую, так как

при перетекании масла через щель затрачивается энергия на гидродинамическое трение в масле. При правильном расчете вся кинетическая энергия может быть поглощена буфером. Обычно буфер осуществляет торможение на последних 10% хода контактов. К моменту начала работы буфера кинетическая энергия механизма равна:

$$A = A_{\text{буф}} = \frac{mv_{\text{п0}}^2}{2}, \quad (8-5)$$

где m — сумма приведенных к буферу масс механизма, кг;
 $v_{\text{п0}}$ — скорость поршня в момент начала работы буфера, м/с.

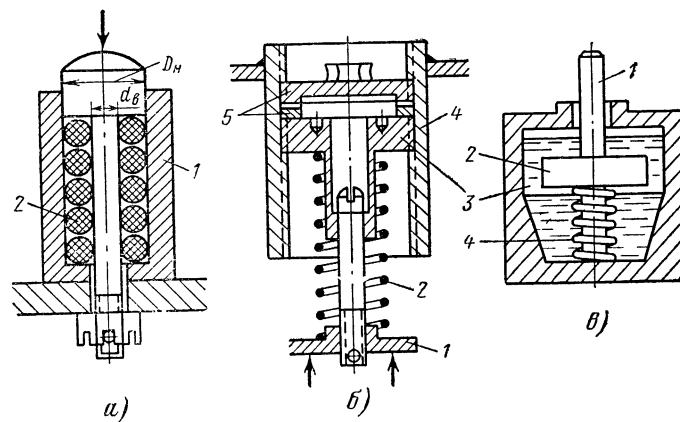


Рис. 8-2. Буферные механизмы.

a — эластичный буфер; $б$ — пружинный буфер; $в$ — масляный буфер постоянного давления.

Тормозная сила, развиваемая поршнем, равна:

$$F_{\text{торм}} = \frac{A_{\text{буф}}}{h_{\text{буф}}} = -ma = pS_{\text{п}}, \quad (8-6)$$

где $h_{\text{буф}}$ — ход буфера, м;
 $S_{\text{п}}$ — площадь поршня, м²;
 p — давление под поршнем, Па.

Для того чтобы тормозная сила была постоянна, необходимо, чтобы давление p тоже не менялось.

Давление p , Па, связано со скоростью истечения масла $v_{\text{м}}$ законом Бернулли [Л. 1-3]:

$$p = \rho \frac{v_{\text{м}}^2}{2} = 2 \cdot 10^3 v_{\text{м}}^2,$$

где ρ — плотность масла, кг/м³;
 $v_{\text{м}}$ — скорость истечения, м/с.

Для того чтобы давление не менялось, необходимо, чтобы скорость v_m оставалась постоянной.

Масло несжимаемо, поэтому объем жидкости, протекающей через щель в 1 с, равен объему жидкости, вытесненной поршнем:

$$v_n S_n = v_m S_{щ}, \quad (8-7)$$

где v_n — скорость поршня;
 S_n — площадь поршня;
 v_m — скорость масла в щели;
 $S_{щ}$ — площадь щели.

Скорость поршня v_n в результате торможения все время уменьшается, а площадь поршня постоянна. Следовательно, для соблюдения равенства (8-7) необходимо, чтобы по мере уменьшения скорости поршня пропорционально уменьшалось сечение щели $S_{щ}$.

Согласно (8-7) имеем:

$$S_{щ} = \frac{S_n}{v_m} v_n. \quad (8-8)$$

К моменту начала действия буфера, как правило, механизм движется за счет кинетической энергии, полученной в начале движения ($a=0$).

Так как буфер создает постоянную тормозную силу, то движение поршня будет равномерно замедленным:

$$m \frac{dv_n}{dt} = -F_{\text{торм}} = ma. \quad (8-9)$$

Решая уравнение (8-9) и используя (8-6), получаем скорость поршня v_n :

$$v_n = v_{n0} - at = v_{n0} - \frac{v_{n0}^2}{2h_{\text{буф}}} t. \quad (8-10)$$

Положив $v_n=0$, найдем время торможения

$$t = 2h_{\text{буф}}/v_{n0}.$$

Путь, проходимый поршнем, равен:

$$h = \int_0^t v_n dt = v_{n0} t - \frac{v_{n0}^2}{4h_{\text{буф}}} t^2. \quad (8-11)$$

Из (8-10) и (8-11) можно получить зависимость

$$v_n = v_{n0} \sqrt{1 - \frac{h}{h_{\text{буф}}}}. \quad (8-12)$$

Воспользовавшись (8-8) и (8-12), можно найти зависимость сечения щели $S_{щ}$ от хода поршня:

$$S_{щ} = \frac{S_{п}}{v_{м}} v_{п} = \frac{A_{буф}}{h_{буф} \rho v_{м}} v_{п0} \sqrt{1 - \frac{h}{h_{буф}}}. \quad (8-13)$$

По мере перемещения поршня сечение $S_{щ}$ уменьшается. Подробный расчет буфера приведен в [Л. 8-2, 8-3].

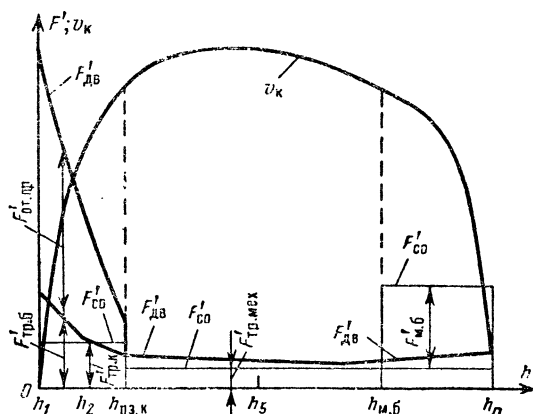


Рис. 8-3. Силы, действующие в механизме выключателя ВМП-35 при оклужении, и скорость движения контактов.

Поскольку известны зависимости $v_{п} = f(h)$ и $v_{п} = f(t)$, то с помощью плана скоростей определяем скорость контакта

$$v = f(h) \text{ и } v = f(t).$$

В механизмах, где количество энергии, накопленной к концу хода, относительно невелико, применяют эластичный (резиновый) буфер (рис. 8-2, а).

Энергия в таком буфере тратится на деформацию колец 2, преодоление сил трения между кольцами 2 и цилиндром 1 и преодоление сил внутреннего трения в резине.

Объем резиновых колец определяется формулой

$$Q = A/a,$$

где A — энергия, которая должна быть поглощена устройством, Дж;
 a — энергия, которая может быть поглощена 1 м³ объема резины $[(0,145 \div 1,76) \cdot 10^6 \text{ Дж/м}^3 \text{ при сжатии соответственно на } 20 \text{ и } 50\%]$.

Ход буфера h определяется уравнением

$$h = A/Sa,$$

где S — площадь сечения, равная $\pi(D_n^2 - d_b^2)/4$.

Подробные данные по расчету резиновых буферов приведены в [Л. 2-9].

На рис. 8-3 представлены силы, приведенные к контакту, действующие при отключении выключателя (рис. 8-1). Там же показана кривая скорости, полученная путем расчета. На этом рисунке обозначены силы: $F'_{от.пр}$ — отключающей пружины, $F'_{пр.б}$ — пружины буфера, $F_{тр.к}$ — трения в контактах, $F'_{тр.мех}$ — трения в механизме, $F'_{м.б}$ — масляного буфера отключения, $F'_{с.о}$ — результирующая сила, препятствующая движению, $F'_{дв}$ — результирующая движущая сила. Положения $h_{рз.к}$ и $h_{м.б}$ соответствуют размыканию контактов и началу действия масляного буфера отключения.

Для того чтобы рассчитать время отключения, используем графическое интегрирование уравнения $v = dh/dt$, где v — скорость контакта; h — его путь.

Отсюда

$$t = \int_0^h \frac{dh}{v}.$$

Задаваясь различным значением h , с помощью кривой $v(h)$ (рис. 8-4) строим зависимость $\frac{1}{v} = f(h)$.

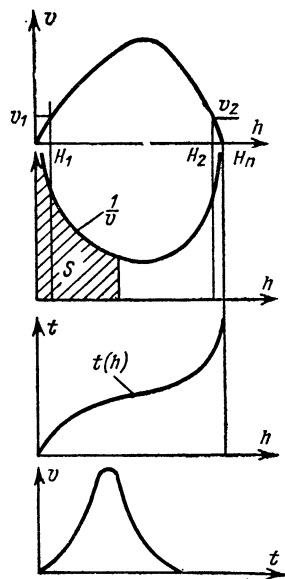


Рис. 8-4. Графическое построение для определения зависимостей $t(h)$ и $v(h)$.

Время, необходимое для прохождения пути h , определяется площадью S . Искомое время равно:

$$t = m_h m_{1/v} S,$$

где m_h и $m_{1/v}$ — соответствующие масштабы; S — площадь фигуры, ограниченной кривой $1/v$ и осью h .

При расчетах в начале и в конце процесса отключения встречаются трудности, связанные с тем, что при h , близких к нулю и H_n , функция $1/v$ принимает бесконечно большие значения.

Расчеты значительно упрощаются, если принять, что функция $1/v = f(h)$ аппроксимируется равнобокой гиперболой при $h \leq 0,05 H_n$

и при $h \geq 0,95 H_{\Pi}$ [Л. 8-1]. Тогда полное время отключения равно:

$$t = \int_0^{H_{\Pi}} \frac{1}{v} dh = \frac{2}{v_1} H_1 + \int_{H_1}^{H_2} \frac{1}{v} dh + \frac{2}{v_2} (H_{\Pi} - H_2), \quad (8-14)$$

где $H_1 = 0,05 H_{\Pi}$; $H_2 = 0,95 H_{\Pi}$; v_1 — скорость при $h = H_1$; v_2 — скорость при $h = H_2$.

Задавая различные значения h , находим $t(h)$ — рис. 8-4. Зная зависимости $t(h)$ и $v(h)$, находим $v(t)$.

До сих пор расчет проводился так, что все параметры механизма известны и необходимо найти механические характеристики.

Очень часто бывает необходимо определить параметры отключающей пружины механизма. В этом случае обычно задаются скоростью в момент расхождения контактов. Скорость в этот момент определяется условиями гашения дуги. В выключателях высокого напряжения она колеблется от 1,5 до 10 м/с. В контакторах она значительно меньше: 0,3—0,5 м/с.

Для расчета параметров отключающей пружины, приведенной к контактам, воспользуемся уравнением энергетического баланса (8-1)

$$\frac{m_{\text{прив.к}} v_{\text{к}}^2}{2\eta} = (A_{\text{движ.к}} - A_{\text{торм.к}}), \quad (8-15)$$

где $m_{\text{прив.к}}$ — значение суммарной приведенной массы механизма в момент размыкания контактов;

$v_{\text{к}}$ — скорость в момент размыкания контактов;

$A_{\text{движ.к}}$ — работа, совершенная движущими силами к моменту размыкания контактов;

$A_{\text{торм.к}}$ — работа, совершенная тормозными силами к моменту размыкания контактов.

Разгон подвижных частей в случае системы, изображенной на рис. 8-1, производится как за счет отключающей пружины 10, так и за счет буферной пружины 12. В этом случае отключающая пружина должна совершать меньшую работу, что уменьшает максимальную скорость контакта, облегчает механизм выключателя и демпфер отключения.

Параметры пружинного буфера должны быть известны. Если они не даны, то можно положить, что поло-

вина работы, необходимой для разгона подвижных частей до момента расхождения контактов, производится пружинным буфером:

$$A_{\text{движ.к}} = (A_{\text{отк.пруж.к}} + A_{\text{буф}}) \eta. \quad (8-16)$$

Воспользовавшись уравнениями (8-15) и (8-16), получим:

$$A_{\text{отк.пруж.к}} = \frac{m_{\text{прив.к}} v_k^2}{2\eta} + \frac{1}{\eta} A_{\text{торм.к}} - A_{\text{буф}}. \quad (8-17)$$

Работа пружины на ходе в контактах равна:

$$A_{\text{отк.пруж.к}} = \int_0^{l_k} C_1 (l_0 - l) dl = C_1 l_k \left(l_0 - \frac{l_k}{2} \right), \quad (8-18)$$

где l_0 — полная деформация пружины во включенном положении, м; l_k — ход пружины, соответствующий ходу контакта, м;

C_1 — жесткость пружины, Н/м.

Полная деформация l_0 пружины обычно берется равной или несколько большей деформации пружины, соответствующей полному ходу подвижного контакта аппарата. Воспользовавшись (8-17) и (8-18), получим:

$$C_1 = \frac{\frac{m_{\text{прив.к}} v_k^2}{2\eta} + \frac{A_{\text{торм.к}}}{\eta} - A_{\text{буф}}}{l_k \left(l_0 - \frac{l_k}{2} \right)}. \quad (8-19)$$

Определив жесткость пружины и зная максимальную ее деформацию, находим параметры пружины: диаметры проволоки и самой пружины, число витков [Л. 8-4].

В аппаратах с относительно простым механизмом (контакты, реле) время движения контакта при отключении можно ориентировочно рассчитывать по упрощенной формуле:

$$m \frac{dv}{dt} \approx F_{\text{пр}}.$$

Если принять, что сила, развиваемая пружиной, постоянна и равна среднему значению, то ускорение равно:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{F_{\text{пр.ср}}}{m}.$$

Поскольку движение равномерно ускоренное, то путь, пройденный контактом с момента размыкания до остановки, определится уравнением

$$h = v_0 t + \frac{at^2}{2}, \quad (8-20)$$

где v_0 — скорость в момент размыкания контактов;
 t — время движения с момента размыкания контактов до их остановки;
 a — ускорение, сообщаемое подвижным частям пружиной, равно $F_{\text{пр. ср}}/m$.

Скорость v_0 рассчитывается с учетом действия как возвратной (отключающей), так и контактной пружин. Принимая движение равноускоренным, получаем:

$$\begin{aligned} t_k &= \sqrt{\frac{2m_{\text{прив}} h_k}{F_{\text{ср.к}} + F_{\text{ср.в}}}}; \\ v_0 = at_k &= \frac{F_{\text{ср.к}} + F_{\text{ср.в}}}{m_{\text{прив}}} \sqrt{\frac{2m_{\text{прив}} h_k}{F_{\text{ср.к}} + F_{\text{ср.в}}}} = \\ &= \sqrt{\frac{(F_{\text{ср.к}} + F_{\text{ср.в}}) \cdot 2h_k}{m_{\text{прив}}}}, \end{aligned}$$

где t_k — время хода в контактах;
 h_k — ход в контактах;
 $F_{\text{ср.к}}$ — средняя сила контактной пружины на ходе в контактах;
 $F_{\text{ср.в}}$ — средняя сила возвратной пружины на ходе в контактах.

В заключение необходимо отметить, что при отключении токов короткого замыкания электродинамические силы, действующие на подвижную часть токоведущей системы аппарата, также разгоняют контакты. Работу электродинамических сил можно рассчитать по формуле

$$A_{\text{э.д}} = F_{\text{э.д. ср}} h_k.$$

Электродинамические силы определяются по формулам гл. 1. Расчет механизмов сложных аппаратов дан в [Л.7-2].

8-3. Включение механизма аппарата

Процесс включения аппарата является более сложным, чем процесс отключения. Это обусловлено тем, что процесс отключения идет под действием отключающих пружин, сила которых линейно зависит от деформации пружины. Включение аппарата происходит под действием привода аппарата. Наиболее часто применяются электромагнитные, пневматические, пружинные и гидравлические приводы. Все приводы, за исключением пружинных, имеют тяговую характеристику, которая нелинейно зависит от положения привода, и, кроме того, зависит от скорости.

Расчет динамики включения механизма с пружинным приводом производится так же, как и при отключении (§ 8-2).

В аппаратах низкого напряжения преимущественное распространение получил электромагнитный привод, который удовлетворяет всем предъявляемым требованиям.

Рассмотрим процесс включения простейшего магнитного механизма (рис. 5-13).

После трогания якоря (§ 5-7) процессы в механизме описываются уравнениями

$$U = iR + \frac{d\Psi}{dt}; \quad (8-21)$$

$$F_3 dx = d\left(\frac{mv^2}{2}\right) + F_n dx, \quad (8-22)$$

где F — электромагнитная сила якоря; x — путь, пройденный якорем; m — масса подвижных частей, приведенная к зазору; v — скорость, приведенная к зазору; F_n — противодействующая сила, приведенная к зазору.

Первое уравнение выражает баланс напряжений: напряжение источника уравнивается активным падением напряжения и противо-э. д. с.

Второе — энергетический баланс: работа, произведенная электромагнитом, идет на увеличение кинетической энергии подвижных частей и на работу преодоления противодействующих сил. Оба эти уравнения нелинейны и могут быть решены совместно приближенно [Л.5-7].

Напишем уравнения (8-21) и (8-22) в конечных разностях:

$$U = iR + \frac{\Delta\Psi}{\Delta t}; \quad (8-23)$$

$$F_{\Psi} \Delta x = \Delta \left(\frac{mv^2}{2} \right) + F_{\Pi} \Delta x. \quad (8-24)$$

При движении якоря, с одной стороны, уменьшается зазор δ и возрастает магнитная проводимость G_{δ} , с другой — из-за появления противо-э. д. с. $i dL/dt$ (§ 5-7) рост тока в обмотке сначала замедляется, а затем ток начинает уменьшаться (рис. 5-18). На рис. 8-5 изображено изменение потокосцепления от тока в процессе движения.

До начала движения ток в обмотке нарастает по экспоненте до тока трогания $i_{\text{тр}}$ (рис. 8-4), потокосцепление возрастает от 0 до Ψ_0 по кривой Oa .

По мере перемещения якоря рабочий зазор уменьшается ($\delta_0 > \delta_1 > \delta_2 > \delta_3 > \delta_4$), а ток меняется от точки a до точки b согласно кривой рис. 8-5. Потокосцепление во время движения принимает значения $\Psi_1; \Psi_2; \Psi_3; \Psi_4$. Кривая $acdeb$ является зависимостью $\Psi(i)$ в динамике.

Рассмотрим процесс перемещения якоря из положения $\delta = \delta_0$ в положение $\delta = \delta_1$.

Воспользовавшись уравнениями (5-50) и (8-24), можно получить:

$$m_i m_{\Psi} S_{Oac} = \Delta \frac{mv^2}{2} + F_{\Pi} (\delta_0 - \delta_1). \quad (8-25)$$

Поскольку начальная скорость $v_0 = 0$, то можно найти скорость v_1 в момент $\delta = \delta_1$:

$$v_1 = \sqrt{2 \frac{[m_i m_{\Psi} S_{Oac} - F_{\Pi} (\delta_0 - \delta_1)]}{m}}. \quad (8-26)$$

Средняя скорость на участке $\delta_0 - \delta_1$ равна:

$$v_{\text{ср1}} = \frac{v_0 + v_1}{2} = \frac{v_1}{2}. \quad (8-27)$$

Время перемещения Δt_1 из положения δ_0 в положение δ_1 равно:

$$\Delta t_1 = \frac{\delta_0 - \delta_1}{v_{\text{ср1}}} = 2 \frac{\delta_0 - \delta_1}{v_1}. \quad (8-28)$$

Используя уравнение (8-23), получаем:

$$U = i_{\text{ср1}} R + \frac{\Psi_1 - \Psi_0}{\Delta t_1}.$$

Средний ток $i_{\text{ср1}} = (i_{\text{тр}} + i_1)/2$ равен:

$$i_{\text{ср1}} = \frac{U - \frac{\Psi_1 - \Psi_0}{\Delta t_1}}{R} = \frac{i_{\text{тр}} + i_1}{2}. \quad (8-29)$$

$$\text{При } \delta = \delta_1 \text{ ток } i_1 = 2i_{\text{ср1}} - i_{\text{тр}}. \quad (8-30)$$

Средняя сила электромагнита на участке $\delta_0 - \delta_1$ равна:

$$F_{\text{1ср}} = \frac{m_i m_{\Psi} S_{\text{Оас}}}{\delta_0 - \delta_1}. \quad (8-31)$$

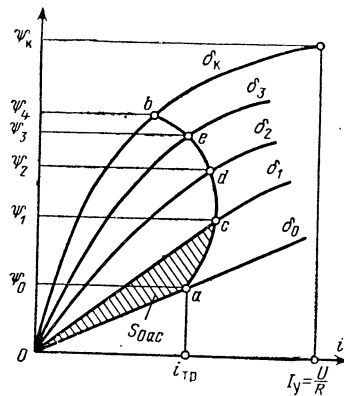


Рис. 8-5. Изменение потоко-сцепления в процессе движения якоря.

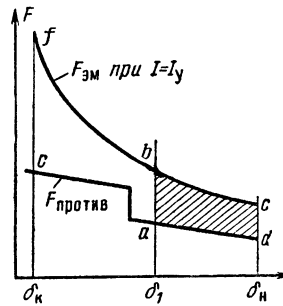


Рис. 8-6. К расчету времени движения якоря по статической тяговой характеристике.

Аналогичные расчеты проводятся на остальных участках хода якоря. Таким образом, если известна кривая $\Psi(i)$ в динамике, то можно получить все характеристики механизма в этом режиме:

$$\delta = f(t); v = f(t); i = f(t); F = f(t) \text{ и } F = f(\delta).$$

Полное время движения равно:

$$t = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4.$$

После точки b якорь неподвижен и потокосцепление нарастает до значения Ψ_k , соответствующего установившемуся току I_y .

Построение кривых $\Psi(i)$ для фиксированных зазоров производится по методике, описанной в § 5-2. Сначала определяется распределение потока по обмотке, а затем определяется потокосцепление Ψ . Методика расчета кривой $\Psi(i)$ в динамике приведена в [Л.5-1, 5-7].

Для ориентировочного определения времени движения можно воспользоваться статической характеристикой. На рис. 8-6 изображены статическая тяговая характеристика электромагнита $F_{эм}$ и характеристика противодействующей силы $F_{прот}$. Разность сил $F_{эм} - F_{прот}$ идет на сообщение ускорения подвижным частям:

$$F_{эм} - F_{прот} = m \frac{d^2 x}{dt^2} = mv \frac{dv}{dx}, \quad (8-32)$$

где m — масса подвижных частей, приведенная к рабочему зазору;

x — перемещение якоря;

v — скорость движения якоря.

После интегрирования (8-32) получим:

$$\int_0^x (F_{эм} - F_{прот}) dx = \frac{mv^2}{2}. \quad (8-33)$$

Интеграл удобно рассчитывается графоаналитически. Скорость в точке хода δ_1 равна:

$$v = \sqrt{2 \frac{m_F m_\delta S_{abcd}}{m}}, \quad (8-34)$$

где m_F — масштаб по оси силы;

m_δ — масштаб по оси перемещения;

S_{abcd} — площадь, пропорциональная работе движущей силы.

Зная скорость в любой точке хода, можно рассчитать время движения на всех участках и суммированием определить полное время движения.

Иногда во время движения ток мало меняется и составляет некоторую долю α от установившегося значения I_y .

В таких случаях рекомендуется строить статическую характеристику при $I = \alpha I_y$ [Л.5-8].

Решение задачи включения высоковольтного выключателя с электромагнитным приводом производится аналогичным путем и связано с трудностями из-за сложности механизма [Л.8-2, 8-3].

Следует отметить, что в конце хода включения отключающие и буферные пружины деформируются не только силой привода, но и за счет кинетической энергии подвижных частей. После остановки подвижных частей в крайнем положении за счет избытка энергии, поглощенной пружинами, начнется движение в сторону отключения. В определенном положении включающие силы станут больше отключающих и начнется вновь движение в сторону включения. Такие колебания при включении очень опасны для аппарата, поскольку они могут приводить к многократному замыканию и размыканию контактов. Для устранения этого явления механизм выключателя запирается защелкой во включенном положении несколько раньше, чем направление скорости изменит знак.

При включении выключателя привод должен совершить определенную статическую и динамическую работу. Статическая работа тратится на деформации отключающих и буферных пружин, на преодоление сил трения в механизме и контактах (розетках), на преодоление сил тяготения.

Для того чтобы выключатель включить в заданное время, преодолеть действие электродинамических сил, необходимо подвижным частям механизма сообщить определенную скорость. Энергия, необходимая для разгона механизма, является динамической работой включения. Работа, которая может быть произведена приводом, должна быть больше суммы статической и динамической работы.

Расчет времени включения и других динамических характеристик выключателя при электромагнитном приводе производится с помощью уравнений (8-23) и (8-24) [Л. 5-16].

В настоящее время в аппаратах высокого и низкого напряжения начинают применяться пневматические приводы. Расчет пневматического привода рассмотрен в [Л. 7-2].

АППАРАТЫ УПРАВЛЕНИЯ

Глава девятая

КОНТРОЛЛЕРЫ, КОМАНДОАППАРАТЫ И РЕОСТАТЫ

9-1. Общие сведения

Контроллером называется многоступенчатый, многоцепной аппарат с ручным управлением, предназначенный для изменения схемы главной цепи двигателя или цепи возбуждения. Кроме того, контроллеры также применяются для изменения сопротивлений, включенных в эти цепи. По своему конструктивному исполнению контроллеры делятся на барабанные, кулачковые и плоские.

Командоаппаратом называется устройство, предназначенное для переключений в цепях управления силовых электрических аппаратов (контакторов). Иногда они применяются для непосредственного пуска электрических машин малой мощности, для включения электромагнитов и другого оборудования. Командоаппараты могут иметь ручной привод (кнопки, ключи управления, командоконтроллеры) или могут приводиться в действие контролируемым механизмом (путевые выключатели).

Реостат является совокупностью резисторов и контроллера, позволяющей изменять сопротивление, вводимое в цепь.

9-2. Контроллеры

а) Барабанные контроллеры. На рис. 9-1 показан один контактный элемент контроллера. На валу 1 укреплен сегментодержатель 2 с подвижным контактом 3 (сегментом). Сегментодержатель изолирован от вала бакелитизированной бумагой 4. Неподвижный контакт 5 расположен на изолированной рейке 6. При вращении вала 1

сегмент 3 набегает на неподвижный контакт 5. Осуществляется замыкание цепи. Необходимое нажатие контакта обеспечивается пружиной 7. Вдоль вала расположено большое число контактных элементов. Сегментодержатели соседних элементов могут соединяться между собой, образуя необходимую электрическую схему. Последовательность замыкания различных цепей достигается различной длиной сегментов 3. Положение вала фиксируется с помощью звездочки и защелки (рис. 9-6).

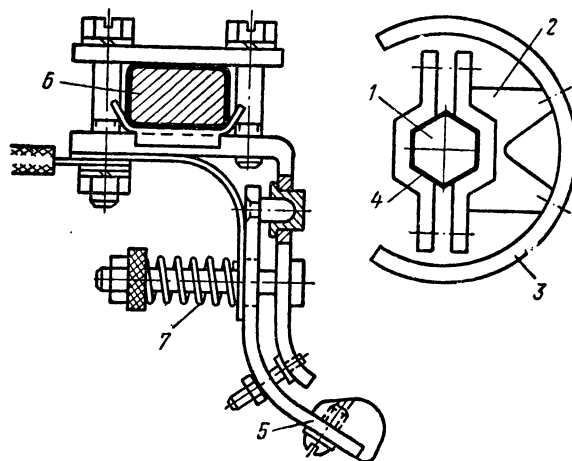


Рис. 9-1. Контактный элемент барабанного контроллера.

Вследствие малой износостойчивости контактов контроллер имеет ограниченное число включений в час (до 240). Поэтому он применяется при редких включениях.

б) Кулачковые контроллеры. Поперечный разрез кулачкового контроллера переменного тока изображен на рис. 9-2.

В контроллере используется перекатывающийся линейный контакт. Сменный подвижный контакт 1 имеет возможность вращаться относительно центра O_2 , расположенного на контактном рычаге 2. Этот контакт соединяется с выходным зажимом с помощью гибкой связи 4.

Замыкание контактов и необходимое нажатие создаются пружиной 5, действующей на контактный рычаг через шток 6. При размыкании контактов кулачок 7 действует на ролик 8. При этом сжимается пружина 5, а контакты 1 и 3 размыкаются. Момент включения и отключения контактов зависит от профиля кулачковой шайбы 9, приводящей в действие контактные элементы. Благодаря перекатыванию контактов дуга, загорающаяся при размыкании, не воздействует на поверхность контакта, участвующую в проведении тока в полностью включенном состоянии (см. § 3-4). Малый износ контактов позволяет увеличить число включений в час до 600 при $ПВ=60\%$. Контактные элементы I и II расположены по обе стороны

кулачковой шайбы 9, что позволяет резко сократить осевую длину контроллера. Обычно вдоль оси аппарата располагается несколько контактных элементов, аналогичных рассмотренным. Так же как и барабанный, кулачковый контроллер имеет механизм для фиксации положения вала. На переменном токе ввиду облегченного гашения дуги между кулачковыми элементами устанавливаются только дуго-

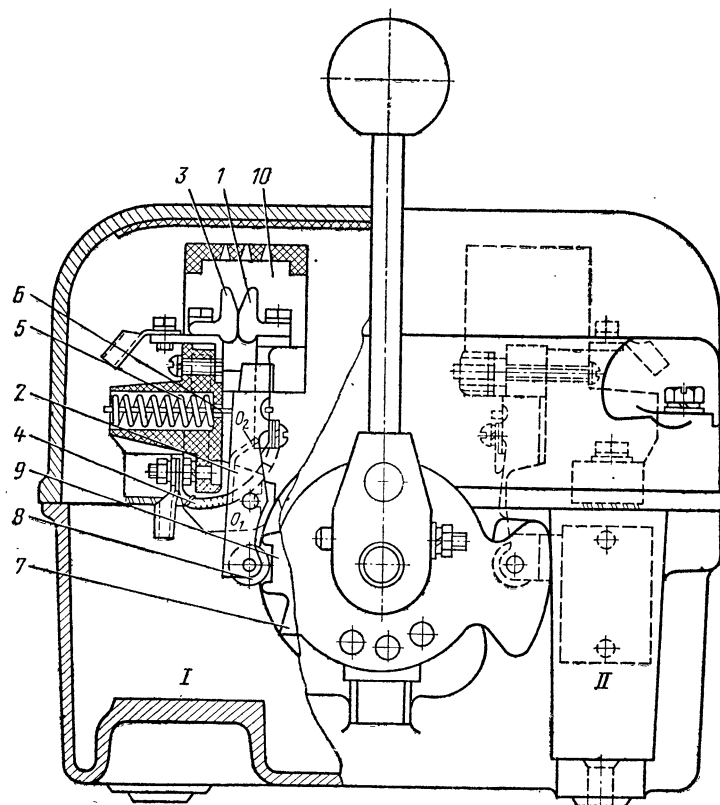


Рис. 9-2. Кулачковый контроллер.

стойкие асбестоцементные перегородки 10, препятствующие перекрытию между полюсами аппарата. Дугогасительные устройства в этих случаях можно не ставить. Если контроллер отключает цепь постоянного тока, устанавливается дугогасительное устройство, аналогичное применяемому в контакторах (§ 10-2).

Рассмотренная нами конструкция контроллера имеет следующую особенность: выключение происходит за счет выступа кулачка, а включение за счет силы пружины. Благодаря этому контакты уда-

ется развести даже в случае их сваривания. Недостатком этой системы является большой момент на валу, создаваемый включающими пружинами при значительном числе контактных элементов.

Возможны и другие конструктивные оформления привода юн-тактов. В одном из них контакты замыкаются под действием кулачка и размыкаются под действием пружины, в другом и включение и отключение совершается кулачком [Л. 9-1]. Однако они применяются редко.

На рис. 9-3 показана схема пуска асинхронного двигателя с фазным ротором с помощью кулачкового контроллера.

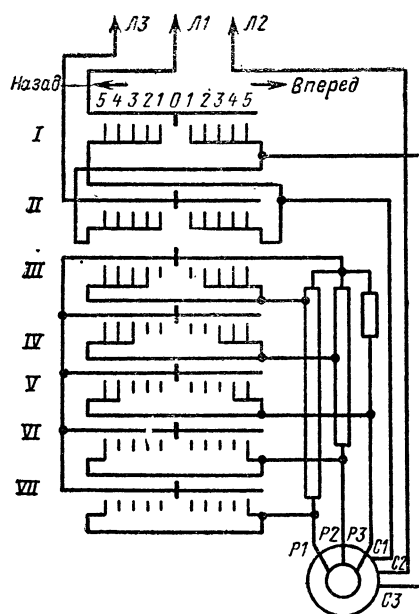


Рис. 9-3. Схема включения кулачкового контроллера для пуска асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Контакты обозначены римскими цифрами, арабскими — позиции вала аппарата. При пуске «вперед» работают контактные элементы, расположенные справа. Рассмотрим третью позицию. В этой позиции замкнуты контакты I, II, III, IV. При этом статор подключен к сети, а в роторе выведены первые ступени пусковых резисторов в двух фазах. В пятом положении все контакты замкнуты и ротор двигателя замкнут.

в) Плоские контроллеры. Для плавного регулирования поля возбуждения крупных генераторов и для пуска в ход и регулирования частоты вращения больших двигателей необходимо иметь большое число ступеней. Применение кулачковых контроллеров здесь нецелесообразно, так как большое число ступеней ведет к резкому возрастанию габаритов аппарата.

Число операций в час при регулировании и пуске невелико (10—12). Поэтому особых требований к контроллеру с точки зрения износостойкости не предъявляется. В этом случае широкое распространение получили плоские контроллеры.

На рис. 9-4 показан общий вид плоского контроллера для регулирования возбуждения. Неподвижные контакты 1, имеющие форму призмы, укреплены на изоляционной плите 2, являющейся основанием контроллера. Расположение неподвижных контактов по линии дает возможность иметь большое число ступеней. При той же длине контроллера число ступеней может быть увеличено путем применения параллельного ряда контактов, сдвинутого относительно перво-

го ряда. При сдвиге на полшага число ступеней удваивается. Подвижный контакт выполнен в виде медной щетки. Щетка располагается в траверсе 3 и изолируется от нее. Нажатие создается цилиндрической пружиной. Передача тока с контактной щетки 4 на

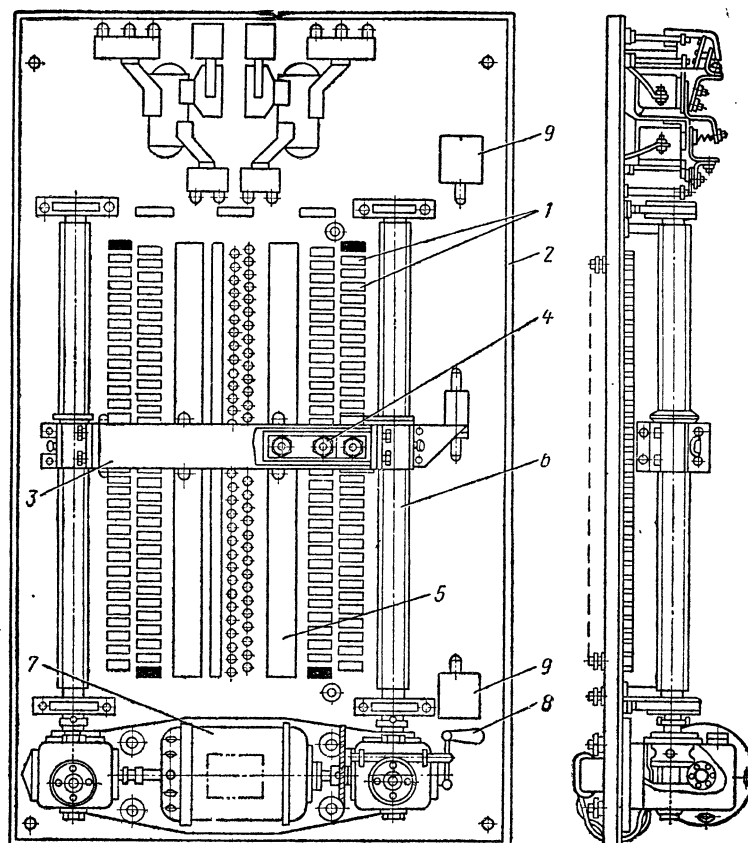


Рис. 9-4. Плоский контроллер.

выходной зажим осуществляется с помощью токосъемной щетки и токосъемной шины 5. Контроллер рис. 9-4 может одновременно производить переключения в трех независимых цепях. Траверса перемещается с помощью двух винтов 6, приводимых в движение вспомогательным двигателем 7. При наладочных работах перемещение траверсы вручную производится рукояткой 8. В конечных положениях траверсы воздействует на конечные выключатели 9, которые останавливают двигатель. Для того чтобы иметь возможность точной

остановки контактов на желаемой позиции, скорость движения контактов берется малой: $(5-7) \cdot 10^{-3}$ м/с, а двигатель должен иметь торможение. Плоский контроллер может иметь и ручной привод.

При размыкании между подвижным и неподвижным контактом появляется напряжение, равное падению напряжения на ступени. Для того чтобы не появлялась дуга, допустимое падение напряжения на ступени берется от 10 В (при токе 200 А) до 20 В (при токе 100 А) [Л. 9-1]. Допустимое число включений в час определяется износом контактов и не превосходит обычно 10—12. Если напряжение на ступени равно 40—50 В, то применяется специальный контактор, который переключает соседние контакты во время перемещения щетки [Л. 9-1].

В случае, когда необходимо производить коммутацию цепи при токах 100 А и более с частотой включений в час 600 и выше, применяется система, состоящая из контактора и командоаппарата.

9-3. Командоаппараты

а) **Кнопки управления.** Простейшим командоаппаратом является кнопка управления. Кнопка используется для различных схем пуска, остановки и реверса двигателей путем замыкания и размыкания цепей электромагнитов контакторов, которые коммутируют главную цепь.

Основной частью кнопки является кнопочный элемент, разрез которого показан на рис. 9-5. Для повышения надежности работы

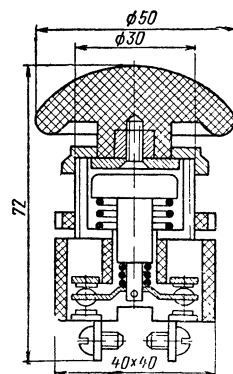


Рис. 9-5. Кнопочный элемент.

контакты выполняются из серебра. При переменном токе дуга хорошо гаснет при напряжении до 500 В и токе 3 А благодаря наличию двух разрывов. На постоянном токе дуга гаснет хуже: при напряжении 440 В элемент может отключать только 0,15 А. Поскольку кнопка включает и электромагниты переменного тока, контакты должны в замкнутом положении надежно пропускать пусковой ток обмотки контактора, который может достигать 60 А. Следует отметить, что схемы управления желательно проектировать так, чтобы отключение цепи производилось не кнопкой, а другим, более мощным аппаратом, включенным последовательно с ней. В том случае, когда необходимо производить переключение нескольких цепей управления по определенной программе с большой частотой включений в час, применяются командоконтроллеры.

б) **Командоконтроллеры.** Широкое распространение получили не регулируемые кулачковые командоконтроллеры.

На рис. 9-6 представлен разрез командоконтроллера постоянного тока. Принцип действия аналогичен принципу действия силового кулачкового контроллера. При отключении мостиковый контакт 1 создает два разрыва, что облегчает гашение дуги. Кулачковый при-

вод контактов, большое расстояние контактов от центра вращения O рычага 2, большой разрыв контактов позволяют почти в 4 раза увеличить ток отключения по сравнению с кнопочным элементом. Положение вала фиксируется с помощью рычажного фиксатора 4.

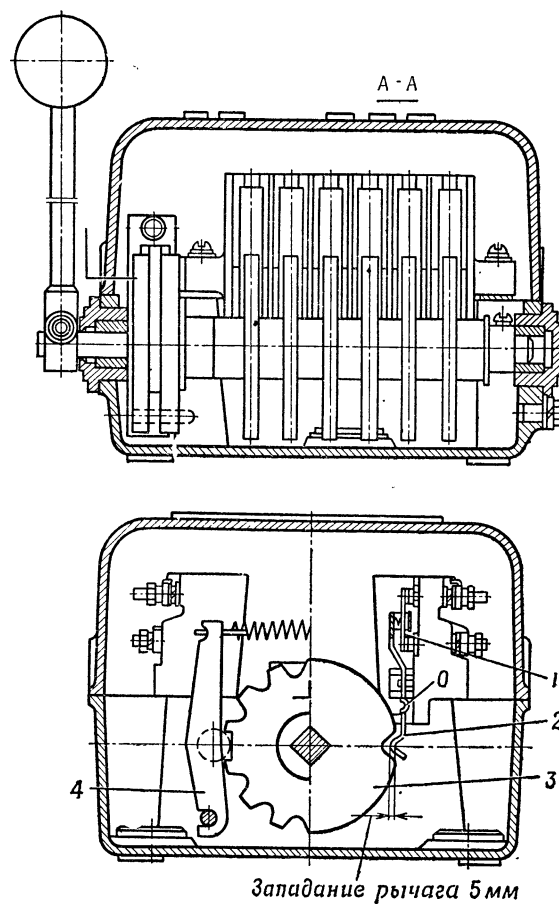


Рис. 9-6. Командоконтроллер.

Моменты замыкания и размыкания контактов зависят от профиля кулачка 3. При вращении вала командоконтроллера происходит управление соответствующими силовыми контакторами, которые в свою очередь осуществляют коммутацию в силовых цепях двигателя.

В случае необходимости более точной регулировки момента срабатывания применяют регулируемые кулачковые командоконтрол-

леры. Устройство и принцип действия элемента такого контроллера показаны на рис. 9-7, а.

На стальном валу 1 укрепляется диск 3 из изоляционного материала. По окружности диска располагаются отверстия, с помощью которых крепятся кулачки 2 и 7. При набегании кулачка 7 на ро-

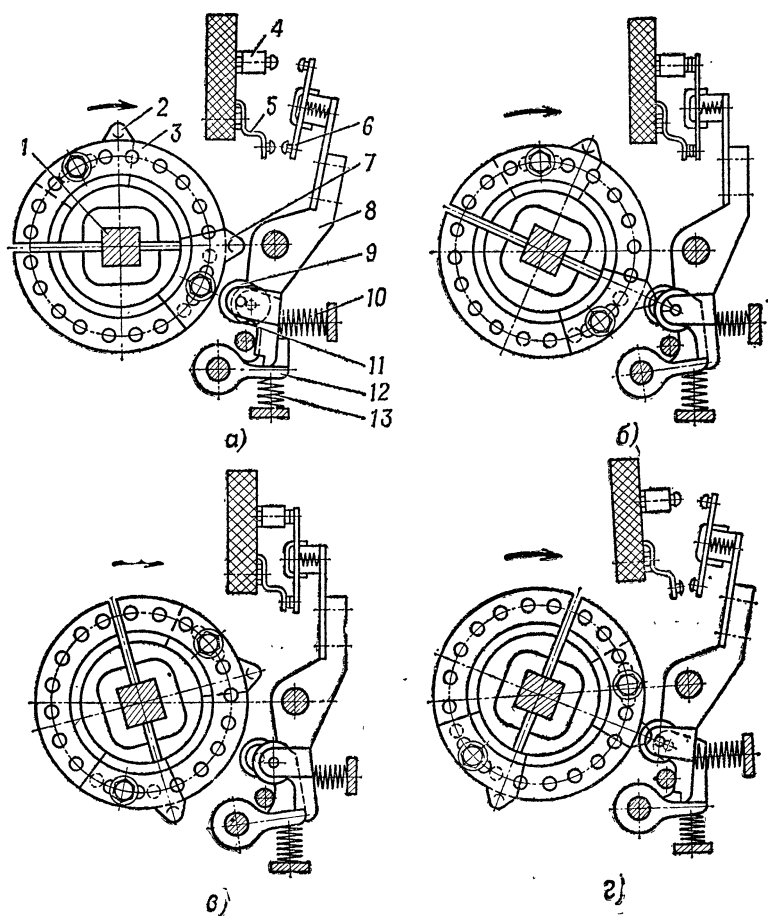


Рис. 9-7. Регулируемый командоконтроллер.

лик 9 контактный рычаг 8 поворачивается против часовой стрелки и неподвижные контакты 4 и 5 замыкаются мостиком 6. Контактный рычаг удерживается во включенном положении защелкой 12, которая удерживается пружиной 13 в пазу хвоста рычага 8 (рис. 9-7, в).

Одновременно сжимается возвратная пружина 10. При дальнейшем вращении диска кулачок 2 набегает на ролик 11 защелки 12 и выбивает последнюю. Под действием пружины 10 происходит размыкание контактов (рис. 9-7, з).

Большим достоинством такого механизма является независимость скорости размыкания контактов от скорости вращения вала выключателя. Это дает возможность использовать регулируемый командоконтроллер как путевой выключатель при малой скорости вращения вала.

Момент замыкания и размыкания контактов может регулироваться в широких пределах с большой точностью. Грубая регулировка момента работы контактов достигается путем установки кулачка в различные положения на диске (точность установки 18°). Для более точной регулировки кулачок имеет овальное отверстие для крепления, которое позволяет смещать кулачок на $10^\circ 30'$ в обе стороны относительно центра отверстия для крепления кулачка. Точность работы аппарата $\pm 25'$.

Регулируемый командоконтроллер позволяет установить на каждом диске до трех включающих и трех выключающих кулачков. Число контролируемых цепей может меняться от 4 до 12. Большое число управляемых цепей создает возможность управления очень сложными схемами автоматики электропривода.

Привод командоконтроллера осуществляется специальным серводвигателем, что позволяет производить дистанционное управление командоконтроллером.

в) **Путевые, конечные выключатели и микровыключатели.** Путевой выключатель предназначен для замыкания или размыкания контактов цепи с небольшим током в зависимости от положения рабочего органа управляемой машины или аппарата. Конечные выключатели являются частным случаем путевых, поскольку конечный выключатель служит для коммутации цепей в крайних положениях органа управляемой машины.

Путевые выключатели в зависимости от способа привода контактов можно разбить на кнопочные, рычажные и шпиндельные.

В кнопочном путевом выключателе контролируемый орган машины воздействует на шток кнопочного элемента (рис. 9-5). Особенностью этого выключателя является размыкание и замыкание контактов с такой же скоростью, что и скорость контролируемого органа. При небольшой величине тока гашение дуги происходит за счет механического растяжения, и при малом растворе контактов она вообще может не погаснуть. Поэтому при скорости движения штока меньше 0,4 м/мин необходимо применять выключатели с быстродействующими контактами, обеспечивающие необходимую скорость размыкания при любой скорости контролируемого органа.

В том случае, когда требуется остановить машину или сделать соответствующие переключения с высокой точностью $(0,3-0,7) \cdot 10^{-3}$ м, применяются микропереключатели. Схематический разрез такого аппарата дан на рис. 9-8. Переключатель имеет один замыкающий и один размыкающий контакты с общей точкой.

Неподвижные контакты 1 и 2 укреплены в пластмассовом корпусе 7. Подвижный контакт 3 укреплен на конце специальной пружины. Пружина состоит из двух частей: плоской 4 и фигурной 5. В указанном положении пружина создает давление на верхний контакт 2. При нажатии на головку происходят деформация пружины и переброс контакта в крайнее нижнее положение. Переход контакта

из верхнего положения в нижнее совершается очень быстро (0,01—0,02 с), что обеспечивает надежное отключени цепи. Ход головки составляет десятые доли миллиметра. Микровыключатели серии ВКМ-ВЗГ отключают ток 2,5 А при постоянном напряжении 220 В и переменном 380 В.

Если необходимо обеспечить надежную работу переключателя при больших ходах и больших токах, применяются рычажные переключатели.

Принцип действия одного из таких переключателей показан на рис. 9-9. Контролируемый орган воздействует на ролик 1, укрепленный на конце рычага 2. На другом конце рычага находится подпружиненный ролик 12, который может перемещаться вдоль оси рычага. В указанном на рисунке положении замкнуты контакты 7 и 8. Положение механизма надежно за-

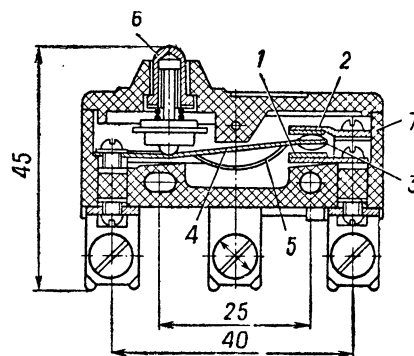


Рис. 9-8. Путьевой микропереключатель.

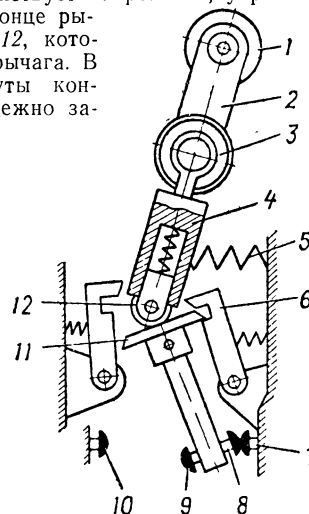


Рис. 9-9. Рычажный путьевой переключатель.

фиксировано защелкой 6. При воздействии на ролик 1 рычаг 2 поворачивается против часовой стрелки. Ролик 12 поворачивает тарелку 11 и связанные с ней контакты 8 и 9. При этом контакты 7 и 8 размыкаются, а 9 и 10 замыкаются.

Замыкание и размыкание контактов происходит с большой скоростью, не зависящей от скорости движения ролика 1. Это дает возможность отключать токи до 6 А при напряжении до 220 В постоянного тока. Возврат выключателя в исходное положение после того, как прекратится воздействие на ролик 1, производится пружиной 5.

При необходимости производить переключение большого числа цепей с большой точностью в качестве путьевого выключателя применяется регулируемый командоконтроллер. Его вал связывается с управляющим валом либо непосредственно, либо через редуктор, согласующий скорости вращения управляющего вала и кулачковой шайбы.

В настоящее время промышленность выпускает бесконтактные путевые выключатели, использующие магнитный датчик [§ 14-3] и полупроводниковое реле, либо геркон, управляемый постоянным магнитом [Л. 3-16].

г) **Универсальные переключатели УП.** Для схем управления электроприводом и аппаратами широко применяются универсальные переключатели УП. Устройство секции такого переключателя показано на рис. 9-10.

Каждая секция имеет два разрыва 1 и 2. Секция дает возможность использовать и один разрыв. Тогда цепь присоединяется к неподвижному контакту 3 и выводу подвижного 4. При вращении вала 5 поворачивается кулачок 6, который воздействует на контактный рычаг 7 подвижного контакта 8. Происходит замыкание контактов.

В зависимости от отключаемого тока и напряжения источника используются один или два разрыва. В тяжелых случаях контакты двух соседних секций соединяются последовательно. При этом получают четыре разрыва, включенных последовательно.

Номинальный ток переключателя 20 А. Число контролируемых цепей (секций) может меняться от 2 до 16.

Учитывая относительно большую отключающую способность переключателя УП, большое количество цепей и коммутационных положений, их широко используют для пуска, реверса двигателей мощностью до 5 кВт при напряжении до 500 В. Эти переключатели удобно применять для изменения направления и скорости асинхронных двигателей путем переключения катушек обмоток.

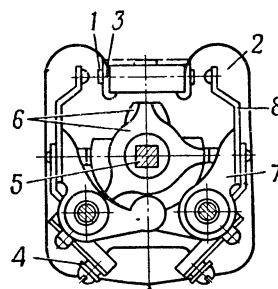


Рис. 9-10. Секция универсального переключателя УП.

Обозначения цепи			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Положение ключа КУ	Условные обозначения положений	Положения рукоятки ключа														
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Отключено	0		X	-	-	X	X	-	-	X	-	-	-	-	-	X
Предварительно включить	B ₁		-	X	X	-	-	-	X	-	X	-	-	-	-	-
Включить	B ₂		-	X	-	-	-	X	-	-	X	-	X	-	X	-
Включено	B		-	X	X	-	-	-	X	-	X	-	-	-	X	-
Предварительно отключить	O ₁		X	-	-	X	X	-	-	X	-	-	-	-	X	-
Отключить	O ₂		X	-	-	-	X	-	-	-	-	X	-	X	-	X

Рис. 9-11. Таблица коммутационных положений переключателя.

При включении автоматов (см. гл. 18), имеющих электромагнитный привод, при включении высоковольтных выключателей (см. гл. 19) необходимо провести целый ряд коммутационных операций, при которых вначале схема подготавливается к включению (запускается звуковая сигнализация, включаются лампы мигания и т.д.), а затем происходит включение или соответственно отключение аппарата. В подобных случаях пользуются ключами управления. Контактная система этих ключей аналогична контактам пакетного выключателя (§ 16-3).

В отличие от переключателя УП вал переключателя управления имеет как фиксированные положения, так и нефиксированные, из которых он автоматически возвращается после того, как на вал перестанет действовать оператор. Переключатель имеет два фиксированных положения рукоятки управления — горизонтальное и вертикальное и два нефиксированных (45° от вертикального по часовой стрелке и 45° от горизонтального против часовой стрелки).

Рассмотрим диаграмму (рис. 9-11). В положении «отключено» (О) ручка стоит горизонтально. При этом замкнуты цепи 1, 4, 5, 8 и 14. Для включения ручка переводится в положение «предварительно включить» (B_1). При этом замыкаются цепи 2, 3 и 7, 9. Для включения аппарата рукоятка поворачивается по часовой стрелке еще на 45° (положение B_2). При этом замыкаются цепи 2, 6, 9, 11, 13. После включения аппарата рукоятка отпускается и она автоматически возвращается в вертикальное положение — положение «включено» (замыкаются цепи 2, 3, 7, 9 и 13). При отключении рукоятка поворачивается сначала в горизонтальное положение (операция O_1 — «предварительно отключить»), затем рукоятка поворачивается еще на 45° против часовой стрелки. После этого устанавливается в положение О.

9-4. Резисторы пусковых и пускорегулирующих реостатов

а) **Общие сведения.** В зависимости от назначения резисторы делят на следующие группы: пусковые, тормозные, регулировочные, добавочные, экономические, разрядные, балластные, нагрузочные, нагревательные, заземляющие, установочные.

Пусковые, тормозные, разрядные, заземляющие резисторы в основном предназначены для работы в кратковременном режиме и должны иметь возможно большую постоянную времени нагрева. Особых требований к стабильности резисторов не предъявляется. Все остальные резисторы работают в основном в длительном режиме, требуют развитой поверхности охлаждения. Сопротивление резистора должно быть стабильным. Подобная классификация резисторов и перечень требований к ним приведены в [Л. 9-1]. В зависимости от материала проводника различают резисторы металлические, жидкостные, угольные и керамические. В промышленном электро-

приводе наибольшее распространение получили металлические резисторы. Керамические (нелинейные) резисторы широко применяются в высоковольтных аппаратах — разрядниках.

б) **Материалы резисторов.** С целью сокращения габаритов резисторов удельное сопротивление материала должно быть возможно выше. Рабочая температура материала резистора также должна быть возможно больше, что позволяет сократить массу материала и поверхность охлаждения реостата (§ 2-4).

Для того чтобы сопротивление резистора не зависело от температуры, температурный коэффициент сопротивления резистора должен быть возможно меньше.

В элементах, предназначенных для работы на воздухе, материал не должен подвергаться коррозии при нагреве либо должен образовывать защитную пленку. В табл. 9-1 приведены основные данные сплавов, широко применяемых для изготовления резисторов.

Т а б л и ц а 9-1

Свойства материалов, используемых для резисторов и реостатов

Наименование и обозначение марок, состав	Удельное электрическое сопротивление при 20°C, мкОм·м	Максимальная рабочая температура, °C	Температурный коэффициент сопротивления, °C ⁻¹
Манганин МНц3-12 (Cu, Mn, Ni+Co)	0,42—0,48	60	$-2 \cdot 10^{-6} \div +25 \times 10^{-6}$
Константан МНМц 40-1,5 (Cu, Ni+CoMn)	0,45—0,52	500	$2 \cdot 10^{-5}$
Нейзильбер МНц 15-20 (Cu, Zn, Ni+Co)	0,3—0,32	200	$36 \cdot 10^{-5}$
Нихром, Х15Н60Н (Fe, Ni, Cr)	1,07—1,17	1100	$17 \cdot 10^{-5}$
Жаростойкий сплав ОХ23Ю5 (Fe, Cr, Al)	1,29—1,45	1200	$8 \cdot 10^{-5}$
Чугун (Fe, C)	0,8	400	0,001
Сталь проволока	0,11—0,13	200—300	$(24—48) \cdot 10^{-4}$
Сталь листовая электро- техническая (Fe, Si)	0,3	150—200	0,002

Сталь имеет малое удельное сопротивление. На воздухе сталь интенсивно окисляется, поэтому может применяться только в масляных реостатах. Рабочая температура целиком определяется нагревом

трансформаторного масла и не превышает 115°C. Температурный коэффициент велик, поэтому сталь нельзя применять для резисторов, сопротивление которых должно быть стабильным. Единственное достоинство этого материала — дешевизна.

В качестве материала для резисторов издавна применяется электротехнический чугун. Он имеет значительно большее, чем у стали, удельное сопротивление, относительно небольшой температурный коэффициент сопротивления. Рабочая температура чугуна достигает 400°C. Элементы резистора изготавливаются из чугуна путем литья. Ввиду хрупкости чугуна для получения необходимой механической прочности сечение элемента должно быть достаточно большим. Поэтому чугунные резисторы имеют большую пропускную способность по току и применяются при больших мощностях.

Ввиду недостаточной стойкости чугунных элементов при вибрациях и ударах этот материал используется для стационарных установок, работающих в спокойном режиме. Листовая электротехническая сталь Э11 используется также в качестве материала для резисторов. За счет присадки кремния удельное сопротивление этой стали почти втрое выше, чем у обычной стали. Зигзагообразные элементы из листовой стали получают штамповкой. Температурный коэффициент сопротивления стали Э11 велик, поэтому она применяется только для пусковых резисторов. Стальные элементы резисторов, как правило, работают в трансформаторном масле.

Для реостатов, требующих сохранения постоянства сопротивления, может применяться константан, который свое наименование получил благодаря малому температурному коэффициенту сопротивления. Материал не подвергается коррозии при работе на воздухе и имеет максимальную рабочую температуру 500°C. Большое значение удельного сопротивления позволяет создать элементы малого габарита. Материал широко применяется в виде проволоки и ленты. Нихромы, обладая высоким ρ и высокой рабочей температурой, употребляются в основном для изготовления нагревательных резисторов, где удастся более полно использовать их рабочие характеристики.

В настоящее время для резисторов широко применяется более дешевый жаростойкий сплав 0Х23Ю5. Удельное сопротивление его более чем в 2 раза выше, чем у константана, а рабочая температура достигает 850°C.

в) Конструкция резисторов. Резисторы в виде свободной спирали из проволоки или ленты изготавливаются путем навивки проволоки или ленты на цилиндрической оправке «виток к витку». Необходимый зазор между витками получается при растяжении спирали в момент крепления ее к опорным изоляторам — роликам, изготовленным из фарфора. Такие элементы легко изготовить при наличии простейшего оборудования. Недостатком такой конструкции является малая жесткость, что заставляет снижать рабочую температуру материала (100°C для константановой спирали). Поскольку теплотемкость такого резистора определяется только массой резистивного материала, постоянная времени таких резисторов мала.

Свободную спираль целесообразно использовать для длительного режима работы, так как в отдаче тепла участвует полностью вся поверхность проволоки или ленты [удельный коэффициент теплоотдачи до 20 Вт/(м²·°C)].

Согласно [Л. 9-1] допустимый ток спирали из константана равен для круглого сечения $I = 3,21d\sqrt{d}$; для плоской ленты $I = 2,89h\sqrt{b}$.

Постоянные времени для этих спиралей согласно [Л. 9-1] равны: для круглого сечения $T = 44,5d$; для плоской ленты $T = 89b$. В формулах для тока I и постоянной времени T d — диаметр провода круглого сечения, мм; h — высота, мм; b — толщина для спиралей из тонкой ленты, мм.

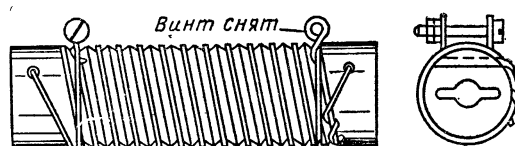


Рис. 9-12. Резистор на керамическом каркасе.

Для увеличения жесткости спирали проволока может наматываться на фарфоровый каркас в виде трубки (рис. 9-12). Спиральная канавка на поверхности предотвращает замыкание витков между собой. Такая конструкция позволяет повысить рабочую температуру резистора из константана до 500°C.

В процессе нагрева участвует не только проволока, но и сам каркас. Постоянная времени такого элемента равна:

$$T = \frac{\beta_k G_k + G_{пр}}{kS},$$

где G_k — масса каркаса;
 $G_{пр}$ — масса провода.

Коэффициент β_k учитывает, что в переходном режиме теплоемкость каркаса не используется полностью. Чем быстрее идет процесс нагрева во времени, тем меньше коэффициент β_k . В кратковременных режимах работы β_k падает до 0,3—0,4. За поверхность охлаждения резистора S принимается цилиндрическая поверхность каркаса без учета желобков. Коэффициент теплоотдачи $k = 21 \div 23$ Вт/(м²·°C). Даже при кратковременном режиме работы каркас более чем в 2 раза увеличивает постоянную нагрева за счет своей большой массы.

При диаметре провода, меньшем 0,3 мм, канавка на поверхности цилиндра не делается, изоляция между витками создается за счет окислы (пленки окислов), образующейся при нагреве проволоки. Для предохранения от механических повреждений провод сверху покрывается стеклотравой. Такие трубчатые резисторы марки ПЭ широко применяются для управления двигателями малой мощности, в качестве разрядных, экономических сопротивлений в цепях автоматики и др. Эти резисторы имеют максимальную мощность до 150 Вт, а их постоянная времени 200—300 с.

Ввиду технологических затруднений при изготовлении каркасов больших габаритов при больших мощностях эти резисторы не применяются.

Для пуска двигателей мощностью до 10 кВт широко применяются так называемые проволочные или ленточные поля (рис. 9-13), иногда именуемые рамочными элементами.

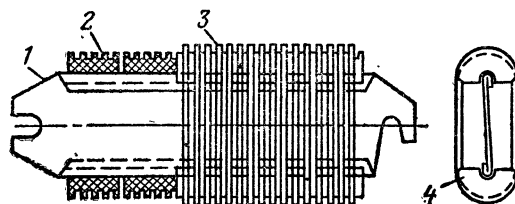


Рис. 9-13. Рамочный резистор.

На стальной пластине 1 укреплены изоляторы 2 из фарфора или стеатита. Проволока резистора 3 наматывается в канавки 4, расположенные на поверхности изоляторов. Для больших токов используется лента.

Коэффициент теплоотдачи, отнесенный к поверхности проволоки, составляет всего 10—14 Вт/(м²·°С), так что с точки зрения охлаждения такой резистор хуже, чем свободная спираль.

Масса изоляторов невелика, а с металлической пластиной проволока имеет плохой тепловой контакт. В результате постоянная времени такого резистора примерно такая же, как и без каркаса.

Максимальная допустимая температура равна 300°С. Рассеиваемая мощность резисторов этого типа доходит до 350 Вт. Обычно они komponуются по несколько штук в одном ящике. В качестве материала проволоки применяется константан.

Для мощностей двигателей от трех до нескольких тысяч киловатт применяются резисторы (рис. 9-14), использующие в качестве материала жаростойкие сплавы типа 0Х23Ю5.

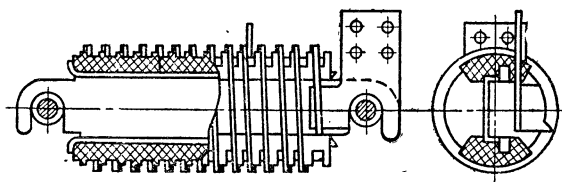


Рис. 9-14. Высокотемпературный резистор.

С целью уменьшения габаритов и получения необходимой жесткости жаростойкая лента наматывается на ребро. Так же, как и в предыдущей конструкции, изоляторы имеют канавки, фиксирующие положение отдельных витков. В каждом ящике устанавливается пять резисторов мощностью 450 Вт. При больших токах элементы

соединяются параллельно. Отпайки резисторов привариваются к спирали и при монтаже не могут переставляться.

Жаростойкие резисторы имеют малый температурный коэффициент сопротивления и большую механическую жесткость, благодаря чему находят самое широкое распространение в установках, подверженных тряске, вибрациям. Они обладают высокой термической устойчивостью, допуская кратковременный нагрев до 850°C . Длительная допустимая температура 300°C .

Чугунные резисторы, широко применяемые для двигателей мощностью от трех до нескольких тысяч киловатт, имеют форму зигзага и изготавливаются отливкой из электротехнического чугуна. Для больших токов резисторы изготавливаются в 2 раза большей толщины, чем при малых (рис. 9-15, а и б). Для соединения друг с другом резисторы на концах имеют уши (бобышки) с отверстиями для крепления.

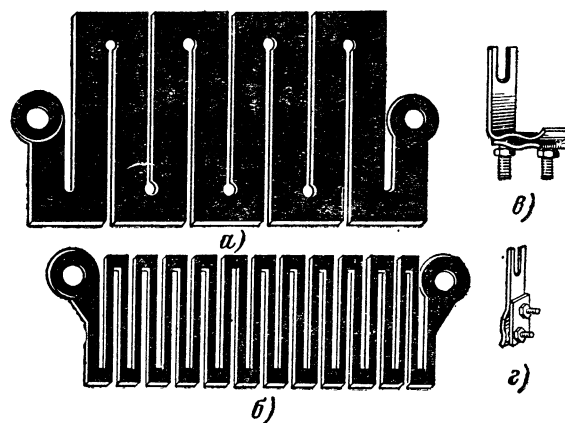


Рис. 9-15. Чугунные резисторы.

Максимальная рабочая температура равна 400°C . Однако нормальная мощность резисторов выбрана из расчета 300°C . Сопротивление чугунных резисторов в значительной степени зависит от температуры, поэтому они применяются как пусковые. Их собирают в ящики с помощью стальных стержней 2, изолированных от бобышек миканитом (рис. 9-16).

В месте последовательного соединения элементов прокладывается металлическая шайба. На противоположном конце между бобышками кладется слюдяная шайба. Отводы делаются с помощью специальных зажимов — башмаков (рис. 9-15, в, г), которые устанавливаются между бобышками соседних резисторов.

После сборки всех резисторов на стержень надевается стальная пружина, которая и затягивается гайкой. Наличие пружины позволяет создать необходимое нажатие между бобышками при рабочих температурах. Стержни укрепляются в стойках 1 с помощью проходных изоляторов. В ящиках резисторы комплектуются таким образом, чтобы общая мощность ящика не превосходила 4,5 кВт. Все

ящики резисторов ЯС имеют стандартные габариты. При монтаже реостатов ящики монтируются друг на друге. При этом воздух, нагретый в нижних ящиках, омывает верхние, ухудшая охлаждение последних. В связи с этим число ящиков, смонтированных друг на друге, не должно превышать трех. В том случае, когда вертикально монтируется более трех ящиков, зазор между ними должен быть не менее $80 \cdot 10^{-3}$ м.

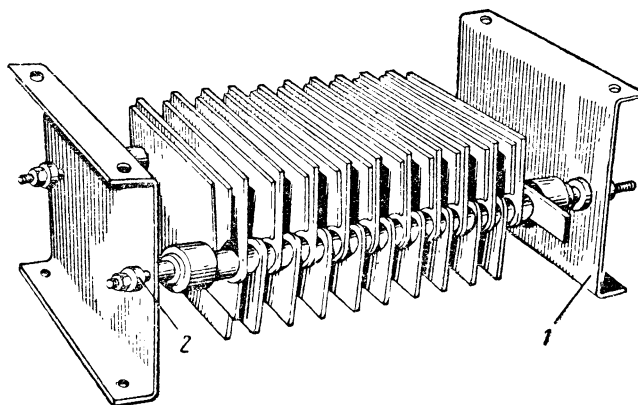


Рис. 9-16. Ящик чугунных резисторов.

Для ответственных электроприводов, требующих бесперебойной работы, целесообразно реостат собирать из стандартных ящиков (без отводов внутри ящика). При повреждении резистора в ящике работоспособность схемы быстро восстанавливается путем замены неисправного ящика на новый.

Поскольку температура воздуха вблизи резисторов высока, подвод тока к ящикам или башмакам необходимо производить либо голым проводом или шиной, либо применяя нагревостойкую изоляцию. В связи с малой механической прочностью в установках, подверженных ударам и вибрации, чугунные резисторы не применяются.

г) **Выбор резисторов и схемы их соединения.** Величина электрического сопротивления пускового резистора выбирается таким образом, чтобы в процессе пуска избежать больших толчков тока, опасных для двигателя и сети, и, с другой стороны, обеспечить разгон двигателя за требуемое время. Детально этот вопрос рассмотрен в [Л.9-2,9-3].

После расчета величины сопротивления производятся выбор и расчет резистора по нагреву. Температура резистора в любых режимах не должна превышать допустимой для данной конструкции.

В процессе пуска двигателя ток в резисторе меняется во времени. Если длительность обтекания резистора током мала по сравнению с его постоянной времени T , то расчет можно вести по эквивалентному току $I_{э.т}$, тепловой эффект которого за время работы таков же, как и реального тока (эквивалентный ток по теплу):

$$I_{э.т} = \sqrt{\frac{\int_0^{t_p} i^2 dt}{t_p}}, \quad (9-1)$$

где t_p — время прохождения тока через резистор. В этом случае теплоотдачей можно пренебречь. Температура нагрева от реального тока и тока, эквивалентного по теплу, будет одинакова.

Для определения тока, эквивалентного по теплу, можно воспользоваться реальной кривой тока, построить зависимость $i^2(t)$ и интегрирование провести графическим путем. Достаточно точный для практики результат можно получить, заменяя кривые спада тока отрезками прямых [Л.9-2].

Наряду с эквивалентным током по теплу $I_{э.т}$ существует эквивалентный ток по нагреву $I_{э.н}$ — ток, который, проходя по сопротивлению, нагревает его до той же температуры, что и реальный ток. При сделанном допущении $t_p \ll T$ эквивалентный ток по теплу равен эквивалентному току по нагреву:

$$I_{э.т} = I_{э.н}.$$

Зная $I_{э.т}$ и $I_{э.н}$ можно найти необходимый резистор, если в каталоге приведен ток кратковременного режима для заданного времени работы t_p .

Обычно в каталогах задан длительный допустимый ток нагрузки. В этом случае необходимо перейти к эквивалентному длительному току, который нагревает резистор до той же температуры, что и пусковой. Ниже приводится проверка резистора, предназначенного для пуска шунтового двигателя (пример взят из [Л. 9-2]). Пуск производится 1 раз в смену. Номинальный ток двигателя 120 А, относительный пиковый момент двигателя $M_1^D = 2$, момент переключения $M_2^D = 0,8$, пиковый ток $2I_n$, ток переключения $0,8I_n$. Первая ступень находится под током в течение $t_1 = 1,35$ с; вторая ступень $t_2 = 1,35 + 0,54 = 1,9$ с. Выбран резистор на длительный ток 33 А с постоянной времени $T = 250$ с. Поскольку t_1 и t_2 значительно меньше T , то эквивалентный ток по теплу $I_{э.т}$ равен эквивалент-

ному току по нагреву $I_{э.н.}$. Согласно [Л. 9-3] для первой ступени

$$I_{p1} = \sqrt{\frac{I_1^2 + I_2^2 + I_1 I_2}{3}} = I_{э.т} = I_{э.н.};$$

$$I_1 = 2I_n = 240\text{А}; I_2 = 0,8I_n = 96\text{А}; I_{p1} = 173,5\text{А}.$$

Так как пусковой резистор должен допускать трехкратный пуск, то для первой ступени

$$t_{p1} = 3t_1 = 3 \cdot 1,35 = 4,05\text{с}.$$

Воспользовавшись для кратковременного режима кривой на рис. 2-13 для $\frac{t_{p1}}{T} = \frac{4,05}{250} = 0,015$, находим эквивалентный длительный ток резистора

$$I_{э.дл} = 0,13I_{p1} = 22,6\text{А}.$$

Для второй ступени резистора

$$t_{p2} = 3t_2 = 3 \cdot 1,9 = 5,7\text{с}.$$

Поскольку пик тока и ток переключения такие же, как и для первой ступени, то $I_{p1} = I_{p2}$. Для данной ступени $(t_{p2}/T) = 0,023$. С помощью кривой на рис. 2-13 находим $I_{э.дл} = 26\text{А}$. Так как длительный ток резистора 33 А, то резистор проходит по нагреву.

Аналогичным путем ведется расчет для самого общего случая — перемежающегося режима (§ 2-5). Если время цикла $t_{p1} + t_{p2}$ мало по сравнению с постоянной времени T , то уравнение (9-1) можно упростить [Л. 9-3]:

$$I_{э.н} = I_{э.т} = \sqrt{\frac{I_{p1}^2 t_{p1} + I_{p2}^2 t_{p2}}{t_{p1} + t_{p2}}}. \quad (9-2)$$

Расчет по формуле (9-2) не требует знания постоянной времени T , более прост, чем расчет по формуле (9-1), и дает результат с запасом. Формула (9-2) может быть рекомендована для предварительных расчетов.

Для повторно-кратковременного режима работы $I_{p1} = I_p = \text{const}$, $I_{p2} = 0$. В этом случае согласно § 2-5 для любого значения t_p/T имеем:

$$I_{э.н} = I_p \sqrt{\frac{1 - e^{-t_p/T}}{1 - e^{-\frac{t_p}{T \cdot ПВ}}}}. \quad (9-3)$$

Если $t_p/T \ll 1$, то формула (9-3) может быть упрощена

$$I_{э.н} = I_p \sqrt{ПВ}. \quad (9-4)$$

Эквивалентный по теплу ток $I_{p.ц}$ за время цикла $t_p + t_n$ можно найти из равенства:

$$I_p^2 t_p = I_{p.ц}^2 (t_p + t_n);$$

$$I_{p.ц} = I_p \sqrt{\frac{t_p}{t_p + t_n}} = I_p \sqrt{\overline{ПВ}}. \quad (9-4a)$$

Из (9-4) и (9-4a) следует:

$$I_{э.н} = I_{p.ц}.$$

Таким образом, при сделанных допущениях эквивалентный по нагреву длительный ток равен току, эквивалентному по теплу за время одного цикла.

Тепловой расчет резисторов является громоздким и кропотливым делом, поэтому для типовых схем рекомендуется выбирать резисторы по специальным таблицам, в которых величины сопротивлений и их ток выражены в зависимости от параметров двигателя [Л.9-2].

При компоновке реостата резисторы и ящики должны возможно полнее использоваться по нагреву, так как это позволяет уменьшить габариты аппарата. Для полного использования резисторов при последовательном соединении все они должны иметь один и тот же длительный ток.

При составлении схем реостатов для крупных двигателей приходится прибегать к схеме параллельного соединения.

Если резисторы соединяются параллельно, то падения напряжения на всех резисторах одинаковы и для их полного использования необходимо, чтобы произведение длительно допустимого тока на сопротивление для всех резисторов было одинаковой величиной.

Если один из реостатов, например r_a , имеет меньшее значение $i_a r_a$, чем у остальных резисторов, то при номинальной нагрузке этого резистора все остальные резисторы будут недогружены по мощности.

9-5. Реостаты

а). Классификация реостатов и требования к ним.

В зависимости от назначения реостаты делятся на пусковые, пускорегулирующие, регулировочные, нагрузочные и реостаты возбуждения.

Пусковые реостаты и пусковая часть пускорегулирующего реостата для уменьшения габаритов должны иметь большую постоянную времени. Особые требования к стабильности сопротивления не предъявляются. Эти реостаты предназначены для работы в кратковременном режиме. Согласно существующим нормам пусковой реостат нагревается до предельной температуры после трехкратного пуска с интервалами времени между пусками, равными двойной длительности времени пуска.

Ко всем остальным реостатам предъявляются требования стабильности сопротивления. Они должны быть рассчитаны на работу в длительном режиме. В цепях электропривода наибольшее применение получили реостаты с металлическими резисторами. В качестве переключающих устройств используются плоские, барабанные и кулачковые контроллеры (при больших мощностях).

По виду охлаждения различают воздушные реостаты, масляные, с принудительным масляным или водяным охлаждением.

б) Конструкция реостатов с воздушным охлаждением. В реостатах с воздушным охлаждением переключающее устройство и элементы резисторов располагаются в воздухе так, чтобы обеспечить наилучшие условия охлаждения при малых габаритах. Конвективные потоки воздуха, перемещаясь снизу вверх, омывают резисторы. Кожухи, закрывающие реостат, не должны препятствовать циркуляции охлаждающего воздуха. Максимальная температура кожуха не должна превышать 160°C. Температура контактов переключающего устройства не должна подниматься выше 110°C.

В воздушных реостатах применяются резисторы всех типов. При небольшой мощности резисторы и контроллер сконпонованы в один аппарат. При больших мощностях контроллер выделяется в самостоятельный аппарат.

Для пуска двигателей постоянного тока с шунтовым или компаундным возбуждением при мощности до 42 кВт применяются реостаты серий РП и РЗП. В этих реостатах, помимо резисторов и контроллера, имеются: включающий контактор, который используется для нулевой защиты, и максимальное реле для защиты от перегрузок. В этих реостатах используются резисторы на фарфоровом каркасе и рамочные элементы. Переключающее устройство выполнено в виде плоского контроллера с самоустанавливающимся подвижным мостиковым контактом, имеющим вращательное движение. На гетинаксовой плите, кроме контроллера, располагается малогабаритный контактор КМ и максимальное реле мгновенного действия РМ. Узлы реостата смонтированы на стальном основании. Реостат закрыт кожухом, который защищает реостат от попадания капель воды, но не препятствует свободному потоку воздуха. Электрическая схема включения одного из типов реостата дана на рис. 9-17.

В нулевом положении подвижного контакта обмотка контактора *КМ* закорочена, контактор отключен и напряжение с двигателя снято. В третьем положении на катушку контактора подается

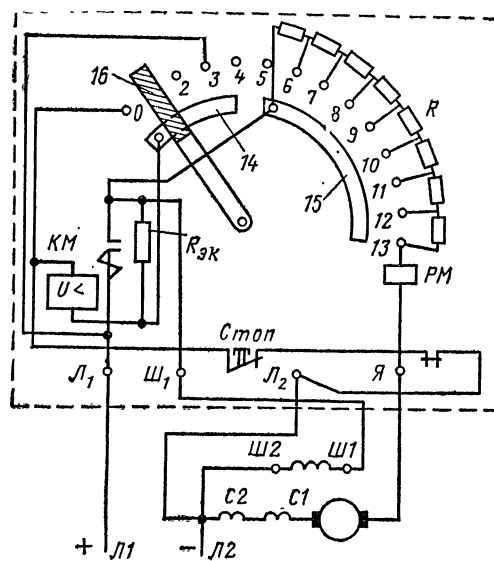


Рис. 9-17. Пусковой реостат с плоским контроллером.

полное напряжение, он срабатывает и замыкает свои контакты. При этом на обмотку возбуждения машины подается полное напряжение, а в цепь якоря включен полностью пусковой резистор. В последнем положении пусковое сопротивление полностью выведено.

В случае перегрузки двигателя срабатывает максимальное реле PM , которое разрывает цепь катушки KM . При этом контактор KM отключается и обесточивает двигатель. После отключения двигателя контакты PM снова замкнутся, однако контактор KM не включится, так как после отключения KM нижний вывод его катушки теряет питание. Для повторного пуска необходимо поставить подвижный контакт контроллера в нулевое положение или хотя бы во второе положение. Резистор $R_{эк}$ уменьшает мощность, потребляемую обмоткой, и повышает напряжения отпущения контактора.

При нормальном отключении двигателя подвижный контакт переводится в нулевое положение.

При снижении напряжения в сети якорь контактора отпадает и происходит отключение двигателя от источника. Таким образом осуществляется минимальная защита. Холостые контакты 1, 2, 4, 5 защищают контроллер от возникновения между контактами электрической дуги с большим током [Л. 9-1]. Схема реостата позволяет осуществлять дистанционное отключение двигателя. Кнопка *Стоп* с размыкающим контактом включается в цепь катушки контактора (так же, как контакт реле РМ).

Для выбора реостата необходимо знать мощность двигателя, условия пуска и вид нагрузки (запуск при полной или половинной мощности, вентиляторный характер нагрузки), напряжение питания двигателя.

Зная эти параметры, с помощью таблиц выбираем величину реостата и номера элементов резисторов.

Аналогичную конструкцию и схему имеют пускорегулирующие реостаты. После окончания пуска двигателя тот же подвижный контакт при дальнейшем вращении управляющей рукоятки изменяет сопротивление резистора в цепи возбуждения двигателя.

в) **Масляные реостаты.** В масляном реостате металлические элементы резисторов и контроллер располагаются в трансформаторном масле. По сравнению с воздухом масло обладает значительно большей удельной теплопроводностью и удельной теплоемкостью. Благодаря этому оно эффективно отбирает тепло от нагревающейся проволоки. Поскольку в процессе нагрева принимает участие большое количество масла, постоянная времени реостата резко возрастает, что позволяет создать пусковые реостаты малых габаритов на большую мощность двигателя.

Для предотвращения местных перегревов проволоки и улучшения теплового контакта проволоки с маслом в реостатах применяют элементы в виде свободной спирали, проволочные и ленточные поля, зигзагообразные элементы из электротехнической стали и чугуна.

Следует отметить, что при температурах ниже 0°C охлаждающая способность масла из-за повышения вязкости резко ухудшается. Поэтому масляные реостаты нельзя применять при отрицательной температуре окружающей среды.

Поверхность охлаждения масляного реостата определяется в основном цилиндрической поверхностью кожуха. Эта поверхность меньше поверхности охлаждения проволоки. Поэтому масляные реостаты нецелесообразно использовать для длительного режима. Малая допустимая температура нагрева масла также ограничивает мощность, которую может рассеять реостат.

После того как реостат произвел трехкратный пуск двигателя, необходимо, чтобы он снова охладился до температуры окружающей среды. Этот процесс длится около 1 ч. Поэтому масляные реостаты используются для редких пусков.

При нагреве масло разлагается и продукты разложения оседают на поверхности проволоки, ухудшая тепловой контакт металла с маслом. Поэтому максимальная температура масла не должна быть выше 115°C.

Контакты переключающего контроллера также находятся в масле. Наличие масла резко уменьшает коэффициент трения между контактами. При этом уменьшается износ контактов, уменьшается момент на рукоятке управления.

Малые силы трения позволяют увеличить нажатие контактов и в 3—4 раза увеличить токовую нагрузку контакта. Это дает воз-

возможность резко снизить габариты переключающего устройства и всего реостата в целом.

Наличие масла улучшает условия гашения дуги между контактами, если реостат должен окончательно разрывать цепь или вводить сопротивление. Однако масло играет и отрицательную роль в работе контактов при длительном режиме. Продукты разложения масла, оседая на поверхности контактов, увеличивают переходное сопротивление и, следовательно, температуры самих контактов. В результате процесс разложения масла будет идти более интенсивно. Контакты рассчитываются так, чтобы температура их не превышала 125°C.

Масляные реостаты широко применяются для пуска в ход трехфазных асинхронных двигателей с фазным ротором. При мощностях двигателей до 50 кВт используются плоские контроллеры с круговым движением подвижного контакта (рис. 9-17).

При больших мощностях применяется барабанный контроллер.

По требованию заказчика реостаты могут иметь блок-контакты для сигнализации о положении контактов аппарата и блокировки с линейным контактором в цепи статора двигателя. Если реостат не стоит на нулевой позиции (когда в роторе включено максимальное сопротивление), цепь включающего электромагнита линейного контактора разомкнута и напряжение на двигатель не может быть подано.

В конце пуска двигателя реостат должен быть полностью выведен, а ротор закорочен, так как элементы рассчитаны на кратковременный режим работы. Чем больше мощность двигателя, тем большее число ступеней имеет реостат, так как двигатели большой мощности разгоняются медленно.

Для выбора реостата необходимо иметь следующие данные: мощность двигателя P_n ; напряжение U_p на заторможенном роторе при номинальном напряжении на статоре; номинальный ток ротора $I_{н.р}$; условия пуска (при полной мощности или при половинной).

Знание этих параметров позволяет однозначно выбрать реостат с помощью данных, приведенных в каталогах [Л. 9-2].

Недостатками масляного реостата являются малая допустимая частота пусков из-за медленного охлаждения, загрязнение помещения, возможность воспламенения масла. Масляные реостаты рекомендуются применять во взрывобезопасных помещениях для редкого пуска двигателей (не более 2—3 пусков час).

г) **Жидкостные реостаты.** Для регулирования угловой скорости двигателей мощностью несколько тысяч киловатт необходимы реостаты с элементами и переключающим устройством, рассчитанными на большую, длительно рассеиваемую мощность (порядка 500—600 кВт).

Металлические реостаты с воздушным охлаждением получают очень громоздкими. Усложняется вопрос отвода тепла, выделяющегося в элементах. Для переключения резисторов приходится использовать сложную систему управления с применением мощных контакторов.

При мощностях более 3000 кВт целесообразен переход на жидкостные реостаты. В этом случае резистивным материалом служит раствор электролита. Сопротивление такого реостата может изменяться либо за счет расстояния между электродами, погруженными в электролит, либо за счет изменения площади электродов.

Удельное сопротивление электролита зависит от температуры. Поэтому для стабилизации сопротивления реостата необходимо, чтобы рабочая температура электролита мало менялась.

Тепло, выделяющееся в электролите, отводится с помощью специальных радиаторов-труб, по которым протекает охлаждающая вода.

Глава десятая

КОНТАКТОРЫ

10-1. Общие сведения

Контактор — это двухпозиционный аппарат, предназначенный для частых коммутаций токов, которые не превышают токов перегрузки соответствующих электрических силовых цепей. Замыкание или размыкание контактов контактора может осуществляться двигателем (электромагнитным, пневматическим или гидравлическим) приводом. Наибольшее распространение получили электромагнитные контакторы.

Контакторы постоянного тока коммутируют цепь постоянного тока и имеют, как правило, электромагнит также постоянного тока.

Контакторы переменного тока коммутируют цепь переменного тока. Электромагнит этих контакторов может быть выполнен либо для работы на переменном токе, либо для работы на постоянном токе. В связи с повышением производительности труда в настоящее время схемы электрического привода требуют до 1200 и более включений в час. Этот режим работы является наиболее тяжелым. При каждом включении и отключении происходит износ контактов (§ 3-2). Поэтому принимаются меры к сокращению длительности горения дуги при отключении и к устранению вибрации при включении. Большая частота операций требует высокой механической стойкости электромагнитного механизма контактора. Способность аппарата обеспечить работу при большом числе операций характеризуется износостойкостью. Различают механическую и коммутационную износостойкость.

Механическая износостойкость определяется числом включений — отключений контактора без ремонта и замены его узлов и деталей. Ток в цепи при

этом равен нулю. К современным контакторам предъявляется очень высокое требование к механической износостойкости $(10—20) \cdot 10^6$ операций.

Коммутационная износостойкость определяется числом включений и отключений цепи с током, после которого требуется замена износившихся контактов. Современные контакторы должны иметь коммутационную износостойкость порядка 2—3 млн. операций. Эти требования очень высоки (часть выпускаемых в настоящее время контакторов имеет коммутационную износостойкость $1 \cdot 10^6$ операций и менее).

Наряду с высокой механической и коммутационной износостойкостью контакторы должны иметь малую массу и размеры. Зона выхлопа раскаленных газов дуги должна быть возможно малой, что позволяет сократить размеры всей установки в целом. Детали, наиболее быстро подвергающиеся износу, должны быть легко доступны для замены. Общие технические требования к контакторам изложены в ГОСТ 11206-70.

Контактор имеет следующие основные узлы: контактную систему, дугогасительную систему, электромагнитный механизм, систему блок-контактов.

При подаче напряжения на обмотку электромагнита якорь притягивается. Подвижный контакт, связанный с якорем, производит замыкание или размыкание главной цепи. Дугогасительная система обеспечивает быстрое гашение дуги, благодаря чему достигается малый износ контактов. Кроме главных контактов, контактор имеет несколько вспомогательных слаботочных контактов (блок-контактов) для согласования работы контактора с другими аппаратами или для включения в цепь управления самого контактора.

Основные данные контакторов и пускателей: номинальный ток главных контактов, предельный отключаемый ток, номинальное напряжение, механическая износостойкость, электрическая износостойкость, допустимое число включений в час, собственное время включения, собственное время отключения.

В зависимости от условий работы ГОСТ 11206-70 регламентирует категории A_1, A_2, A_3, A_4 для контакторов переменного тока и D_1, D_2, D_3 для контакторов постоянного тока. Категории A_1 и D_1 соответствуют режиму работы в малондуктивных цепях. Категории A_2, A_3 и D_2 относятся к пуску и остановке двигателей переменного

($I_{\text{пуска}}$ до $6 I_{\text{н}}$) и постоянного ($I_{\text{пуска}}$ до $2,5 I_{\text{н}}$) тока. Наиболее тяжелые режимы предусмотрены для категорий A_4 и D_3 . В этом случае контактор может отключать за-
торможенный двигатель (см. § 10-4).

10-2. Устройство контактора с управлением от сети постоянного тока

а) Коммутирующее устройство. Контакты аппарата подвержены наиболее сильному электрическому и механическому износу ввиду большого числа операций в час и тяжелым условиям работы. С целью уменьшения износа преимущественное распространение получили линейные перекатывающиеся контакты. Принцип их работы рассмотрен в § 3-4.

Для предотвращения вибраций контактов контактная пружина создает предварительное нажатие, равное примерно половине конечной силы нажатия. Большое влияние на вибрацию оказывает жесткость крепления неподвижного контакта и стойкость к вибрациям всего контактора в целом. В этом отношении очень удачна конструкция контактора серии КПВ-600 (рис. 10-1). Неподвижный контакт 1 жестко прикреплен к скобе 2. Один конец дугогасительной катушки 3 присоединен к этой же скобе. Второй конец катушки вместе с выводом 4 надежно скреплен с изоляционным основанием из пластмассы 5. Последнее крепится к прочной стальной скобе 6, которая является основанием аппарата. Подвижный контакт 7 выполнен в виде толстой пластины. Нижний конец пластины имеет возможность поворачиваться относительно точки опоры 8. Благодаря этому пластина может перека-
тываться по сухарю неподвижного контакта 1. Вывод 9 соединяется с подвижным контактом 7 с помощью гибкого проводника (связи) 10. Контактное нажатие создается пружиной 12.

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

Для уменьшения оплавления основных контактов дугой при токах более 50 А контактор имеет дугогасительные контакты — рога 2, 11. Под действием магнитного поля дугогасительного устройства опорные точки дуги быстро перемещаются на скобу 2, соединенную с неподвижным контактом 1, и на защитный рог подвижного

контакта 11. Возврат якоря в начальное положение (после отключения магнита) производится пружиной 13.

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

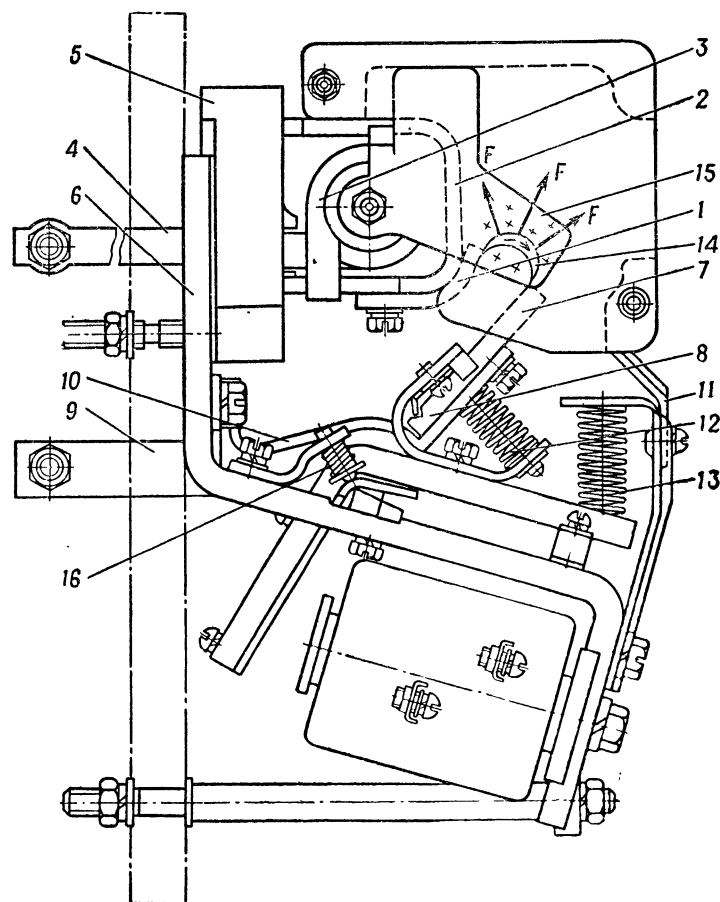


Рис. 10-1. Контактёр постоянного тока серии КПВ-600.

Так, контактор II величины имеет ток 100 А, III — 150 А.

Характерной особенностью контакторов КПВ-600 и многих других типов является электрическое соединение вывода подвижного контакта с корпусом контактора. Во включенном положении контактора магнитопровод находится под напряжением. Даже в отключенном положе-

нии напряжение может оставаться на магнитопроводе и других деталях. Соприкосновение с магнитопроводом поэтому опасно для жизни.

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

Номинальным током контактора называется ток прерывисто-продолжительного режима работы. При этом режиме работы контактор находится во включенном состоянии не более 8 ч. По истечении этого промежутка аппарат должен быть несколько раз включен и отключен (для зачистки контактов от окиси меди). После этого аппарат снова включается.

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

В продолжительном режиме работы, когда длительность непрерывного включения превышает 8 ч, допустимый ток контактора снижается примерно на 20%. В таком режиме из-за окисления медных контактов растет переходное сопротивление, что может привести к повышению температуры выше допустимой величины (§ 3-2). Если контактор имеет небольшое число включений или вообще предназначен для длительного включения, то на рабочую поверхность контактов наплавляется серебряная пластина. Серебряная облицовка позволяет сохранить допустимый ток контактора, равный номинальному, и в режиме продолжительного включения. Если контактор наряду с режимом продолжительного включения используется в режиме повторно-кратковременного включения, применение серебряных накладок становится нецелесообразным, так как из-за малой механической прочности серебра происходит быстрый износ контактов.

В повторно-кратковременном режиме при ПВ=40% допустимый ток, как правило, составляет примерно 120% номинального значения. Согласно рекомендациям завода допустимый ток повторно-кратковременного режима для контактора КПВ-600 определяется по формуле

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

где n — число включений в час.

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

Как правило, контактная система имеет один полюс.

Для реверса асинхронных двигателей при большой частоте включений в час (до 1200) применяется вдвоенная контактная система. В этих контакторах типа КТПВ-500, имеющих электромагнит постоянного тока, подвижные контакты изолированы от корпуса, что делает более безопасным обслуживание аппарата. На рис. 10-2 показана схема включения контакторов для реверса асинхронных двигателей. По сравнению со схемой, имеющей однополюсные контакторы, схема рис. 10-2 имеет большое преимущество. При неполадках и отказе одного контактора подается напряжение только на один зажим двигателя. В схеме с однополюсными контакторами отказ одного контактора ведет к возникновению тяжелого режима двухфазного питания двигателя.

Контакторы с двухполюсной контактной системой очень удобно использовать для закорачивания сопротивлений в цепи ротора асинхронного двигателя.

В контакторах типа КМВ-521 применяется также двухполюсная система. Эти контакторы предназначены для включения и отключения мощных электромагнитов приводов постоянного тока масляных выключателей. Наличие двухполюсной контактной системы, включенной в оба провода сети постоянного тока, обеспечивает надежное отключение индуктивной нагрузки.

б) Дугогасительное устройство. В контакторах постоянного тока наибольшее распространение получили

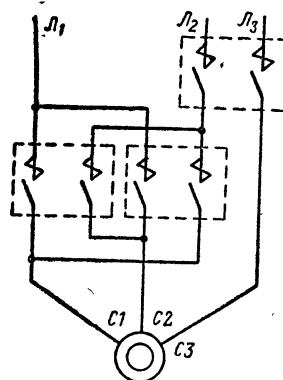


Рис. 10-2. Схема включения главных контактов контактора КТПВ-500 для реверса асинхронного двигателя.

устройства с электромагнитным дутьем. Как указывалось в § 4-3, при взаимодействии магнитного поля с дугой возникает электродинамическая сила, перемещающая дугу с большой скоростью. Для улучшения охлаждения дуги ее загоняют в щель из дугостойкого материала с высокой теплопроводностью. При расхождении контактов 1 и 7 между ними возникает дуга 14 (см. рис. 10-1). Дугу можно рассматривать как проводник с током. Катушка 3 создает м. д. с., под действием которой

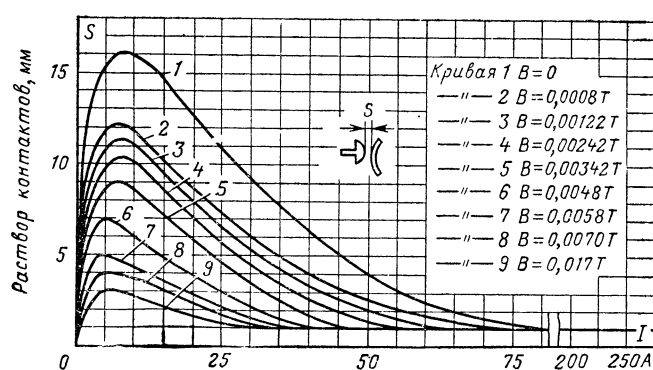


Рис. 10-3. Зависимость раствора контактов, обеспечивающего гашение дуги, от величины отключаемого тока.

возникает поток. Этот поток проходит через сердечник катушки, полюсные наконечники 15 и воздушный зазор, в котором горит дуга. На рис. 10-1 крестиками показано направление магнитного потока между полюсами системы, направленного за плоскость чертежа.

В соответствии с рис. 4-4, чем больше отключаемый ток, тем выше идет прямая $U-iR$. Для обеспечения условий гашения дуги необходимо с ростом тока поднимать вольт-амперную характеристику дуги. Это достигается удлинением дуги либо за счет электродинамических сил, либо за счет механического растяжения дуги.

Вопрос гашения дуги постоянного тока в контакторах был подробно исследован О. Б. Броном [Л.3-3].

На рис. 10-3 изображена зависимость раствора контактов, при котором происходит гашение дуги, от тока и магнитной индукции, полученная О. Б. Броном на макете контактора. При всех значениях индукции B кривые имеют один и тот же характер: при токе 5—7 А кривая

достигает максимума, после чего с ростом тока необходимый раствор падает и при токе 200 А все кривые сливаются. Такой ход кривых объясняется следующими явлениями. Электродинамическая сила, действующая на единицу длины дуги, равна:

$$F_0 = BI, \quad (10-1)$$

где I — ток; B — индукция магнитного поля.

Рассмотрим случай, когда $B=0$ (кривая 1). При малом значении тока в дуге электродинамическая сила получается столь незначительной, что она не оказывает никакого влияния на процесс гашения. Условия, необходимые для гашения, создаются за счет механического растяжения дуги подвижным контактом. При этом гашение дуги с ростом тока наступает при большей ее длине.

При токе более 7 А на дугу действует электродинамическая сила, возникающая как за счет магнитного поля подводных проводников, так и за счет конфигурации самой дуги (грубо можно представить, что дуга имеет форму части окружности). Эти силы являются решающими для гашения дуги. Чем больше ток в цепи, тем больше электродинамическая сила, растягивающая дугу. В результате при токе 200 А для гашения дуги достаточно иметь раствор контактов около $1,5 \cdot 10^{-3}$ м. Фактически при таком токе, как только контакты разойдутся, возникающие электродинамические силы выталкивают дугу из межконтактного зазора и перемещают со скоростью несколько десятков метров в секунду. При этом длина дуги, при которой она гаснет, достигает 0,10 м и более.

Наличие внешнего магнитного поля способствует резкому сокращению раствора контактов в области малых токов и незначительно сказывается на процессе гашения при токах 100 А и выше. Наиболее оптимальной магнитной индукцией является $B=0,0069$ Т. Дальнейшее увеличение индукции мало влияет на процессе гашения, но требует большей мощности для создания магнитного поля и связано с увеличением затрат меди на катушку.

Кривые зависимости длительности горения дуги от тока изображены на рис. 10-4 (кривые 1—3). По своей форме они похожи на кривые на рис. 10-3.

В области малых токов с ростом тока увеличивается необходимый для гашения раствор контактов. При заданной скорости их движения требуется и большее время

для достижения необходимого раствора. В области больших токов процесс гашения определяется электродинамическими силами. Чем больше ток, тем больше скорость растяжения дуги динамическими силами, тем меньше время, необходимое для достижения дугой критической длины.

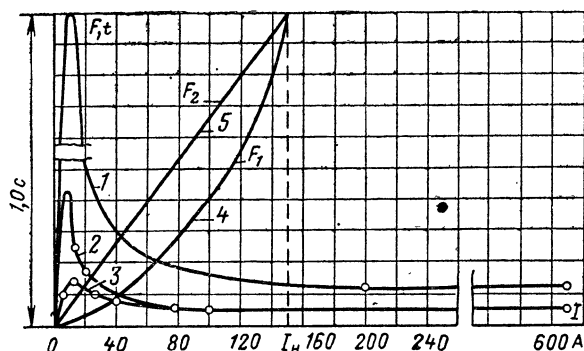


Рис. 10-4. Зависимость времени дуги и силы, действующей на дугу, от величины отключаемого тока.

Хотя при токах выше 100 А применение магнитного дутья кажется излишним (рис. 10-3 и 10-4), во всех контакторах на токи 100 А и выше такая система обязательно применяется. Дело в том, что наличие внешнего магнитного поля способствует быстрому перемещению опорных точек дуги на контактах, перегоняя ее на дугогасительные электроды — рога и тем самым уменьшая оплавление контактов. Как показали исследования [Л.3-3], для каждого значения тока имеется свое оптимальное значение поля. При напряженности, большей оптимальной, наступает усиленный износ контактов за счет того, что жидкометаллический контактный мостик, образующийся в стадии размыкания контактов, уносится и расплывается сильным магнитным полем.

Величина напряжения отключаемой цепи утяжеляет процесс гашения дуги только в области малых токов до 30 А. В области с токами выше 100 А, когда решающую роль играют электродинамические силы, величина питающего напряжения практически не влияет на раствор контактов. Раствор контактов обычно берется (10—

17) 10^{-3} м и определяется условиями гашения малого тока.

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

В зависимости от способа создания магнитного поля различают системы с последовательным включением катушки магнитного дутья (катушка тока), с параллельным включением катушки (катушка напряжения) и системы с постоянным магнитом.

В случае применения катушки тока она обтекается током, проходящим в отключаемой цепи. Если пренебречь магнитным сопротивлением стали, то можно считать, что индукция пропорциональна отключаемому току. Тогда (10-1) можно преобразовать к виду

$$F_1 = k_1 I^2. \quad (10-2)$$

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

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

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

Для надежного и быстрого гашения дуги в области малых токов применяются контакторы на небольшой ток (блок-контакторы) со сменными катушками магнитного

дутья. Эти катушки имеют номинальный ток 1,5—40 А. При малом отключаемом токе устанавливается катушка, имеющая большое число витков, благодаря чему создается необходимое магнитное поле для гашения дуги за малое время.

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

Достоинствами системы с катушкой тока являются:

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

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

3. Поскольку через катушку проходит номинальный ток контактора, она выполняется из провода большого сечения. Такая катушка механически прочна и не боится ударов, возникающих при работе контактора. Падение напряжения на катушке составляет доли вольта. Поэтому к изоляции катушки не предъявляются высокие требования.

Наряду с достоинствами эта система имеет и ряд недостатков:

плохое гашение дуги при малых токах (5—7 А), большая затрата меди на катушку, нагрев контактов за счет тепла, выделяемого дугогасительной катушкой.

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

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

Сила, действующая на дугу согласно (10-1), пропорциональна отключаемому току

$$F_2 = k_2 I.$$

На рис. 10-4 изображена эта зависимость (кривая 5) для случая, когда м. д. с. катушки тока при номинальном токе равна м. д. с. катушки напряжения. При токах от 0 до I_n сила, действующая на дугу, при катушке напряжения получается большей, чем при катушке тока, — прямая 5 идет выше параболы 4. Это позволяет резко снизить длительность горения дуги в области малых токов. При токах, больших I_n , сила действующая на дугу, при катушке тока больше, чем при катушке напряжения. Однако для гашения это не имеет существенного значения, так как решающими являются силы, возникающие в самом контуре дуги.

Зависимость времени гашения дуги от тока для системы с катушкой напряжения приведена на рис. 10-4 (кривая 3).

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

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

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

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

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

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

По сравнению с системами, где поле создается обмотками, постоянный магнит имеет ряд преимуществ:

нет затраты энергии на создание магнитного поля; резко сокращается расход меди на контактор; отсутствует подогрев контактов от катушки, как это имеет место в системе с катушкой тока; по сравнению с системой с катушкой напряжения система с постоянным магнитом обладает высокой надежностью и хорошо работает при любых токах.

Согласно [Л.3-3] применение постоянного магнита позволяет сократить длительность горения дуги при малых токах. В силу своих преимуществ эта система, очевидно, в дальнейшем будет широко использоваться.

Магнитное поле, действующее на дугу, создает силу, которая перемещает дугу в дугогасительную камеру. Назначение камеры — локализовать область, занятую раскаленными газами дуги, препятствовать перекрытию между соседними полюсами. При соприкосновении дуги со стенками камеры происходит интенсивное охлаждение дуги, что приводит к подъему вольт-амперной характеристики и успешному гашению. Исследования О. Б. Брона [Л. 3-3] показали, что в качестве материала необходимо применять дугостойкую керамику.

Наиболее совершенной является лабиринтно-щелевая камера. Под действием магнитного поля дуга загоняется в суживающуюся зигзагообразную щель (рис. 10-5, б). Благодаря увеличению длины дуги и хорошему тепловому контакту дуги со стенками камеры происходит ее эффективное гашение. По сравнению с обычной продольной щелью (рис. 10-5, а) зигзагообразная щель уменьшает количество выброшенных из камеры раскаленных газов и, следовательно, зону выхлопа.

в) **Электромагнитная система.** В контакторах с приводом на постоянном токе преимущественное распространение получили электромагниты клапанного типа.

С целью повышения механической износостойкости в современных контакторах применяется вращение якоря на призме. Выбранная компоновка электромагнита и контактной системы (рис. 10-1), применение специальной пружины 16, прижимающей якорь к призме, позволяют повысить износостойкость узла вращения у контакторов КПВ-600 до $20 \cdot 10^6$ [Л.10-1]. По мере износа призматического узла зазор между скобой якоря и опорной

призмой автоматически выбирается. В случае же применения подшипникового соединения якоря и магнитопровода при износе подшипника возникают люфты, нарушающие нормальную работу аппарата.

Для получения вибро- и ударостойкости подвижная система контактора должна быть уравновешена относительно оси вращения. Типичным примером является элек-

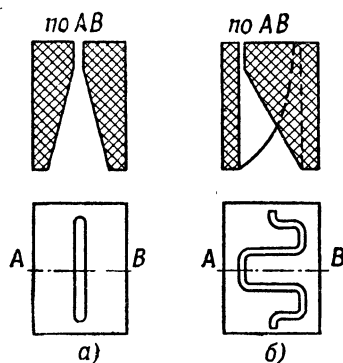


Рис. 10-5. Дугогасительные камеры контакторов постоянного тока.

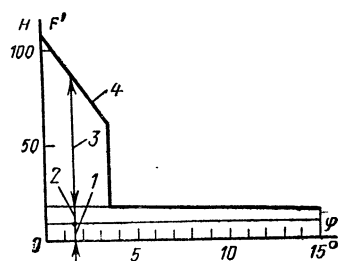


Рис. 10-6. Противодействующая характеристика для контактора рис. 10-1.

тромагнит контактора серии КПВ-600 (рис. 10-1). Якорь магнита уравнивается хвостом, на котором укрепляется подвижный контакт. Возвратная пружина также действует на хвост якоря. Катушка электромагнита наматывается на тонкостенную изолированную стальную гильзу. Такая конструкция катушки обеспечивает хорошую прочность и улучшает тепловой контакт катушки с сердечником. Последнее способствует снижению температуры катушки и уменьшению габарита контактора.

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

Характеристика противодействующих сил, приведенных к якору электромагнита для контактора (рис. 10-1), приведена на рис. 10-6 (кривая 4). Отрезки ординаты этой кривой представляют соответственно: 1 — силу тяжести, 2 — силу возвратной пружины, 3 — силу контактной пружины.

Наиболее тяжелым моментом при включении является преодоление силы в момент касания главных контактов, так как электромагнит должен развивать значительное усилие при большом рабочем зазоре. Важным параметром механизма является коэффициент возврата $k_v = U_{отн}/U_{ср}$ (§ 11-2). Для контакторов постоянного тока k_v , как правило, мал (0,2—0,3), что не позволяет использовать контактор для защиты двигателя от снижения напряжения.

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

В контакторах типа КТПВ, имеющих сдвоенную контактную систему, при номинальном токе 600 А устанавливаются два параллельно работающих электромагнита для того, чтобы развить необходимую силу.

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

Собственное время включения состоит из времени нарастания потока до значения потока трогания и времени движения якоря. Большая часть времени тратится на нарастание потока. Для контакторов на ток 100 А собственное время составляет 0,14 с, а для контакторов на ток 630 А оно увеличивается до 0,37 с.

Собственное время отключения — время с момента обесточивания электромагнита до момента размыкания контактов. Оно определяется временем спада потока от установившегося значения до потока отпущения. (Временем движения с момента начала движения якоря до момента размыкания контактов можно пренебречь.) Переходный процесс в обмотке мало сказыв-

вадается на спаде потока, так как цепь обмотки быстро разрывается отключающим аппаратом. Этот процесс в основном определяется токами, циркулирующими в массивных элементах магнитной цепи (в основном за счет токов в цилиндрическом сердечнике, на котором сидит катушка). Ввиду большого удельного электрического сопротивления стали эти точки создают небольшое замедление в спадании потока. В контакторах на 100 А собственное время отключения составляет 0,07 с, а в контакторах 630 А — 0,23 с. В связи с особыми требованиями, предъявляемыми к контакторам серии КМВ, которые предназначены для включения и отключения электромагнитов приводов масляных выключателей, электромагнитный механизм у этих контакторов допускает регулировку напряжения срабатывания и напряжения отпущения за счет регулирования силы возвратной пружины и специальной отрывной пружины. Контактторы типа КМВ должны работать при глубокой посадке напряжения. Поэтому минимальное напряжение срабатывания у этих контакторов может спускаться до 65% U_n . Такое низкое напряжение срабатывания приводит к тому, что при номинальном напряжении через обмотку протекает ток, приводящий к ее повышенному нагреву. В связи с этим при номинальном напряжении обмотка может включаться под напряжение только кратковременно (время включения не должно превышать 15 с).

Схема включения электромагнита контактора для пуска двигателя аналогична схеме пускателя — рис. 10-14.

10-3. Контактторы переменного тока

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

На рис. 10-7, а представлен разрез контактора КТ-6000 по магнитной системе, а на 10-7, б — по контактной и дугогасительной системам одного полюса. Подвижный контакт 1 с пружиной 2 укреплен на изоляционном рычаге 3, связанном с валом контактора. Вследствие более

легкого гашения дуги переменного тока раствор контактов может быть взят небольшим. Уменьшение раствора дает возможность приблизить контакт к оси вращения. Малое расстояние точки касания контактов от оси вращения позволяет уменьшить силу электромагнита, необходимую для включения контактора, что дает возможность уменьшить габариты и потребляемую мощность магнита.

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

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

Магнитная и контактная системы контактора КТ-6000 укреплены на стальной рейке 5, что позволяет использовать их в реечной конструкции комплектных станций управления (гл. 25).

Широкое распространение получила мостиковая контактная система с двумя разрывами

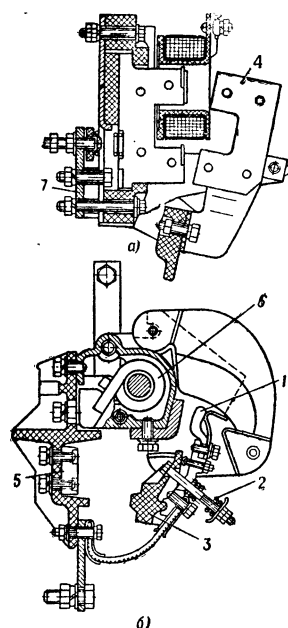


Рис. 10-7. Контактор переменного тока серии КТ-6000.

на каждый полюс (рис. 10-8). Такая конструкция распространена в пускателях. Быстрое гашение дуги, отсутствие гибкой связи являются большим преимуществом такой конструкции.

Применяется как прямоходовая система (рис. 10-13), так и с вращением якоря (рис. 10-8). В первом случае якорь движется поступательно. Подвижные контакты связаны с якорем и совершают тот же путь, что и якорь. При

передаче усилия контактных пружин к якорю из-за отсутствия рычажной системы нет выигрыша в силе. Электромагнит должен развивать усилие большее, чем сумма сил контактных пружин и веса якоря (в контакторах с вертикальной установкой).

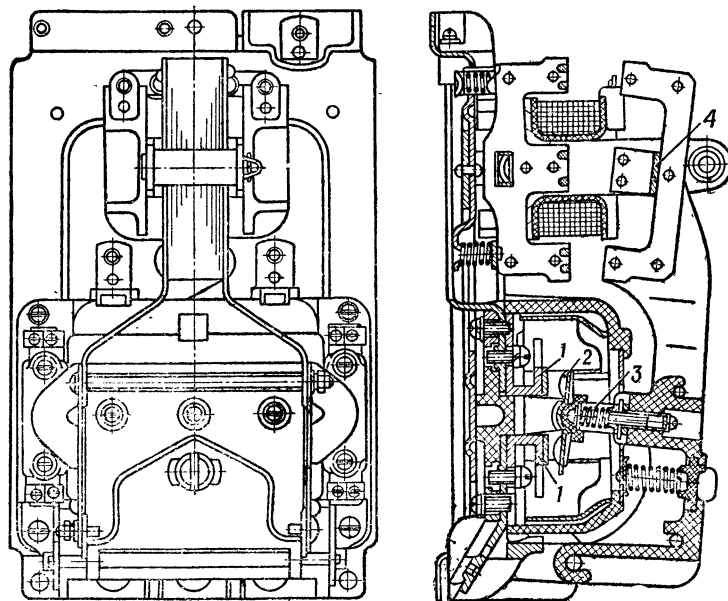


Рис. 10-8. Контактор пускателя серии ПА.

В большинстве выполненных по этой схеме контакторов наблюдается медленное нарастание силы контактного нажатия, из-за чего имеет место длительная вибрация контактов (до 10 мс). В результате происходит сильный износ контактов при включении. Поэтому такая конструкция применяется только при небольших номинальных токах. Более совершенным является контактор, который имеет мостиковую систему и рычажную передачу усилий от контактов к якорю электромагнита [Л.10-2]. Разрез такого контактора на ток 60 А показан на рис. 10-8. Каждый полюс имеет два неподвижных контакта 1 и один мостиковый контакт 2. Места касания контактов облицованы металлокерамическим материа-

лом (серебро — окись кадмия). Нажатие контактов создается пружиной 3. Контактный мост имеет малую массу и выполнен самоустанавливающимся.

Расстояние от оси вращения до места расположения контактов в 2,5 раза меньше, чем расстояние от оси вращения до точки крепления якоря 4. Такая кинематика позволяет увеличить силу нажатия при данных габаритах электромагнита. Близкое расположение контактов к оси вращения снижает скорость движения контактов. Малая

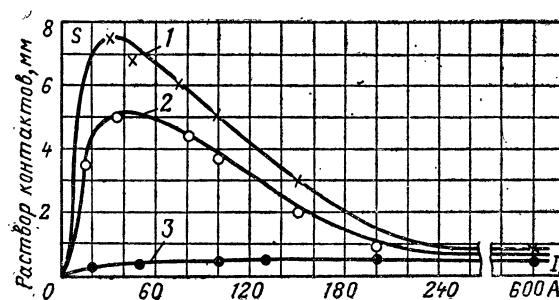


Рис. 10-9. Зависимость раствора контактов, обеспечивающего гашение дуги, от величины тока при различных условиях.

масса моста, низкая скорость в момент касания, большая сила нажатия способствуют резкому снижению вибрации (она длится всего 0,3 мс). При этом коммутационная износостойкость возрастает до $2 \cdot 10^6$ операций включения и отключения.

В высокочастотных контакторах (500—10 000 Гц) существенно возрастают потери в токоведущих частях из-за эффекта близости и поверхностного эффекта. Для эффективного отвода тепла целесообразно использование водяного охлаждения [Л.2-6, 3-4].

б) Гашение дуги в контакторах переменного тока. Особенности процесса гашения дуги переменного тока рассмотрены в гл. 4.

Вопрос гашения дуги переменного тока в низковольтных аппаратах подробно изучен О. Б. Броном [Л. 3-3].

На рис. 10-9 изображены экспериментальные зависимости раствора контактов, необходимого для гашения дуги, от величины тока цепи. Коэффициент мощности цепи

$\cos \varphi$ меняется в пределах от 0,2 до 1. Контактёр имеет один разрыв на полюс и не снабжен никаким дугогасительным устройством.

В случае активной нагрузки ($\cos \varphi = 1$) гашение дуги происходит при разрыве контактов примерно $0,5 \cdot 10^{-3}$ м при любом токе и любом напряжении (до 500 В), кривая 3 рис. 10-9.

При индуктивной нагрузке ($\cos \varphi = 0,2 \div 0,5$) такое же гашение имеет место при напряжении до 220 В. Это объясняется тем, что гашение дуги происходит за счет практически мгновенного восстановления электрической прочности 200—220 В около катода (см. § 4-8).

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

Если в цепи полюса аппарата создавать два разрыва, например, за счет применения мостикового контакта, то дуга надежно гасится за счет околоэлектродной прочности при напряжении сети 380 В. На основании этих данных в настоящее время широко применяются контакторы с двукратным разрывом цепи в одном полюсе. При индуктивной нагрузке ($\cos \varphi = 0,2 \div 0,5$) и напряжении источника свыше 380 В величина восстанавливающегося напряжения становится больше околокатодной прочности. Кривые 1 и 2 сняты при $\cos \varphi = 0,2 \div 0,5$ и напряжениях источника 500 и 380 В. Гашение дуги в этом случае зависит от процессов в столбе дуги и нагрева электродов током [Л. 4-5].

Кривые 1 и 2 рис. 10-9 аналогичны кривым рис. 10-3, полученным для постоянного тока. В области до 40—50 А гашение происходит за счет механического растяжения дуги. Максимальный раствор, требуемый для гашения, составляет $7 \cdot 10^{-3}$ м. При токах более 50 А необходимый раствор уменьшается. Гашение происходит за счет действия на дугу электродинамических сил. При токе более 200 А гашение происходит при разрыве менее 10^{-3} м. Таким образом, наиболее тяжелой для гашения является величина тока 40—50 А. Исследования показали, что увеличение раствора сверх $8 \cdot 10^{-3}$ м не влияет на процесс гашения дуги.

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

1. Магнитное гашение дуги с помощью катушки тока

и дугогасительной камеры с продольной или лабиринтной щелью (рис. 10-5).

2. Дугогасительная камера с деионной решеткой из стальных пластин.

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

Недостатками этого метода гашения являются: увеличение потерь в контакторе из-за потерь в стали магнитной системы дугогашения, что ведет к повышению температуры контактов, расположенных вблизи дугогасительного устройства, и возможность возникновения больших перенапряжений из-за принудительного обрыва тока (до естественного нуля).

Значительное увеличение электрической износостойкости контактов (до $15 \cdot 10^6$) можно получить, шунтируя контакты тиристорами (§ 13-9).

Применение для гашения катушки напряжения на переменном токе исключается из-за того, что сила, действующая на дугу, меняет свой знак, так как поток, создаваемый магнитной системой дугогашения, сдвинут по фазе относительно отключаемого тока. Если ток и поток имеют один знак, сила положительна, если же ток и поток имеют разные знаки, то сила отрицательна.

Довольно широкое распространение получила дугогасительная камера с деионной решеткой из стальных пластин; принцип действия такого устройства изложен в § 4-8. Идея использования околоэлектродного падения напряжения для гашения дуги принадлежит русскому ученому М. О. Доливу-Добровольскому. Принципиальная схема дугогасительного устройства дана на рис. 10-10, б. Дуга I , возникающая после расхождения контактов, втягивается в клиновидный паз параллельно расположен-

ных стальных пластин 2 (см. § 1-7). В верхней части дуга пересекается пластинами и разбивается на ряд коротких дуг 3. При вхождении дуги в решетку возникают силы, тормозящие движение дуги [Л. 3-3]. Для уменьшения этих сил дуга, смещенная относительно середины решетки, вначале пересекает пластины с нечетными номерами, а потом уже с четными (рис. 10-10, б). После того как дуга втянется в решетку и разобьется на ряд коротких дуг, в цепи возникает дополнительное падение

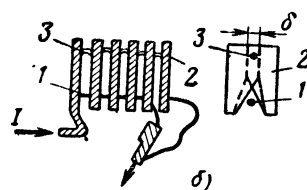
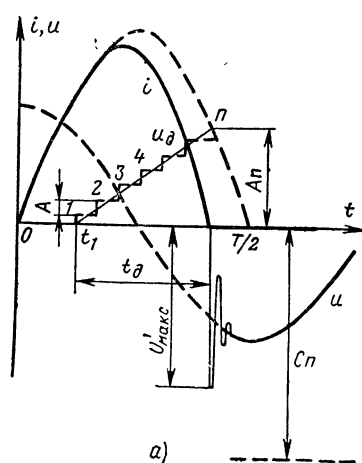


Рис. 10-10. К процессу гашения дуги в деионной решетке.

напряжения A на каждой паре электродов. Это падение напряжения составляет 20—30 В. Из-за наличия этого падения напряжения ток в цепи пройдет через нуль ранее своего естественного нулевого значения. При этом уменьшается восстанавливающееся напряжение промышленной частоты, а следовательно, и пик восстанавливающегося напряжения (рис. 10-10, а).

Гашение дуги произойдет, если $Cn > U'_{\text{макс}}$, где C — околоскатная прочность. При надлежащем выборе числа пластин n гашение дуги происходит при первом прохождении тока через нуль. При малых токах $C \approx 300$ В, при больших эта величина падает до 70 В [Л.4-5].

Для того чтобы пластины решетки не подвергались коррозии, они покрываются тонким слоем меди или цинка. Несмотря на быстрое гашение дуги, при частых включениях и отключениях происходит нагрев пластин до

очень высокой температуры. Возможно даже прогорание пластин. В связи с этим число включений и отключений в час у контакторов с деионной решеткой не превышает 600 (контактор КТ-7000).

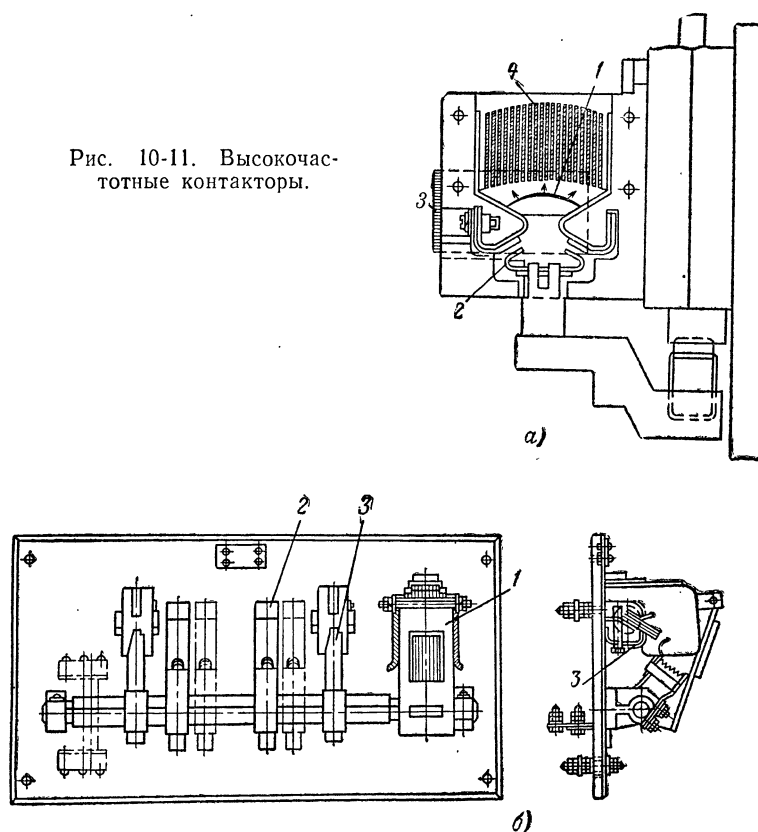
В новых контакторах, применяемых в пускателях серии ПА, применяется двукратный разрыв на каждый полюс (рис. 10-8). Для того чтобы уменьшить оплавление контактов, они охвачены стальной скобой. При образовании дуги на нее действует электродинамическая сила втягивания дуги в эту скобу. Движению опорных точек дуги по контакту помогают также электродинамические силы, возникающие за счет взаимодействия дуги с током в подводящих проводниках и арматуре контактов. Здесь, так же как и в решетке для гашения дуги, используется околоскатодная прочность, возникающая после прохода тока через нуль. Два разрыва и магнитное дутье за счет стальной скобы и поля подводящих проводников обеспечивают надежную работу при напряжении до 500 В. Контактор на номинальный ток 60 А отключает десятикратный ток короткого замыкания при напряжении 450 В и $\cos \varphi = 0,3$.

в) Дугогасительные устройства высокочастотных контакторов. В высокочастотных установках для обеспечения нормальных условий работы генераторов $\cos \varphi$ цепи стремятся приблизить к единице. Как было показано в § 4-9, гашение дуги в этом случае получается более тяжелым, чем при $\cos \varphi = 0$.

Исследования [Л. 3-3] показали, что для гашения дуги с током высокой частоты ($f > 500$ Гц) дугогасительная решетка со стальными пластинами не может применяться. Высокочастотный поток, проходя по стальным пластинам, наводит в них э. д. с., пропорциональную частоте. Возникающий под действием этой э. д. с. ток в пластинах создает поток, который, взаимодействуя с током дуги, выталкивает дугу из решетки. Чем больше частота, тем больше выталкивающая сила. Если стальные пластины заменить на латунные, то выталкивающая сила уменьшается, так как магнитная проницаемость латуни значительно меньше, чем у стали. Следовательно, поток в пластинах латуни будет значительно меньше, чем в стальных пластинах. Однако при этом силы, втягивающей дугу в решетку, не возникает и необходимо применение токовой катушки магнитного дутья. Подобная система использована в контакторе, изображенном на рис. 10-11, а.

Дуга 1, образующаяся после опускания контактного моста 2, с помощью системы магнитного дутья 3 загоняется в узкую щель, в которой расположены латунные пластины 4. Продвижению дуги к пластинам способствует повышение давления в нижней части камеры за счет по-

Рис. 10-11. Высокочастотные контакторы.



догрева находящегося там воздуха. Дуга гаснет при первом прохождении тока через нуль после того, как она разбивается на ряд коротких дуг.

В высокочастотных контакторах устаревшей конструкции используется гашение дуги с помощью магнитного дутья с катушкой тока и асбестоцементной дугогасительной камеры. Такой контактор, рассчитанный на ра-

боту в цепи с частотой до 8000 Гц и напряжением до 1500 В, показан на рис. 10-11, б. Контактор имеет два полюса. В каждом полюсе имеются главный контакт 2 и включенный параллельно ему дугогасительный контакт 3 с токовой катушкой магнитного дутья. Привод контактов осуществляется электромагнитом 1. При отключении вначале размыкаются главные контакты и ток перебрасывается в катушку, после чего размыкаются дугогасительные контакты. Дуга гасится в камере под действием магнитного поля так же, как и на частоте 50 Гц. Во включенном положении катушка и дугогасительный контакт шунтированы главным контактом, поэтому падение напряжения на катушке практически равно нулю. При размыкании главных контактов на них появляется напряжение, равное падению напряжения на катушке, которое может быть довольно большим, так как индуктивное сопротивление пропорционально частоте. Это затрудняет переброс тока в цепь дугогасительных контактов. Дугогасительная система контактора (рис. 10-11, б) обеспечивает отключение тока, равного $2 I_n$. При использовании контакторов на более низкой частоте отключаемый ток увеличивается.

Процесс гашения дуги в таких контакторах длится до 500 полупериодов высокой частоты, что является их недостатком.

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

Магнитопровод состоит из двух одинаковых частей, одна из которых укреплена неподвижно, другая связана через рычаги с контактной системой. В электромагнитах старой конструкции для устранения залипания якоря между средними полюсами Ш-образной системы делался зазор. При включении удар приходился на крайние полюсы, что приводило к их заметному расклепыванию. В случае перекося якоря на рычаге возможно разрушение поверхности полюса сердечника острыми кромками якоря. В современных контакторах (серии ПА) [Л.10-2] для устранения залипания в цепь введена магнитная прокладка 4 (рис. 10-8). Во включенном положении все три зазора равны нулю. Это позволяет уменьшить износ полюсов, так как удар приходится на все три полюса. В современных контакторах для уменьшения удара не-

подвижный сердечник амортизирован с помощью цилиндрических пружин (рис. 10-8), что улучшает условия работы и контактной системы, поскольку при включении не возникает вибрации основания контактора.

С целью устранения вибрации якоря во включенном положении на полюсах магнитной системы устанавливаются короткозамкнутые витки. Как указывалось в § 5-6, действие короткозамкнутого витка наиболее эффективно при малом воздушном зазоре. Поэтому для плотного прилегания полюсов их поверхность должна шлифоваться. Хорошие результаты по уменьшению вибрации электромагнита достигнуты в контакторе типа ПА, где за счет эластичного крепления сердечника возможна самоустановка якоря относительно сердечника, при которой воздушный зазор получается минимальным.

Известно, что из-за изменения индуктивного сопротивления катушки ток в притянутом состоянии якоря значительно меньше, чем в отпущенном состоянии (§ 5-3). В среднем можно считать, что пусковой ток равен десятикратному току притянутого состояния, но для больших контакторов может достигать значения, равного 15-кратному от тока в замкнутом состоянии. В связи с большим пусковым током ни в коем случае недопустима подача напряжения на катушку, если якорь по каким-либо причинам удерживается в положении «отключено». Катушки большинства контакторов рассчитаны таким образом, что допускают до 600 включений в час при $PВ=40\%$.

В особо тяжелых условиях работают электромагниты контакторов при пятиполюсном исполнении. Для того чтобы обеспечить нормальную работу пяти контактных пар, электромагнит имеет форсировку. Такой контактор может работать только в повторно-кратковременном режиме (контакторы старых серий КТ и КТЭ). Современные контакторы КТ-6000 и КТ-7000 могут работать в любом режиме (ГОСТ 11206-70).

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

Параметры катушек и величины форсировочных сопротивлений приведены в каталогах.

При уменьшении зазора тяговая характеристика электромагнита переменного тока поднимается менее круто, чем в электромагните постоянного тока (§ 5-6). Благодаря этому тяговая характеристика электромагнита более близко подходит к противодействующей. В результате напряжение отпущения близко к напряжению срабатывания.

Относительно высокий коэффициент возврата (0,6—0,7) дает возможность осуществить защиту двигателя от падения напряжения. При понижении напряжения до $(0,6—0,7) U_n$ происходит отпадение якоря и отключение двигателя.

Электромагниты контакторов обеспечивают надежную работу в диапазоне колебания питающего напряжения 85—110% U_n . Поскольку катушка контактора питается через замыкающий блок-контакт, то включение контактора не происходит самостоятельно после подъема напряжения до номинального значения (рис. 10-14). Как указывалось в § 5-7, срабатывание электромагнита переменного тока происходит значительно быстрее, чем электромагнита постоянного тока. Собственное время срабатывания контакторов составляет 0,03—0,05 с, а время отпущения 0,02 с.

В случаях применения контакторов для реверса предусматривается как механическая, так и электрическая блокировка по рис. 10-15 и 10-16.

Так же как и контакторы постоянного тока, контакторы переменного тока имеют блок-контакты, которые приводятся в действие тем же электромагнитом, что и главные контакты.

В схемах автоматики часто возникает необходимость иметь контакторы с «памятью». После снятия напряжения с электромагнита якорь остается в притянутом состоянии. Такой принцип осуществлен в контакторе залипания КМЗ. Магнитопровод собран из стали марки 40Х, в замкнутом состоянии магнитной системы немагнитный зазор отсутствует, катушка имеет две секции. Схема включения показана на рис. 10-12.

При подаче переменного напряжения на вводы 1—2 обмотка ω_2 питается постоянным током. После притяжения якоря блок-контакт 3 размыкается, но по обмотке ω_2 продолжает протекать ток через диод D и конденсатор C до тех пор, пока конденсатор не зарядится до определенного напряжения. Ток конденсатора и длительность

протекания выбраны такими, что обеспечивается надежное залипание якоря после снятия напряжения. Якорь удерживается в притяннутом состоянии за счет остаточной индукции (§ 5-8). Для отключения напряжение подается на вводы 2 и 4. Обмотка ψ_1 размагничивает сердечник, якорь отпадает. При замыкании контакта 3 конденсатор C разряжается на резистор R_p . Блок-контакт 5 размыкает цепь размагничивания в положении отключено. Контактор подготавливается для следующего включения. Допустимая частота включений в час 150.

Большим достоинством контактора с залипанием является отсутствие потребления мощности в притяннутом состоянии. Это может дать большой экономический эффект, если учесть колоссальное число эксплуатируемых контакторов. Следует ожидать разработки таких контакторов на большие номинальные токи.

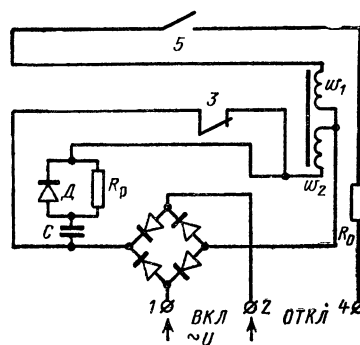


Рис. 10-12. Схема включения обмоток контактора с залипанием серии КМЗ.

10-4. Магнитные пускатели

а) **Требования к пускателям и условия работы.** Магнитным пускателем называется контактор, предназначенный для пуска в ход короткозамкнутых асинхронных двигателей.

Как правило, в пускателе, помимо контактора, встроены тепловые реле для защиты двигателя от перегрузок и «потери фазы». Бесперебойная работа асинхронных двигателей в значительной степени зависит от надежности пускателей. Поэтому к ним предъявляются высокие требования в отношении износостойкости, коммутационной способности, четкости срабатывания, надежности защиты двигателя от перегрузок, минимального потребления мощности.

Особенности условий работы пускателя состоят в следующем. При включении асинхронного двигателя пусковой ток достигает 6—7-кратного значения номинального тока. Даже значительная вибрация контактов при таком токе быстро выводит их из строя. Это накладывает высокие требования в отношении вибрации контактов и их износа. С целью уменьшения времени вибрации контакты и подвижные части делаются возможно легче, уменьшается их скорость, увеличивается нажатие. Эти мероприятия позволили создать износостойкий пускатель типа ПА с электрической износостойкостью до $2 \cdot 10^6$ операций.

Исследования показали, что при токах до 100 А целесообразно применять серебряные накладки на контактах. При токе выше 100 А хорошие результаты дает композиция серебра и окиси кадмия КМК-10А.

После разгона двигателя ток падает до номинального значения.

При отключении восстанавливающееся напряжение на контактах равно разности напряжения сети и э. д. с. двигателя. В результате на контактах появляется напряжение, составляющее всего 15—20% U_n , т. е. имеют место облегченные условия отключения.

При работе двигателя нередки случаи, когда двигатель отключается от сети тотчас же после пуска. Пускатель приходится тогда отключать ток, равный семикратному номинальному току при очень низком коэффициенте мощности ($\cos \varphi = 0,3$) и восстанавливаемомся напряжении, равном номинальному напряжению источника питания. После 50-кратного включения и отключения заторможенного двигателя пускатель должен быть пригоден для дальнейшей работы. В технических данных пускателя указывается не только его номинальный ток, но и мощность двигателя, с которым пускатель может работать при различных напряжениях. Поскольку ток, отключаемый пускателем, относительно мало падает с ростом напряжения, мощность двигателя, с которым может работать данный пускатель, возрастает с увеличением номинального напряжения. Наибольшее рабочее напряжение равно 500 В.

Многочисленные исследования показали, что электрическая износостойкость примерно обратно пропорциональна мощности управляемого электродвигателя в степени 1,5—2 [Л.10-2]. Если необходимо повысить срок

службы пускателя, то целесообразно выбрать его с запасом по мощности.

При уменьшении мощности двигателя возрастает и допустимое число включений в час. Дело в том, что двигатель меньшей мощности быстрее достигает номинальной частоты вращения. Поэтому при отключении пускатель разрывает установившийся, номинальный ток двигателя, что облегчает работу пускателя.

С учетом исключительно широкого распространения пускателей большое значение приобретает снижение мощности, потребляемой ими. В пускателе мощность расходуется в электромагните и тепловом реле. Потери в электромагните составляют примерно 60%, в тепловых реле — 40%. С целью снижения потерь в электромагните применяется холоднокатаная сталь Э310.

б) Конструкция и схема включения пускателя. Наибольшее распространение получили пускатели серий ПМЕ и ПА. На рис. 10-13 представлен магнитный пускатель серии ПМЕ.

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

Прямоходовой электромагнит имеет Ш-образный сердечник 5 и якорь 6. Возврат пускателя в исходное положение происходит за счет пружины 7. Короткозамкнутый виток 8 расположен на двух крайних стержнях сердечника. Якорь электромагнита 6 связан с

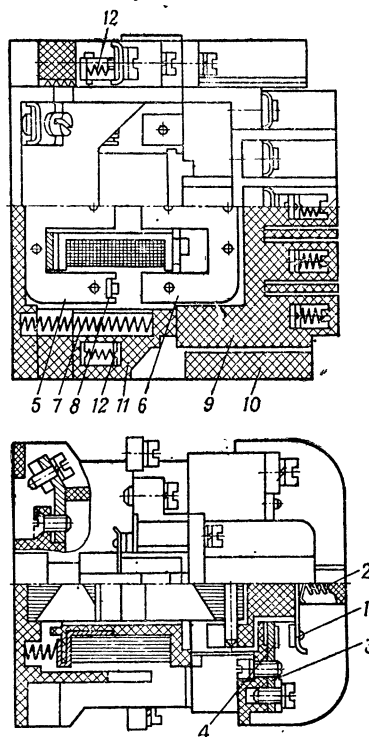


Рис. 10-13. Пускатель серии ПМЕ.

изоляционной траверсой 9, несущей подвижные контакты 1 с контактными пружинами 2. Траверса 9 движется в направляющих 10, являющихся частью литого корпуса 11. Пускатель может иметь пять главных и два вспомогательных контакта 12. Основной особенностью электромагнитного механизма является равенство ходов контакта и якоря электромагнита. Такая система имеет ряд недостатков (§ 10-3, а), которые ведут к большому времени вибрации контактов (более 1 мс) и их быстрому износу. В современных пускателях такая система применяется только при малых мощностях двигателей (номинальный ток 25 А).

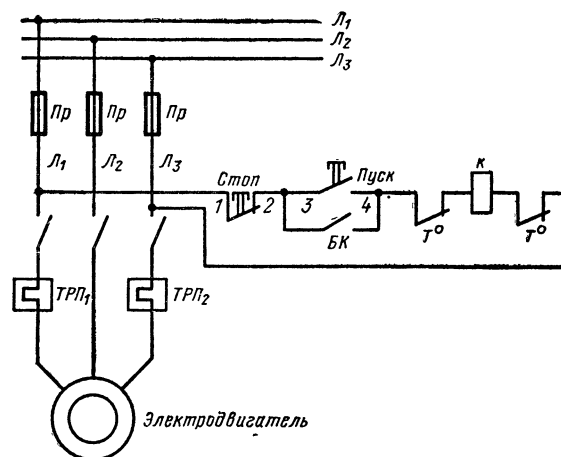


Рис. 10-14. Схема включения нереверсивного пускателя.

При токах, больших 25 А, хорошо себя зарекомендовала система пускателей серии ПА, в которой ход контакта примерно в 2,5 раза меньше, чем ход якоря электромагнита. Для защиты двигателя от перегрузки в двух фазах устанавливаются тепловые реле. В некоторых типах пускателей, например в серии П, тепловые реле расположены на одной панели с контактором. Реле типа ТРП и ТРН монтируются вне контактора пускателя. Устройство, характеристика и выбор реле тепловой защиты рассмотрены в гл. 11.

Схема включения нереверсивного пускателя показана на рис. 10-14. Главные (линейные) контакты Л включаются в расщелку проводов, питающих двигатель. В проводах двух фаз включаются также нагревательные элементы тепловых реле ТРП₁ и ТРП₂. Катушка электромагнита К подключается к сети через размыкающие контакты тепловых реле Т° и кнопки управления. При нажатии кнопки Пуск напряжение на катушку подается через замкнутые контакты 1—2 кнопки Стоп и замкнутые контакты тепловых реле Т°. После притяжения якоря электромагнита замыкается блок-контакт БК, шунтирующий контакты 3—4 кнопки Пуск. Это дает

возможность отпустить пусковую кнопку. Для отключения пускателя нажимается кнопка *Стоп*. При перегрузке двигателя срабатывают тепловые реле, которые разрывают цепь катушки *К*. Якорь электромагнита отпадает. Происходит отключение пускателя.

Высокий коэффициент возврата электромагнитного механизма переменного тока позволяет осуществить защиту двигателя от понижения напряжения питания (электромагнит отпускает якорь при напряжении 60—70% U_n).

Если напряжение сети возрастает до своего номинального значения, то самопроизвольного включения пускателя не произойдет, так как при отключении блок-контакт *БК* разомкнется и цепь катушки *К* разорвется.

На рис. 10-15 показан общий вид реверсивного пускателя на базе ПМЕ. Подвижная часть верхнего пускателя 1 с помощью рычага 2 заблокирована с подвижной частью 3 нижнего пускателя. При подаче напряжения на верхний пускатель его якорь притягивается, верхний конец рычага 2 поворачивается влево и удерживает якорь нижнего пускателя в крайнем правом положении. Даже при подаче напряжения на нижний пускатель якорь его электромагнита не сдвинется с места, так как сила, действующая на верхнее плечо (якорь верхнего пускателя притянут), больше силы, действующей на нижнее плечо. Поскольку при подаче напряжения на нижний электромагнит в его обмотке протекает большой ток и она может выйти из строя, механическая блокировка дополняется электрической.

Схема включения реверсивного пускателя приведена на рис. 10-16. Кнопка управления *Вперед* имеет замыкающие контакты 1—2 и размыкающие контакты 4—6. Аналогичные контакты имеет кнопка пуска двигателя в обратном направлении *Назад*. Соответственно индекс «в» отнесен к элементам, участвующим при работе вперед, и индекс «н» — при работе назад. При пуске *Вперед* замыкаются контакты 1—2 этой кнопки и процесс протекает так же, как и у не-реверсивного пускателя, с той лишь разницей, что цепь катушки K_v замыкается через размыкающие контакты 1—6 кнопки *Назад*. Одновременно размыкаются размыкающие контакты 4—6 кнопки *Вперед*, при этом разрывается цепь катушки K_n . При нажатии кнопки *Назад* вначале размыкаются контакты 1—6, обесточивается катушка K_v и отключается пускатель *Вперед*. Затем контактами 4—3 за-пускается электромагнит пускателя *Назад*. При одновременном на-

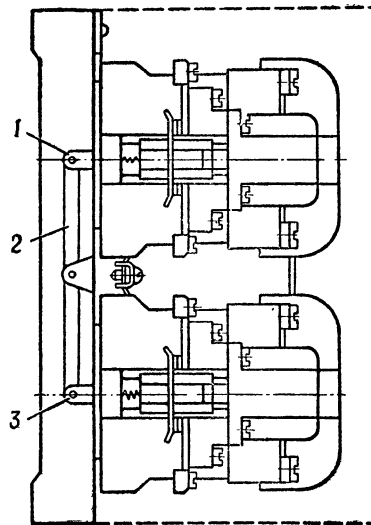


Рис. 10-15. Механическая блокировка реверсивного пускателя.

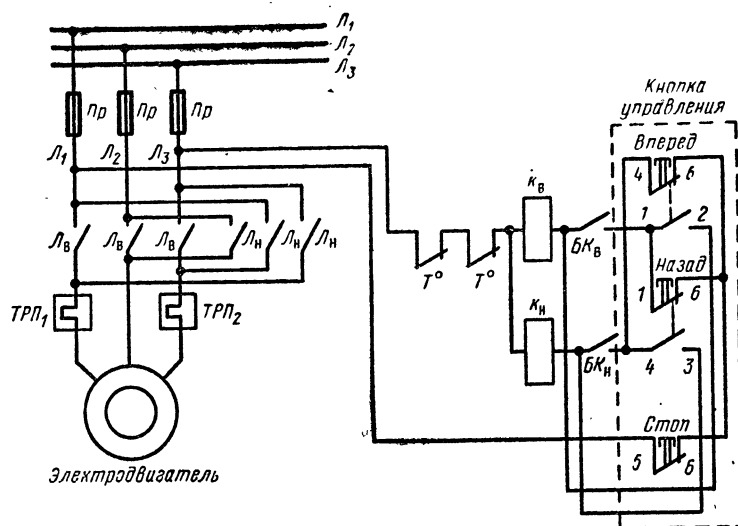


Рис. 10-16. Схема включения реверсивного пускателя.

жатию кнопок *Вперед* и *Назад* ни один из пускателей не будет включен.

Блок-контакты в настоящее время выпускаются в виде унифицированных блоков, которые могут устанавливаться в различных пускателях.

Глава одиннадцатая

РЕЛЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА

11-1. Общие сведения

а) **Классификация.** Под реле понимают такой электрический аппарат, в котором при плавном изменении управляющей (входной) величины происходит скачкообразное изменение управляемой (выходной) величины. Из двух величин хотя бы одна должна быть электрической. По области применения реле можно разделить на реле для схем автоматики, для управления и защиты электропривода и для защиты энергосистем.

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

В зависимости от входного параметра реле можно разделить на реле тока, напряжения, мощности, частоты и других величин. Следует отметить, что реле может реагировать не только на значение величины, но и на разность значений (дифференциальные), на изменение знака или на скорость изменения входной величины. Иногда реле, имеющие только одну входную величину, должно воздействовать на несколько независимых цепей. В этом случае реле воздействует на другое промежуточное реле, которое имеет необходимое число управляемых цепей. Промежуточное реле используется и тогда, когда мощность, которой может управлять основное реле, недостаточна.

По принципу воздействия на управляемую цепь реле делятся на контактные и бесконтактные.

Первые воздействуют на выходной параметр путем замыкания или размыкания контактов в управляемой цепи; во-вторых, при срабатывании реле резко меняется сопротивление, включенное в управляемую цепь. Разомкнутому состоянию контактной системы соответствует большое сопротивление в управляемой цепи бесконтактного реле. Это состояние бесконтактного реле носит название закрытого состояния. Замкнутому состоянию контактного исполнительного органа соответствует малое сопротивление между выходными зажимами бесконтактного реле. При этом говорят об открытом состоянии бесконтактного реле.

Помимо указанных признаков, реле различаются способом включения.

Первичные реле включаются в контролируемую цепь непосредственно, а вторичные — через измерительные трансформаторы.

б) Основные характеристики реле. Рассмотрим зависимость выходного параметра от значения воздействующей величины для случая реле с замыкающим контактом. У этих реле при отсутствии входного сигнала контакты исполнительного органа разомкнуты и ток в управляемой цепи равен нулю. Для бесконтактных реле сопротивление, введенное в управляемую цепь, не равно бесконечности и ток имеет минимальное значение I_{\min} . На рис. 11-1 по оси абсцисс отложено значение воздействующей величины, а по оси ординат — выходной. Значение воздействующей величины, при которой

происходит срабатывание реле, называется значением величины срабатывания. До тех пор, пока $x < x_{ср}$, выходной параметр y либо равен нулю, либо равен своему минимальному значению $y_{мин}$ (для бесконтактных аппаратов). При $x \geq x_{ср}$ выходной параметр скачком меняется от $y_{мин}$ до $y_{макс}$. Происходит срабатывание реле. Если после срабатывания уменьшать значение

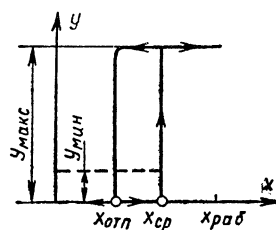


Рис. 11-1. Характеристика управления реле.

воздействующей величины, то при $x \leq x_{отп}$ происходит отпускание реле.

Значение воздействующей величины, при котором произошло скачкообразное уменьшение выходного параметра с $y_{макс}$ до $y_{мин}$, называется значением величины отпускания. Заданное значение величины (срабатывания или отпускания), на кото-

рую отрегулирован аппарат, называется установкой по воздействующей величине.

Время с момента подачи команды на срабатывание до момента скачкообразного изменения выходной величины называется временем включения. Это время зависит от конструкции реле и величины входного параметра. Чем больше значение воздействующей величины по сравнению с $x_{ср}$, тем быстрее и надежнее работает реле. Отношение $x_{раб}/x_{ср}$ называется коэффициентом запаса.

Для целого ряда реле очень важным является отношение $x_{отп}/x_{ср}$. Это отношение называется коэффициентом возврата.

Время с момента подачи команды на отключение до момента достижения минимального значения выходной величиной называется временем отключения. Для контактных аппаратов это время состоит из двух интервалов — времени отпускания и времени дуги. Наглядное представление о времени работы электромагнитного реле дает рис. 11-2. На рис. 11-2, а дана зависимость тока от времени в управляемой цепи, а на рис. 11-2, б — в управляющей цепи (обмотке реле).

Весьма важным параметром, характеризующим усиленные свойства реле, является отношение $P_y/P_{ср}$,

где P_y — максимальная мощность в нагрузке управляемой цепи, а $P_{ср}$ — минимальная мощность входного сигнала, при котором происходит срабатывание реле.

Для реле с исполнительным органом в виде контактной системы максимальная мощность управления P_y определяется не длительным током, который может пропустить контакт, а током, который может быть многократно отключен.

в) **Требования, предъявляемые к реле.** Требования к реле в значительной мере определяются их назначением. К реле защиты энергосистем предъявляются следующие четыре основных требования: селективность, быстрота действия, чувствительность, надежность.

Под селективностью понимается способность реле отключать только поврежденный участок энергосистемы. Быстрота действия позволяет резко снизить последствия аварии, сохранить устойчивость системы при аварийных режимах, обеспечить высокое качество электроэнергии. Повышение чувствительности реле позволяет уменьшать «мертвую» незащищенную зону [Л. 11-1].

Реле для защиты энергосистем должны иметь высокую надежность, так как неправильная работа реле может привести к развитию тяжелых аварий и недоотпуску большого количества энергии.

В отношении внешних условий реле защиты работают в облегченных условиях. Они не подвержены воздействию ударов, вибрации, работают в помещениях, лишенных пыли и газов, вызывающих коррозию. Если учесть, что аварийные режимы в системе редки, реле работают в относительно легких условиях. Поэтому к реле не предъявляются высокие требования в отношении износостойкости.

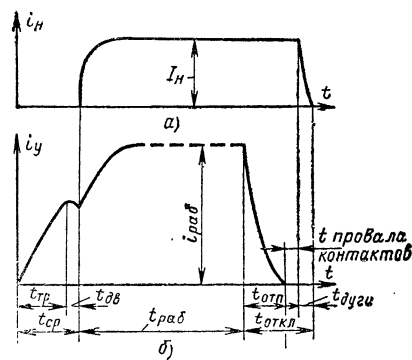


Рис. 11-2. Зависимость от времени выходной и входной величин для электромагнитного реле.

Реле, предназначенные для схем защиты и автоматики электропривода, должны удовлетворять специфическим требованиям. Эти реле работают при худших условиях: возможны удары, вибрация. Воздух часто засорен пылью или вредными производственными примесями. Так как современные схемы электропривода имеют число включений в час до 1000—1200, реле управления должны иметь высокую механическую и электрическую износостойкость порядка $(1-10)10^6$ циклов «включение — отключение». Надежность работы схем автоматики зависит от надежности работы отдельных элементов. Так как реле управления и защиты электродвигателей много и им приходится выполнять большое число операций, то они должны иметь высокую надежность.

В гл. 11 и 12 рассматриваются контактные реле и реле, использующие электронные лампы. Бесконтактные реле на магнитных усилителях и полупроводниковых приборах описаны в гл. 13.

11-2. Электромагнитные реле

а) Согласование тяговых и противодействующих характеристик. Электромагнитные реле благодаря своей простоте, надежности получили широкое распространение как в схемах электропривода, так и в схемах защиты энергосистем.

Рассмотрим работу электромагнитного механизма реле постоянного тока, имеющего простейшую клапанную систему. На рис. 11-3 изображены тяговая и противодействующая характеристики. Противодействующая сила создается возвратной (F_1) и контактными (F_2) пружинами. Для борьбы с вибрацией и создания надежного контакта контактные пружины, как правило, создают предварительное нажатие в момент соприкосновения.

С учетом линейной зависимости силы пружины от ее деформации и относительно небольшого перемещения якоря сила противодействующих пружин, приведенная к сердечнику, меняется линейно с изменением зазора. Согласно § 5-6 тяговая характеристика электромагнитов постоянного тока круто поднимается вверх по мере уменьшения зазора. *Для того чтобы реле включалось, необходимо, чтобы тяговая характеристика $F_{\Sigma 1}$ во всех точках хода механизма шла выше, чем суммарная про-*

тиводействующая характеристика $F_{\Pi} = F_1 + F_2$. Для токового реле при данном начальном зазоре δ_H положение $F_{\partial 1}$ зависит от величины тока (см. § 5-6). При ненасыщенной магнитной системе тяговая сила пропорциональна квадрату тока.

Наименьшее значение тока, при котором кривая $F_{\partial 1}$ во всех точках проходит выше ломаной F_{Π} , называется током трогания. Для надежного включения в обмотку реле обычно подается ток I_p , больший, чем ток трогания. Коэффициент запаса при этом будет равен: $k_3 = I_p / I_{\text{ср}}$, обычно $k_3 = 1,4$.

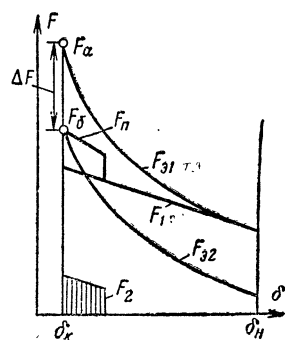


Рис. 11-3. Согласование характеристик электромагнитного реле.

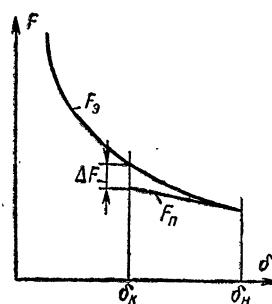


Рис. 11-4. Условия получения высокого коэффициента возврата.

Поскольку с ростом k_3 тяговая характеристика поднимается, то увеличивается сила, действующая на механизм, увеличивается ускорение и сокращается полное время включения. Этот вопрос был рассмотрен в § 8-3.

Для того чтобы устранить залипание якоря, в магнитной системе всегда создается конечный зазор δ_K . Тяговая сила при зазоре δ_K значительно превышает противодействующую ($F_a - F_n = \Delta F$).

Для отключения реле необходимо, чтобы тяговая характеристика $F_{\partial 2}$ во всех точках пошла ниже характеристики F_{Π} . При этом сила, развиваемая противодействующими пружинами, будет больше сил электромагнита и якорь возвратится в начальное положение. Ток, при котором имеет место такое положение характеристик, называется током отпускания или током возврата.

Для реле защиты энергосистем и реле управления, контролирующих входной параметр в узких пределах, коэффициент возврата должен быть возможно ближе к единице [Л. 11-1]. Для реле тока

$$k_{\text{в}} = I_{\text{отп}} / I_{\text{ср}}.$$

б) Влияние различных факторов на коэффициент возврата. Для конечного зазора $\delta = \delta_{\text{к}}$ можно написать:

$$F_a = k_1 I_{\text{ср}}^2,$$

где F_a — сила, развиваемая магнитом при $\delta = \delta_{\text{к}}$ и $I = I_{\text{ср}}$;

k_1 — конструктивный фактор;

$I_{\text{ср}}$ — ток срабатывания.

Для отпущения реле необходимо так уменьшить ток, чтобы сила, развиваемая электромагнитом, стала равной $F_{\text{б}}$:

$$F_{\text{б}} = k_1 I_{\text{отп}}^2,$$

откуда можно получить:

$$k_{\text{в}} = \frac{I_{\text{отп}}}{I_{\text{ср}}} = \sqrt{\frac{F_{\text{б}}}{F_a}}.$$

Из рис. 11-3 видно, что

$$F_{\text{б}} = F_a - \Delta F.$$

Тогда

$$k_{\text{в}} = \sqrt{\frac{F_a - \Delta F}{F_a}} = \sqrt{1 - \frac{\Delta F}{F_a}}. \quad (11-1)$$

Поскольку ΔF всегда положительно, коэффициент возврата всегда меньше единицы. Для увеличения коэффициента возврата необходимо приближать тяговую и противодействующую характеристики с целью уменьшения ΔF . В реле основную противодействующую силу создает возвратная пружина. Контактная пружина развивает небольшое усилие и при рассмотрении вопроса о коэффициенте возврата ею можно пренебречь.

Для получения высокого коэффициента возврата противодействующая характеристика должна быть такой же нелинейной, как и тяговая. Создать такую ха-

рактическую характеристику возможно либо путем применения специального кулачка, либо путем применения нескольких пружин [Л. 11-2]. Вследствие конструктивной сложности эти решения применяются редко.

В случае использования простейшего линейного механизма и одной пружины рекомендуется выбирать пружину с наибольшей возможной жесткостью, так чтобы противодействующая характеристика совпадала с касательной, проведенной к тяговой характеристике при $\delta = \delta_n$. Тогда величина ΔF будет наименьшей, а коэффициент возврата согласно уравнению (11-1) — наибольшим.

Для получения высокого коэффициента возврата желательно применение электромагнита, имеющего малый рабочий ход и большую величину конечного зазора в магнитной цепи при притяннутом якоре. Если согласно рис. 11-4 выбрать достаточно большое значение δ_k и малый рабочий ход якоря, равный $\delta_n - \delta_k$, то характеристика противодействующей пружины достаточно близко подойдет к тяговой и коэффициент возврата может быть получен порядка 0,7—0,8.

Большие возможности дает электромагнитная система с вращательным движением якоря (рис. 11-5). Изменяя форму якоря и полюсов, можно получить практически любую тяговую характеристику.

Помимо указанных выше факторов, на коэффициент возврата оказывают влияние трение в механизме и гистерезис магнитного материала.

Наличие трения создает дополнительные силы сопротивления, что вызывает увеличение тока трогания. При возврате сила трения препятствует движению. При этом усилие пружины, действующее на механизм, уменьшается, что вызывает уменьшение тока отпускания. В результате коэффициент возврата уменьшается. Для того чтобы трение мало сказывалось на коэффициенте возврата, необходимо, чтобы сила, развиваемая противодействующей пружиной, была значительно больше, чем сила трения. Гистерезис магнитного материала также ведет к уменьшению коэффициента возврата. Дело в том, что при трогании процесс намагничивания цепи идет по восходящей ветви гистерезиса, а при отпуске — по нисходящей ветви. При этом ток трогания возрастает, а ток отпускания падает по сравнению со случаем безгистерезисного материала.

Величина коэффициента возврата может легко меняться за счет изменения конечного рабочего зазора.

Допустим, что магнитная цепь не насыщена. Будем менять конечный зазор с помощью тонких латунных прокладок. Начальное положение якоря оставим без изме-

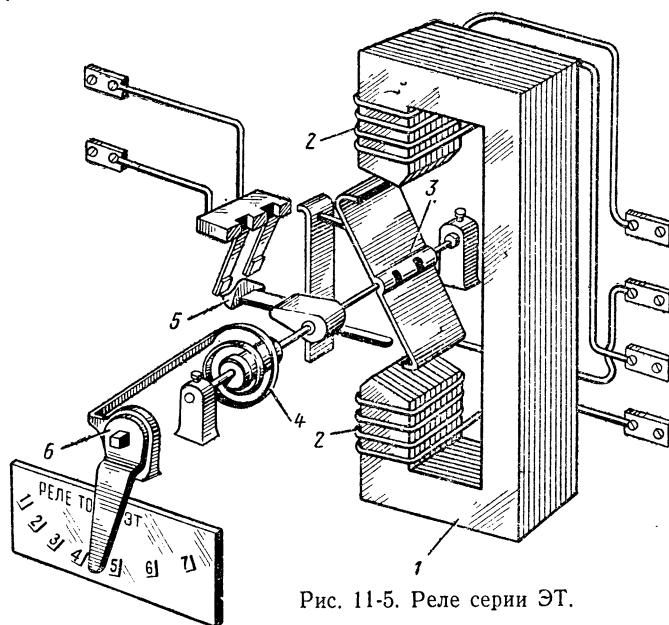


Рис. 11-5. Реле серии ЭТ.

нения. Поскольку начальный зазор не меняется, то и ток трогания $I_{тр}$ остается без изменения. При изменении конечного зазора δ_k сила возвратной пружины, отрывающей якорь, остается практически неизменной, так как эта пружина имеет большую деформацию и изменение ее длины на долю миллиметра не изменяет силы пружины.

Рассмотрим клапанную систему — рис. 5-12. Согласно (5-57) имеем:

$$I_{отп} = \sqrt{\frac{2F_{пр.отп}}{\mu_0 S \omega^2}} \delta_k. \quad (11-2)$$

Пусть $\delta_{k1} > \delta_{k2}$, тогда

$$k_{в1} = I_{отп1}/I_{ср}; \quad k_{в2} = I_{отп2}/I_{ср}; \quad k_{в1}/k_{в2} = \delta_{k1}/\delta_{k2}.$$

Таким образом, чем больше конечный зазор δ_k , тем выше коэффициент возврата.

Если менять начальный зазор δ_n , а конечный оставить без изменения, то при тех же допущениях получим:

$$\frac{k_{в1}}{k_{в2}} = \frac{I_{ср2}}{I_{ср1}} = \frac{\delta_{н2}}{\delta_{н1}}.$$

Иногда для изменения тока $I_{ср}$ меняется начальная сила пружины $F_{пр.н}$. При этом меняется коэффициент возврата.

Если пренебречь силой контактной пружины, то воспользовавшись (11-2), можно получить:

$$I_{ср1} = A \sqrt{F_{пр.н1}}; I_{ср2} = A \sqrt{F_{пр.н2}}; I_{отп1} = B \sqrt{F_{пр.отп1}}; \\ I_{отп2} = B \sqrt{F_{пр.отп2}}.$$

Тогда отношение коэффициентов k_v для разных $F_{пр.н}$ равно:

$$\frac{k_{в1}}{k_{в2}} = \sqrt{\frac{F_{пр.отп1} F_{пр.н2}}{F_{пр.отп2} F_{пр.н1}}}.$$

Обозначим через C жесткость пружины, а через δ — ее деформацию. Тогда

$$\frac{k_{в1}}{k_{в2}} = \sqrt{\frac{F_{пр.н2} F_{пр.н1}}{F_{пр.н1} F_{пр.н2}} \frac{1 + \frac{C\delta}{F_{пр.н1}}}{1 + \frac{C\delta}{F_{пр.н2}}}} = \\ = \sqrt{\frac{1 + \frac{C\delta}{F_{пр.н1}}}{1 + \frac{C\delta}{F_{пр.н2}}}}. \quad (11-3)$$

Из полученного уравнения следует, что с ростом начальной деформации пружины ($F_{пр.н2} > F_{пр.н1}$) коэффициент возврата уменьшается ($\frac{k_{в1}}{k_{в2}} > 1$).

В ряде случаев схема автоматики требует, чтобы ток или напряжение отпуская были значительно меньше

тока или напряжения срабатывания. В этих схемах применяются реле с низким коэффициентом возврата.

Тяговая характеристика электромагнитов переменного тока более пологая, чем электромагнитов постоянного тока (§ 5-6), и ее легче согласовать с противодействующей. Поэтому высокий коэффициент возврата в реле переменного тока достигается легче, чем в реле постоянного тока.

11-3. Конструкция электромагнитных реле тока и напряжения

а) Реле для энергосистем. В схемах защиты энергосистем, крупных и ответственных установок (мощных двигателей, трансформаторов) широко применяются реле серии ЭТ. Эскиз одного из таких реле представлен на рис. 11-5.

Магнитопровод 1 шихтуется из листов электротехнической стали. Обмотка реле 2 разбита на две части и позволяет соединять секции параллельно и последовательно. Якорь 3 выполнен из тонкого листа электротехнической стали и имеет Z-образную форму. При повороте якоря происходит увеличение потока и насыщение якоря даже при токах, близких к току трогания. Это ограничивает момент, развиваемый реле в конце хода якоря.

Применение поворотной системы и легконасыщающегося якоря позволяет приблизить тяговый момент к противодействующему и получить высокий коэффициент возврата (0,85). Подвижный контакт 5 мостикового типа шарнирно укреплен на рычаге, связанном с валом. Это дает возможность контакту самоустанавливаться. Для устранения вибраций контактов служит масляный демпфер, связанный с валом реле. Противодействующая сила создается спиральной пружиной 4. Начальная деформация пружины меняется рычагом 6. Начальное и конечное положения якоря определяются специальными упорами.

Грубое регулирование тока срабатывания производится за счет изменения схемы соединения обмоток, а плавное — изменением начального натяжения пружины. При переходе с последовательного соединения на параллельное ток срабатывания увеличивается в 2 раза. В 2 раза ток срабатывания можно поднять за счет увеличения натяга пружины. Таким образом, реле позволяет регулировать ток срабатывания в пределах 1—4. Реле выпускаются на минимальные токи срабатывания от 0,05 до 200 А.

Время срабатывания при $k_a \geq 2$ составляет 0,02 с.

Реле серии ЭТ имеют малое собственное потребление, порядка 0,1 В·А, высокий коэффициент возврата (до 0,85), малое время срабатывания (0,02 с) и высокую точность работы $\pm 5\%$.

К недостаткам реле следует отнести малую мощность контактной системы, необходимость тщательной регулировки реле во избежание вибрации контактов. Мощность контактов на размыкание составляет всего 50 Вт постоянного тока при напряжении 220 В.

Аналогичную конструкцию имеют реле напряжения серии ЭН. Отличие этих реле от реле серии ЭТ заключается в том, что обмотки выполнены с большими числами витков и сопротивлениями

и рассчитаны на подключение к источнику напряжения. Потребляемая мощность при этом возрастает до 1 В·А. Все остальные параметры такие же, как у реле серии ЭТ. Реле серии ЭН могут работать и как максимальные, реагируя на повышение напряжения выше напряжения уставки, и как минимальные, реагируя на понижение напряжения ниже напряжения уставки.

Как известно (§ 5-3), в электромагнитах переменного тока ток в обмотке сильно зависит от положения якоря. В клапанных элек-

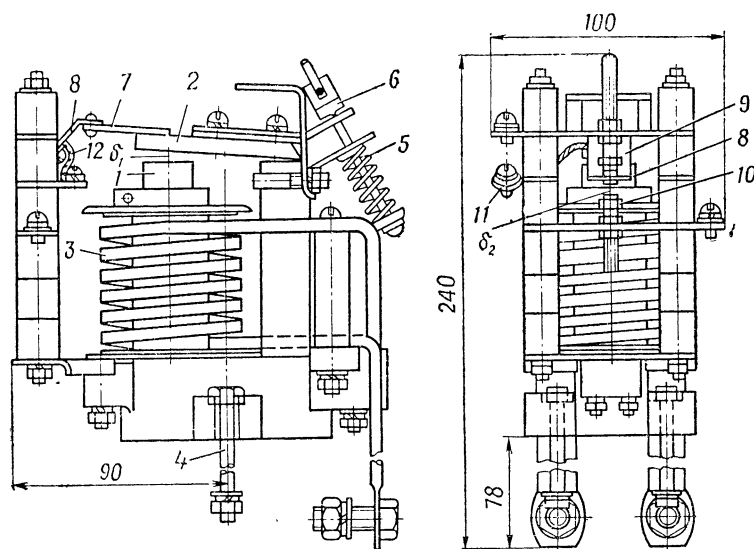


Рис. 11-6. Реле серии РЭВ-300.

тромагнитах ток в притянутом состоянии в десятки раз меньше, чем при отпущенном якоре. Это затрудняет создание максимальных реле напряжения на базе клапанной системы, так как при напряжениях, близких к напряжению срабатывания, через обмотку протекает большой ток, выделяется мощность, в сотни раз превышающая мощность в обмотке при притяннутом якоре. Приходится сильно увеличивать габариты катушки, чтобы рассеивать большую мощность, выделяемую при отпущенном якоре. Большим преимуществом реле серии ЭН является относительно небольшое изменение магнитной проводимости, в результате чего ток в обмотках мало меняется при повороте якоря. Это дает возможность иметь малые габариты обмоток.

6) **Реле тока и напряжения для управления электроприводом.** В схемах управления и защиты применяется реле постоянного тока серии РЭВ-300 с высоким коэффициентом возврата. Реле этой серии выпускаются и как реле напряжения и как реле тока в зависимости от обмоточных данных.

На рис. 11-6 изображено токовое реле. Магнитопровод 1 имеет U-образную форму и выполнен из прутка круглого сечения. Плоский якорь 2 вращается на призме, что обеспечивает высокую механическую износостойкость реле. Обмотка 3 выполняется из меди в соответствии с номинальным током реле. Регулирование силы пружины 5 осуществляется гайкой 6. Якорь 2 связан с подвижным контактом 8 с помощью изоляционной пластины 7. Реле имеет два неподвижных контакта 9 и 10. Подвижный контакт 8 соединяется с зажимом 11 с помощью гибкой связи 12. Реле выполняется в виде единого блока, который с помощью шпилек 4 может устанавливаться на металлических рейках сборной панели. Высокий коэффициент возврата достигается благодаря тому, что конечный зазор может быть достаточно большим (до $5 \cdot 10^{-3}$), а ход якоря может составлять доли миллиметра. В реле тока уставка тока срабатывания регулируется в пределах 30—65% номинального значения путем изменения начального усилия сжатия пружины 5.

В реле напряжения уставка срабатывания меняется в пределах 30—50% U_n . При увеличении сжатия пружины растет напряжение трогания $U_{тр}$, увеличивается время трогания согласно уравнению

$$t_{тр} = \frac{L_p}{R_p} \ln \frac{1}{1 - U_{тр}/U},$$

где L_p — индуктивность и R_p — сопротивление цепи обмотки реле. С увеличением напряжения трогания $U_{тр}$ изменяется коэффициент возврата реле.

Для увеличения быстродействия реле напряжения рекомендуется брать реле на низкое номинальное напряжение (24 или 48 В) и последовательно включать добавочный резистор из константана.

Добавочный резистор позволяет увеличить напряжение, при котором срабатывает реле. Сопротивление его выбирается таким образом, чтобы ток срабатывания лежал в пределах, обеспечивающих быстродействие реле ($0,3 I_n \leq I_{ср} \leq 0,5 I_n$).

Следует отметить, что включение добавочного резистора, если он выполнен из константана, уменьшает зависимость напряжения срабатывания от температуры.

Коэффициент возврата регулируется путем изменения конечного зазора. Для реле рис. 11-6 регулировка конечного зазора δ_k и хода якоря осуществляется с помощью неподвижных контактов 10 и 9. При подъеме контакта 10 зазор δ_k увеличивается. При опускании контакта 9 уменьшается ход якоря. Минимальное значение раствора контактов δ_2 равно 1,5 мм.

в) **Реле защиты схем электропривода.** На рис. 11-7 представлена упрощенная схема защиты двигателя постоянного тока от коротких замыканий. При повреждении якоря двигателя Я срабатывает максимальное мгновенное реле РМ и размыкает свои контакты РМ в цепи катушки линейного контактора Л. Якорь последнего отпадает. При этом обесточивается цепь якоря двигателя. Так как ток в якоре стал равным нулю, происходит отпускание реле РМ, контакты его замыкаются и цепь катушки контактора подготавливается к следующему включению.

При отключении контактора его блок-контакт БКЛ размыкается, поэтому при замыкании контактов РМ контактор Л не включится вновь. Характерным для схем является возврат реле РМ в исходное положение при токе в обмотке, равном нулю. Поэтому к реле

максимальной токовой защиты двигателя не предъявляются требования высокого коэффициента возврата.

В целом ряде схем управление производится не с помощью кнопки, а с помощью командоконтроллера *КК* (рис. 11-7). В этом случае после обесточивания якорной цепи двигателя реле *РМ* отпустит свой якорь и контакты этого реле подадут напряжение на катушку линейного контактора. Произойдет повторное включение на короткое замыкание. При этом последует новое отключение и т. д. В результате повреждений двигатель будет многократно включаться в сеть.

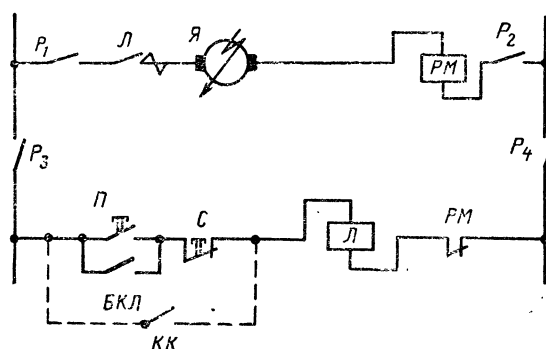


Рис. 11-7. Схема включения реле максимального тока.

Для устранения этого недостатка реле снабжаются специальным устройством, предотвращающим возврат реле в исходное состояние после прекращения тока в катушке. Такие реле называются реле без самовозврата, их принцип действия рассмотрен ниже. Возврат реле в исходное положение после срабатывания возможен либо вручную, либо с помощью специального электромагнита (дистанционный возврат).

Основными требованиями, предъявляемыми к реле, является быстрое срабатывание ($t_{ср} \leq 0,05$ с), широкая регулировка тока срабатывания, вибро- и ударостойкость.

Реле могут быть использованы и для защиты от перегрузки. В этом случае выдержка времени, независимая от тока перегрузки, создается отдельным реле времени. Такая защита является несовершенной, так как долговечность оборудования зависит не только от величины тока перегрузки, но и от длительности его протекания. Более совершенной является тепловая защита (§ 11-4).

На рис. 11-8 показано реле серии РЭВ, предназначенное для работы в схемах электропривода переменного тока. Эти реле используются для защиты от токов короткого замыкания, от перегрузок (в совокупности с реле времени). В реле используется простейшая клапанная система. Для повышения механической износостойкости используется призматическая опора якоря. Реле может иметь и параллельную обмотку. В этом случае оно используется как реле напряжения для защиты от исчезновения питания. Эти же реле могут использоваться как промежуточное реле. Поскольку реле

ле работает на переменном токе, магнитопровод шихтуется из электротехнической стали. Токовые реле в исходном положении работают с разомкнутой магнитной системой. Поэтому короткозамкнутый виток не устанавливается на полюсе. Реле напряжения работают, как правило, при исчезновении питания. Поэтому в исходном положении якорь притянут и находится в таком положении в течение нормальной работы схемы. Для устранения вибрации якоря на полюсный наконечник устанавливается короткозамкнутый виток. Катушки токовых реле выполняются на номинальные токи от 2,5 до

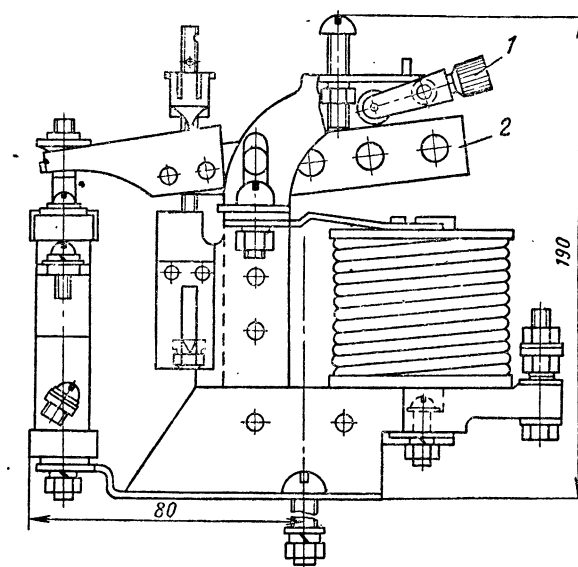


Рис. 11-8. Токовое реле переменного тока без самовозврата.

600 А. Регулирование тока при данной катушке производится за счет изменения натяжения пружины в весьма широких пределах (от 110 до 700% I_n).

Реле напряжения допускают регулировку срабатывания в пределах 70—85% номинального напряжения. Коэффициент возврата лежит в пределах 0,2—0,4, так что реле напряжения защищают фактически от потери напряжения. Реле имеют контактную систему с замыкающим и размыкающим контактами.

Реле выпускаются с самовозвратом и без самовозврата с ручным приводом защелки.

Защелка не уравновешена: левая часть тяжелее, чем правая. При притяжении якоря под действием сил тяжести защелка 1 поворачивается против часовой стрелки и запирает якорь 2 в притянутом положении. Для возврата якоря необходимо нажать на рифленую головку защелки.

Время срабатывания реле серии РЭВ 0,06 с, а время возврата — 0,07 с.

11-4. Тепловые реле

а) **Принцип действия.** Долговечность энергетического оборудования в значительной степени зависит от перегрузок, которым оно подвергается во время работы. Для любого объекта можно найти зависимость длительности протекания тока от его величины, при которых обеспечивается надежная и длительная эксплуатация оборудования. Эта зависимость представлена на рис. 11-9 (кривая 1). При номинальном токе допустимая длительность его протекания равна бесконечности. Протекание тока, большего, чем номинальный, приводит к дополнительному повышению температуры и дополнительному старению изоляции. Поэтому чем больше перегрузка, тем кратковременнее она допустима. Кривая 1 рис. 11-9 устанавливается исходя из требуемой продолжительности жизни оборудования. Чем короче его жизнь, тем большие перегрузки допустимы.

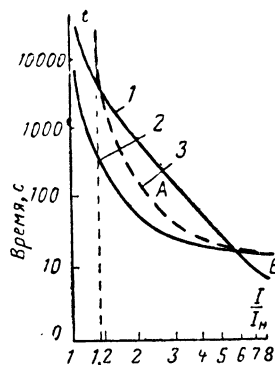


Рис. 11-9. Время-токовые характеристики теплового реле и защищаемого объекта.

Очевидно, что при идеальной защите объекта зависимость $t_{cr}(I)$ для реле должна идти немного ниже кривой для объекта.

Для защиты от перегрузок наиболее широкое распространение получили тепловые реле с биметаллической пластиной.

Биметаллическая пластина состоит из двух пластин, одна из которых имеет больший температурный коэффициент расширения α_1 , другая — меньший α_2 . В месте прилегания друг к другу пластины жестко скреплены либо за счет проката в горячем состоянии, либо за счет сварки. Если закрепить неподвижно такую пластину и нагреть, то произойдет изгиб пластины в сторону материала с меньшим α . Именно это явление используется в тепловых реле.

При превышении температуры τ максимальный прогиб согласно [Л. 1-3] равен:

$$x_{\max} = \frac{3}{4} (\alpha_1 - \alpha_2) \frac{l^2 \tau}{\delta}, \quad (11-4)$$

где α_1 — температурный коэффициент расширения термоактивного материала;
 α_2 — температурный коэффициент расширения терморезистивного материала;
 δ — суммарная толщина пластины;
 l — ее длина.

Свободный конец пластины развивает силу, равную:

$$F = \frac{3}{16} (\alpha_1 - \alpha_2) \frac{b\delta^3}{l} E\tau, \quad (11-5)$$

где b — ширина пластины;
 $E = (E_1 + E) / 2$ — средний модуль упругости пластины.
 Вывод уравнения (11-5) дан в [Л. 1-3].

Из уравнений (11-4) и (11-5) видно, что прогиб и сила тем больше, чем больше $\alpha_1 - \alpha_2$.

Широкое распространение в тепловых реле получили материалы инвар (малое значение α) и немагнитная или хромоникелевая сталь (большое значение α).

Для получения большего прогиба необходимо, чтобы пластина имела большую длину и малую толщину. Наоборот, если необходимо, чтобы пластина развивала большую силу, целесообразно иметь широкую пластину с малой длиной и большой толщиной.

При работе биметаллической пластины в ее компонентах возникают напряжения сжатия и растяжения, которые не должны превышать допустимых значений.

Нагрев биметаллического элемента может производиться за счет тепла, выделяемого в пластине током нагрузки. Очень часто нагрев биметалла производится от специального нагревателя, по которому протекает ток нагрузки. Лучшие характеристики получаются при комбинированном нагреве, когда пластина нагревается и за счет тепла, выделяемого током, проходящим через биметалл, и за счет тепла, выделяемого специальным нагревателем, также обтекаемым током нагрузки.

Прогибаясь, биметаллическая пластина своим свободным концом воздействует на контактную систему. Поскольку пластина прогибается медленно, целесообразно применять прыгающие контакты (см. рис. 11-11).

Основной характеристикой реле является зависимость времени срабатывания от тока нагрузки (время-токовая характеристика). В общем случае до начала перегрузки через реле протекает ток I_0 , который нагре-

вает пластину до температуры θ_0 . Зависимость времени срабатывания от тока для этого случая имеет вид:

$$t_{\text{ср}} = T \ln \frac{I^2 - I_0^2}{I^2 - I_\infty^2}, \quad (11-6)$$

где T — постоянная времени нагрева;
 I_0 — ток предварительной нагрузки;
 I_∞ — ток, при котором реле срабатывает за время $t \gg T$;
 I — ток, при котором реле срабатывает за время $t_{\text{ср}}$.

Вывод (11-6) приведен в [Л. 5-4].

Токи удобно выразить в относительных единицах:

$$x = I/I_n; \quad x_{\text{ср}} = I_\infty/I_n; \quad \varepsilon = I_0/I_n.$$

Тогда получим:

$$t_{\text{ср}} = T \ln \frac{x^2 - \varepsilon^2}{x^2 - x_{\text{ср}}^2}. \quad (11-7)$$

Если реле включается в работу в холодном состоянии ($\varepsilon = 0$), то

$$t_{\text{ср}} = T \ln \frac{x^2}{x^2 - x_{\text{ср}}^2}. \quad (11-8)$$

На рис. 11-10 изображены зависимости $t_{\text{ср}} = f(x)$ для случая $\varepsilon = 0$ (кривая 1) и $\varepsilon \neq 0$ (кривая 2). Обе кривые имеют одинаковые асимптоты и различаются в средней части.

Для режима короткого замыкания процесс нагрева идет без отдачи тепла и время срабатывания согласно [Л. 5-4] равно:

$$t_{\text{ср}} = T x_{\text{ср}}^2 / x^2.$$

У ряда реле время срабатывания при коротком замыкании больше, чем время термической стойкости при данном токе. Поэтому от коротких замыканий цепь и само реле нужно защищать с помощью предохранителей (рис. 10-14).

Для согласования характеристик объекта и реле строится время-токовая характеристика защищаемого объекта по заводским данным или по данным расчета

[Л. 5-4] и аналогичная характеристика биметаллического элемента. Ток $I_{ср}$ составляет (1,2—1,3) I_n . Защитные характеристики биметаллического элемента строятся для двух случаев, когда $\epsilon=0$ и когда $\epsilon=1$. При правильном выборе реле его время-токовая характеристика при $\epsilon=0$ должна проходить вблизи характеристики защищаемого объекта. Тогда при предварительном подогреве номинальным током реле обеспечивает надежную

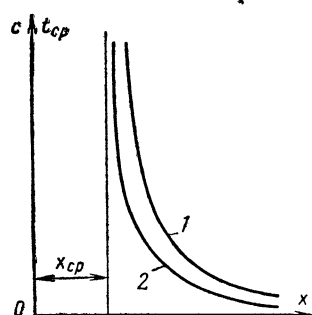


Рис. 11-10. Характеристики теплового реле при $\epsilon=0$ и $\epsilon=1$.

защиту. На рис. 11-9 представлены характеристики двигателя и двух реле. У одного реле (кривая 2) ток срабатывания равен току двигателя (кривая 1), у другого он на 20% больше (кривая 3). В первом случае двигатель будет отключаться значительно раньше, чем требуется характеристикой 1.

Необходимо отметить, что постоянная времени нагрева двигателя зависит от характера перегрузки. При кратковременных перегрузках в нагреве участвует только обмотка

и постоянная времени получается небольшой (5—10 мин) ввиду относительно малой массы обмотки. При длительной перегрузке в нагреве участвует вся масса машины. При этом постоянная времени достигает 40—60 мин. Для совершенной защиты необходимо, чтобы постоянная времени реле была такой же, как и у объекта. В известной степени это удастся получить, если создать реле для защиты конкретного двигателя. Поскольку одно и то же реле выпускается для двигателей различной конструкции, то в области малых перегрузок не удастся получить хорошую защиту.

Для быстросрабатывающей защиты и объекта и реле целесообразно тепловой элемент объединить с электромагнитным, имеющим большой ток срабатывания и практически нулевую выдержку времени.

В эксплуатации согласование реле защиты и объекта производится выбором номинального тока реле равным номинальному току двигателя. Срабатывание реле происходит при (1,2—1,3) I_n . Время срабатывания 20 мин.

Нагрев биметаллической пластинки зависит от температуры окружающей среды, поэтому с ростом температуры окружающей среды ток срабатывания уменьшается. Для номинальной окружающей температуры θ_n (обычно $+40^\circ\text{C}$) на основании закона Ньютона можно записать:

$$I_{\text{ср},n}^2 = a(\theta_{\text{ср}} - \theta_n), \quad (11-9)$$

где a — конструктивный параметр, зависящий от размеров, материала и коэффициента теплоотдачи.

При условиях, отличных от номинальных,

$$I_{\text{ср}}^2 = a(\theta_{\text{ср}} - \theta). \quad (11-10)$$

Воспользовавшись (11-9) и (11-10), можно получить:

$$I_{\text{ср}} = I_{\text{ср},n} \sqrt{\frac{\theta_{\text{ср}} - \theta}{\theta_{\text{ср}} - \theta_n}}. \quad (11-11)$$

При температуре, сильно отличающейся от номинальной, необходимо либо проводить дополнительную (плавную) регулировку реле, либо подбирать нагревательный элемент с учетом реальной температуры окружающей среды θ . Для того чтобы температура окружающей среды меньше влияла на ток срабатывания, необходимо, чтобы температура срабатывания $\theta_{\text{ср}}$ выбиралась возможно больше. Для правильной работы тепловой защиты реле желательно располагать в том же помещении, что и защищаемый объект. Нельзя располагать реле вблизи концентрированных источников тепла — нагревательных печей, систем отопления и т. д. В настоящее время выпускаются реле с температурной компенсацией (серии ТРН).

б) **Конструкция тепловых реле.** Прогиб биметаллической пластины происходит медленно. Если с пластиной непосредственно связать подвижный контакт, то малая скорость его движения, не сможет обеспечить гашение дуги, возникающей при отключении цепи. Поэтому пластина действует на контакт через ускоряющее устройство. Наиболее совершенным является «прыгающий» контакт (рис. 11-11).

В обесточенном состоянии пружина 1 создает момент относительно точки 0, замыкающий контакты 2. Биметаллическая пластина 3 при нагреве изгибается вправо, положение пружины изменяется. Она создает момент, размыкающий контакты 2 за время, обеспечивающее надежное гашение дуги.

Современные контакторы и пускатели комплектуются с тепловыми реле ТРП (однофазное) и ТРН (двухфазное). Реле типа ТРП представлено на рис. 11-12. Биметаллическая пластина имеет ком-

бинированную систему нагрева. Пластина 1 нагревается как за счет нагревателя 5, так и за счет прохождения тока через саму пластину. При прогибе конец биметаллической пластины воздействует на прыгающий контактный мостик 3. Реле позволяет иметь плавную регулировку тока срабатывания в пределах ($\pm 25\%$ номинального тока уставки). Эта регулировка осуществляется ручкой 2, меняющей первоначальную деформацию пластины. Такая регулировка позволяет резко снизить число потребных вариантов нагревателя. Возврат реле в исходное положение после срабатывания производится

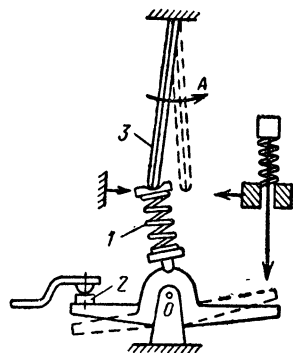


Рис. 11-11. Прыгающий контакт теплового реле.

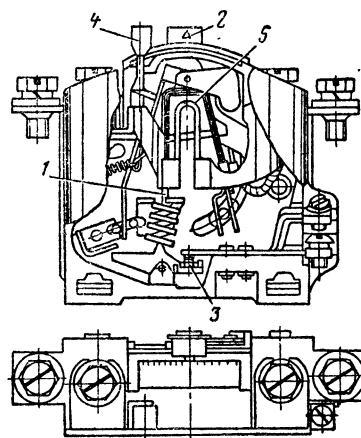


Рис. 11-12. Тепловое реле ТРП.

кнопкой 4. Возможно исполнение и с самовозвратом после остывания биметалла. Высокая температура срабатывания (выше 200°C) уменьшает зависимость работы реле от температуры окружающей среды. Уставка меняется на 5% при изменении температуры окружающей среды на 10°C . Высокая ударо- и вибростойкость реле позволяют использовать его в самых тяжелых условиях.

11-5. Поляризованные реле

В поляризованных реле контакты приводятся в действие поляризованным электромагнитом, в котором на якорь действуют два потока: поляризующий, создаваемый постоянным магнитом, и поток, создаваемый катушкой, по которой проходит управляющий ток.

Отличительной особенностью поляризованного электромагнита является изменение направления силы, действующей на якорь, при изменении направления тока в катушке.

На рис. 11-13, а показана поляризованная система, получившая большое применение благодаря своей чувствительности и быстродействию. На том же рисунке дана примерная картина потоков в системе. Схема замещения представлена на рис. 11-13, б.

Потоки постоянного магнита в зазорах δ_1 и δ_2 равны:

$$\Phi_{m1} = \frac{\theta_m}{R_{\delta 1} + R_{\delta}}; \quad \Phi_{m2} = \frac{\theta_m}{R_{\delta 2} + R_{\delta}}, \quad (11-12)$$

где θ_m — м. д. с. постоянного магнита;
 $R_{\delta 1}$ и $R_{\delta 2}$ — магнитные сопротивления зазоров δ_1 и δ_2 ;
 R_{δ} — магнитное сопротивление паразитного зазора δ .

Поток от управляющей катушки равен:

$$\Phi_k = \frac{\theta_k}{R_{\delta 1} + R_{\delta 2}}. \quad (11-13)$$

Результирующая сила, действующая на конец якоря, равна разности сил, создаваемых в зазорах δ_1 и δ_2 .

Воспользовавшись формулой (5-52), получим:

$$F_{я.рез} = F_{\delta 1} - F_{\delta 2} = \frac{1}{2\mu_0 S_{\Pi}} [(\Phi_{m1} - \Phi_k)^2 - (\Phi_{m2} + \Phi_k)^2], \quad (11-14)$$

где S_{Π} — площадь полюса рабочего зазора.

Срабатывание произойдет тогда, когда сила $F_{я.рез}$ изменит свое направление, т. е. будет соблюдено следующее неравенство

$$F_{я.рез} \leq 0. \quad (11-15)$$

Для определения потока срабатывания $\Phi_{к.ср}$ восполь-

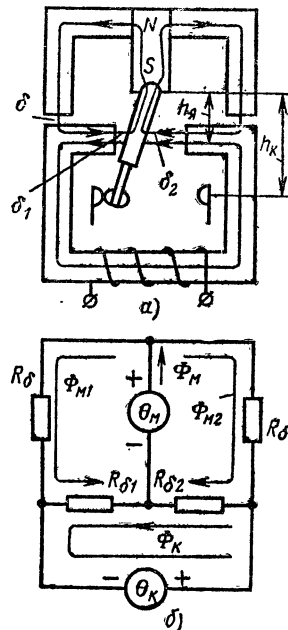


Рис. 11-13. Поляризованное реле.

зуемся уравнениями (11-14) и (11-15):

$$(\Phi_{M1} + \Phi_{M2})(\Phi_{M1} - \Phi_{M2} - 2\Phi_{K.ср}) = 0.$$

Поскольку $\Phi_{M1} + \Phi_{M2} \neq 0$, то

$$\Phi_{K.ср} = \frac{\Phi_{M1} - \Phi_{M2}}{2}. \quad (11-16)$$

Тогда из уравнений (11-12) — (11-14) получим:

$$\theta_{K.ср} = \frac{1}{2} \theta_M \frac{\delta_2^2 - \delta_1^2}{(\delta + \delta_1)(\delta + \delta_2)}. \quad (11-17)$$

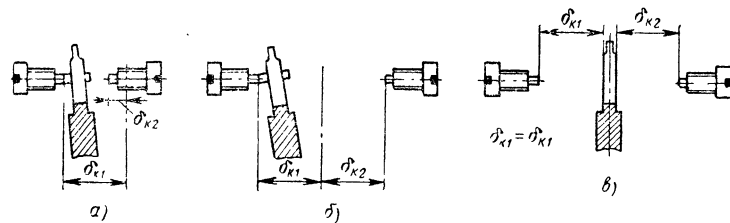


Рис. 11-14. Исполнения контактной системы поляризованного реле.

Если δ_1 приблизить к δ_2 , то можно получить очень малую м. д. с. срабатывания. Благодаря этому мощность срабатывания у чувствительных поляризованных реле составляет всего 10^{-6} Вт. Следует отметить, что сила нажатия подвижного контакта на неподвижный определяется разностью зазоров δ_1 и δ_2 .

Из геометрии системы реле рис. 11-13 следует:

$$F_K = F_{\text{я}} \frac{h_{\text{я}}}{h_K} = \frac{1}{2\mu_0 S_{\text{п}}} (\Phi_{M1}^2 - \Phi_{M2}^2) \frac{h_{\text{я}}}{h_K}.$$

Чем ближе зазор δ_1 к зазору δ_2 , тем меньше сила, действующая на контакты. Обычно нажатие контактов в этих реле составляет всего $1-5 \cdot 10^{-2}$ Н.

Поляризованные реле могут иметь различное исполнение контактной системы (рис. 11-14). В первом исполнении контакты регулируются так, как показано на рис. 11-14, а. При подаче тока в направлении срабатывания размыкается левый и замыкается правый контакты. При отключении тока снова замыкается левый контакт (однопозиционная настройка с преобладанием). В случае, изображенном на рис. 11-14, б, система имеет

двухпозиционную настройку. Положение контактов зависит от полярности предыдущего импульса тока.

Если якорь укреплен на плоской пружине, как это показано на рис. 11-14, *в*, то он находится в нейтральном положении. В зависимости от полярности тока замыкается левый или правый контакт. После отключения тока якорь возвращается в нейтральное положение.

Широкое распространение получили реле типа РП. Эти реле допускают максимальную частоту переключений до 200 в секунду. Магнитодвижущая сила срабатывания 1,5—5 А. Нажатие контактов при отсутствии тока в обмотке $1-5 \cdot 10^{-2}$ Н, длительный ток контактов 0,2 А, напряжение управляемой цепи 24 В. Поляризованные реле имеют следующие преимущества перед электромагнитными:

- 1) направленностью действия в зависимости от направления тока в рабочей обмотке;
- 2) обладают очень высокой чувствительностью;
- 3) позволяют создать быстродействующие аппараты с временем срабатывания около 2 мс;
- 4) обладают высокой устойчивостью к перегрузкам. Допустимая кратность тока через обмотку к току срабатывания достигает 20;
- 5) за счет расположения упоров можно осуществлять однопозиционную, нейтральную и двухпозиционную настройки реле.

Глава двенадцатая

РЕЛЕ ВРЕМЕНИ

12-1. Общие сведения

При работе схем защиты и автоматики часто требуется создать выдержку времени между срабатыванием двух или нескольких аппаратов. При автоматизации технологических процессов также может возникнуть необходимость производить операции в определенной временной последовательности.

Для создания выдержки времени служат аппараты, называемые реле времени.

Общими требованиями для реле времени являются:

- а) стабильность выдержки времени вне зависимости от колебаний питающего напряжения, частоты, температуры окружающей среды и других факторов;

- б) малые потребляемая мощность, масса и габариты;
- в) достаточная мощность контактной системы.

Возврат реле в исходное положение происходит, как правило, при его обесточивании. Поэтому к коэффициенту возврата не предъявляется особых требований, и он может быть очень низким.

В зависимости от назначения реле к ним предъявляются специфические требования.

Для схем автоматического управления приводом при большой частоте включений в час требуются реле с высокой механической износостойкостью $(5-10)10^6$ срабатываний. Требуемые выдержки времени находятся в пределах 0,25—10 с. К этим реле не предъявляются высокие требования относительно точности работы. Разброс времени срабатывания может достигать 10%. Реле должны работать в условиях производственных цехов, при вибрации и тряске.

Реле для защиты энергосистем должны иметь большую точность выдержки времени. Эти реле работают относительно редко, поэтому к ним не предъявляются особые требования по износостойкости. Износостойкость реле времени защиты порядка $(5-10)10^3$ срабатываний. Выдержки времени таких реле составляют 0,1—20 с.

Для автоматизации технологических процессов необходимо создание больших выдержек времени, начиная от нескольких минут и до часа.

12-2. Реле с электромагнитным замедлением

а) **Устройство реле и влияние различных факторов на его работу.** Принцип электромагнитного замедления рассмотрен в § 5-7.

Конструкция реле с электромагнитным замедлением типа РЭВ-800 изображена на рис. 12-1. Магнитная цепь реле состоит из магнитопровода 1, якоря 2 и немагнитной прокладки 3. Магнитопровод укрепляется на плите 4 с помощью литого алюминиевого цоколя 5. Этот же цоколь служит для крепления контактной системы 6.

На ярме прямоугольного сечения магнитопровода устанавливается короткозамкнутая обмотка в виде сплюснутой гильзы 8. Намагничивающая обмотка 7 устанавливается на цилиндрическом сердечнике. Якорь вращается относительно стержня 1 на призме. Усилие, развиваемое пружиной 9, изменяется с помощью корон-

чатой гайки 10, которая фиксируется после регулировки с помощью шплинта.

Магнитопровод реле выполняется из стали ЭАА. Сердечник катушки имеет круглое сечение, что позволяет применять катушку цилиндрической формы, удобную в производстве. Стержень 1 имеет сечение вытянутого прямоугольника, что увеличивает длину линии касания якоря с торцом ярма и повышает механическую износостойкость реле.

Для получения большого времени при отпуске необходимо иметь высокую магнитную проводимость рабочего и паразитного зазоров в замкнутом состоянии магнитной системы (см. § 5-7). С этой целью торцы ярма и сердечника и прилегающая к ним поверхность якоря тщательно шлифуются.

Литое основание из алюминия создает дополнительный короткозамкнутый виток, увеличивающий выдержку времени (в схеме замещения все короткозамкнутые обмотки заменяются одним витком с суммарной электрической проводимостью).

У реальных магнитных материалов после отключения намагничивающей обмотки поток спадает до $\Phi_{ост}$, который определяется свойствами материала магнитопровода и геометрическими размерами магнитной цепи (см. § 5-8). Чем меньше коэрцитивная сила магнитного материала при заданных размерах магнитной цепи, тем ниже величина остаточной индукции, а следовательно, остаточного потока. При этом возрастает наибольшая выдержка времени, которая может быть получена от реле. Применение стали ЭАА, имеющей низкое значение H_c , позволяет увеличить выдержку времени реле.

Выдержка времени для насыщенной системы может быть найдена с помощью формулы (5-90) (см. § 5-7):

$$t = \frac{\omega^2}{R} \int_{\Phi_0}^{\Phi_{отп}} \frac{d\Phi}{i\omega}, \quad (12-1)$$

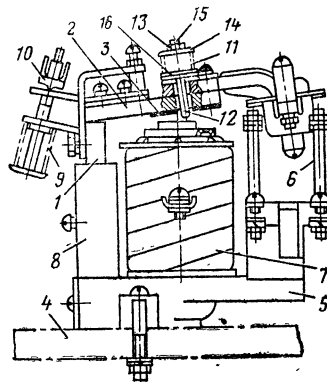


Рис. 12-1. Реле с электромагнитным замедлением.

где ω — число витков короткозамкнутой обмотки;

R — ее сопротивление;

i — ток в короткозамкнутой обмотке.

Можно показать [Л. 5-1], что для получения большой выдержки времени желательно иметь высокую магнитную проницаемость на ненасыщенном участке кривой намагничивания. Этому требованию сталь ЭАА также удовлетворяет.

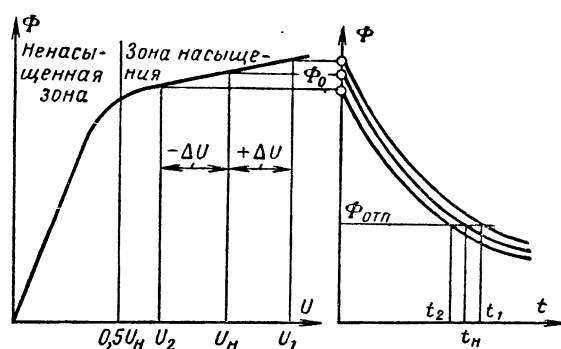


Рис. 12-2. Зависимость времени отпущения от напряжения питания.

Выдержка времени при прочих равных условиях определяется начальным потоком Φ_0 уравнения (12-1). Этот поток определяется кривой намагничивания магнитной системы в замкнутом состоянии. Поскольку напряжение и ток в обмотке пропорциональны друг другу, то зависимость $\Phi(U)$ повторяет, только в другом масштабе, зависимость $\Phi(I\omega)$. Если система при номинальном напряжении не будет насыщена, то поток Φ_0 будет в сильной степени зависеть от питающего напряжения. При этом выдержка времени также будет зависеть от напряжения, приложенного к обмотке. В схемах привода на обмотку реле часто подается напряжение ниже номинального, при этом реле будет иметь пониженные выдержки времени. Для того чтобы сделать выдержку времени реле независимой от питающего напряжения, магнитная цепь делается сильно насыщенной (рис. 12-2). В некоторых типах реле снижение напряжения на 50% не вызывает заметного изменения выдержки времени. В схемах автоматики напряжение на питающую ка-

тушку может подаваться кратковременно. Для того чтобы выдержка времени при отпускании была стабильной, необходимо, чтобы длительность приложения напряжения к питающей катушке была достаточная для достижения потоком установившегося значения. Это время называется временем подготовки или зарядки реле. Если длительность приложения напряжения меньше времени подготовки, то выдержка времени уменьшается. В реле РЭВ-800 время зарядки составляет примерно 1 с.

На выдержку времени реле большое влияние оказывает температура короткозамкнутой обмотки. Согласно (12-1)

$$t = - \frac{1}{R_0 (1 + \alpha \theta)} \int_{\Phi_0}^{\Phi_{отп}} \frac{w d\Phi}{i} .$$

Заводы-изготовители гарантируют работу таких реле в диапазоне температур от -40 до $+60^\circ \text{C}$. Если считать, что температура короткозамкнутой обмотки равна окружающей температуре, то при указанном изменении температуры сопротивление, а следовательно, и выдержка времени изменятся почти в 1,5 раза. В среднем можно считать, что изменение температуры на 10°C ведет к изменению времени выдержки на 4%. Зависимость выдержки времени от температуры является одним из основных недостатков этого реле.

б) Схемы включения реле. Время срабатывания реле при подаче напряжения очень мало, так как м. д. с. трогания значительно меньше установившегося значения. Для реле с короткозамкнутым витком это время равно 0,05—0,2 с. При отсутствии короткозамкнутого витка это время составляет всего 0,02—0,05 с. Таким образом, возможности реле с электромагнитным замедлением при срабатывании очень ограничены. Если необходимо при замыкании управляющих контактов иметь большие выдержки времени, то целесообразно применить схему с промежуточным реле *РП* (рис. 12-3, а). Обмотка реле времени *РВ* находится под напряжением, все время питаясь через размыкающий контакт реле *РП*. При подаче напряжения на обмотку *РП* последнее размыкает свой контакт и обесточивает реле *РВ*. Якорь *РВ* отпадает, создавая необходимую выдержку времени. Ре-

ле $PВ$ в этой схеме должно обязательно иметь короткозамкнутый виток.

В некоторых схемах реле времени может не иметь короткозамкнутого витка. Роль этого витка играет сама намагничивающая обмотка, замкнутая накоротко (рис. 12-3, б). Обмотка $PВ$ питается через резистор $R_{доб}$. Величина напряжения на $PВ$ должна быть доста-

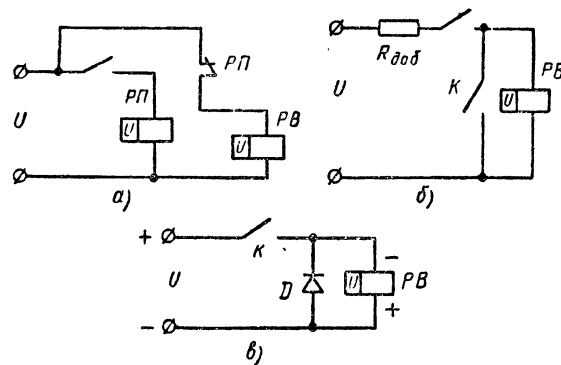


Рис. 12-3. Схемы включения реле с электромагнитным замедлением.

точной для достижения потока насыщения в замкнутом состоянии магнитной цепи. При замыкании управляющего контакта K обмотка реле закорачивается, обеспечивая медленный спад потока в магнитной цепи. Отсутствие короткозамкнутой обмотки позволяет все окно магнитной системы занять намагничивающей обмоткой и создать большой запас в м. д. с. При этом выдержка времени не уменьшается даже в том случае, когда питающее напряжение на обмотке составляет $0,5 U_n$. Такая схема широко применяется в электроприводе. Реле включается параллельно ступени пускового резистора в цепи якоря. При закорачивании этой ступени обмотка реле времени замыкается и с выдержкой это реле производит включение контактора, шунтирующего следующую ступень пускового резистора.

Применение полупроводникового вентиля также позволяет использовать реле без короткозамкнутого витка (рис. 12-3, в). При включении питающей обмотки ток через вентиль практически равен нулю, так как он включен в непроводящем направлении. При отключении контакта K поток в магнитной цепи спадает, при этом на

зажимах обмотки появляется э.д.с. с полярностью, указанной на рис. 12-3, *в*. При этом через вентиль протекает ток, определяемый этой э. д. с., активным сопротивлением обмотки и вентиля и индуктивностью обмотки.

Для того чтобы прямое сопротивление вентиля не приводило к уменьшению выдержки времени (растет активное сопротивление короткозамкнутой цепи), это сопротивление должно быть на один-два порядка ниже сопротивления намагничивающей обмотки реле.

При любых схемах питания намагничивающей обмотки реле должно производиться либо от источника постоянного тока, либо от источника переменного тока с применением мостовой схемы на полупроводниковых вентилях.

в) Регулирование времени работы реле. Время срабатывания реле можно плавно регулировать с помощью возвратной пружины 9 (рис. 12-1). С увеличением сжатия этой пружины увеличивается сила, необходимая для трогания якоря. Эта сила определяется потоком в магнитной цепи. При большем натяге пружины поток трогания возрастает. Следовательно, возрастает время трогания. Ввиду того что в разомкнутом положении магнитной цепи постоянная времени мала, максимальные выдержки времени также незначительны (около 0,2 с). Выдержка времени может быть значительно увеличена, если поток трогания приблизить к установившемуся потоку. Однако в этом случае реле работает на пологой части кривой $\Phi(t)$, при этом наблюдаются большие разбросы времени срабатывания. В некоторых случаях якорь может вообще не притянуться к сердечнику.

В том случае, когда необходимо иметь время выдержки около 1 с и более, необходимо использовать реле при отпускании якоря.

Регулировка выдержки времени реле при отпускании может производиться плавно и скачком.

Плавное регулирование выдержки времени производится изменением силы, развиваемой пружиной 11 (рис. 12-1). Эта пружина верхним концом упирается в шайбу 14, которая удерживается шпилькой 15, ввернутой в якорь реле. Нижний конец пружины посредством специальной пластины 16 передает силу на два латунных штифта 12, которые могут свободно перемещаться в отверстиях якоря. Оси латунных штифтов 12 смещены относительно оси пружины. В притянutom положении

нии якоря 2 штифты 12 перемещаются вверх и пружина 11 дополнительно сжимается.

Пружина 11 создает основную силу, отрывающую якорь от сердечника. Начальное сжатие пружины изменяется с помощью гайки 13.

С увеличением силы пружины 11 сила, при которой происходит отрыв якоря, увеличивается, следовательно, возрастает и поток отпущения $\Phi_{отп}$. При этом время от-

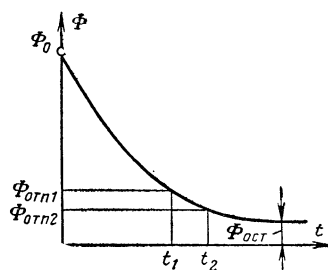


Рис. 12-4. Регулировка времени отпущения с помощью пружины.

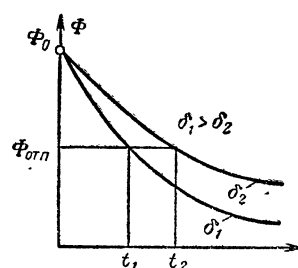


Рис. 12-5. Регулировка времени отпущения немагнитным зазором.

пускания уменьшается (рис. 12-4). Чем меньше сила пружины, тем больше выдержка времени. По мере приближения $\Phi_{отп}$ к остаточному потоку $\Phi_{ост}$ выдержка времени начинает резко возрастать. Нестабильность работы механизма может приводить к большим разбросам во времени срабатывания. Поэтому работа при выдержках времени, больших, чем рекомендуются заводом, нежелательна, хотя и возможна. Следует отметить, что при $\Phi_{отп}$, близком к $\Phi_{ост}$, якорь реле вообще может не отпадать от сердечника.

Возвратная пружина 9 регулируется таким образом, чтобы обеспечить необходимое нажатие размыкающих контактов реле и четкий возврат якоря в положение, указанное на рис. 12-1 (после того как якорь оторвется от сердечника).

Грубо выдержка времени в реле может регулироваться толщиной немагнитной прокладки. Поскольку магнитная цепь в замкнутом положении насыщена, то толщина немагнитной прокладки мало сказывается на величине установившегося потока. При уменьшении толщины немагнитной прокладки возрастает индуктивность катушки

в ненасыщенном состоянии сердечника и уменьшается скорость спада потока. В результате при неизменной силе возвратной пружины выдержка времени увеличивается (рис. 12-5). Минимальную толщину немагнитной прокладки не рекомендуется брать менее 0,1 мм. В повторно-кратковременном режиме работы якорь расклепывает немагнитную прокладку, при этом толщина ее падает, что ведет к изменению выдержки времени. Если толщина немагнитной прокладки $\delta \geq 0,1$ мм, то нестабильностью работы за счет расклепа прокладки можно пренебречь.

В заключение следует отметить, что электромагнитные реле времени имеют простой механизм, который не боится ударов и вибраций, обладающий большой износостойкостью. Допустимое число включений в час равно 600.

Реле описанного типа могут использоваться в схемах автоматики электропривода как реле тока, напряжения и промежуточные реле. Коэффициент возврата этих реле низок и составляет всего 0,1—0,3. Короткозамкнутые витки создают замедление как при притяжении, так и при отпускании якоря. Поэтому токовые реле с короткозамкнутым витком не реагируют на кратковременные перегрузки. При кратковременных перегрузках магнитодвижущая сила основной обмотки будет пропорциональна этим перегрузкам. Однако из-за демпфирующего действия короткозамкнутого витка поток не достигает значения срабатывания. В результате при кратковременных пиковых перегрузках, безопасных для двигателя, реле не производит отключения двигателя.

В том случае, когда требуется быстрое срабатывание реле, короткозамкнутые витки снимаются с магнитной системы.

В настоящее время отечественная промышленность выпускает большое число модификаций реле с электромагнитным замедлением, обеспечивающим выдержки времени при отпускании от 0,3 до 5 с. Реле, выпускаемые в последние годы, имеют контакты в виде унифицированных блок-контактных узлов БКМ. Реле может иметь один или два таких узла. Каждый узел имеет один замыкающий и один размыкающий контакты с общей точкой. Постоянный ток включения контактов 10 А при 110 В и 5 А при 220 В. Ток отключения для индуктивной цепи (катушки реле, контакторов) составляет 0,2 А, для активной — 0,5 А.

12-3. Реле с механическим замедлением

а) Реле с пневматическим замедлением и с анкерным механизмом. В таких реле электромагнит постоянного или переменного тока воздействует на контактную систему, связанную с замедляющим устройством в виде пневматического демпфера или в виде часового (анкерного) механизма. Выдержка времени меняется путем регулировки замедляющего устройства.

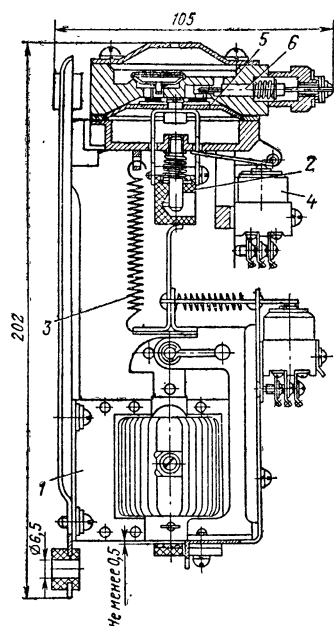


Рис. 12-6. Реле с пневматическим замедлением.

Большим преимуществом реле этого типа является возможность создания реле как на переменном, так и на постоянном токе. Работа реле практически не зависит от величины питающего напряжения, частоты питания, температуры.

Пневматическое реле РВП, применяемое в схемах автоматического управления приводом металлорежущих станков и других механизмов, представлено на рис. 12-6. При срабатывании электромагнита 1 освобождается колодка 2, которая под действием пружины 3 опускается вниз и воздействует на микропереключатель 4. Колодка 2 связана с диафрагмой 5. Скорость движения колодки определяется сечением отверстия, через которое засасывается воздух в верхнюю полость замедлителя. Выдержка времени регулируется иглой 6, меняющей сечение всасывающего отверстия.

Реле с пневматическим замедлением позволяет очень легко регулировать выдержку времени в диапазоне от 0,4 до 180 с. Точность работы реле $\pm 10\%$. Контактная система микропереключателя имеет длительный ток 3 А, ток отключения 0,21 А при переменном напряжении 380 В. Подробные сведения о реле приведены в [Л.11-3].

Реле с пневматическим замедлением позволяет очень легко регулировать выдержку времени в диапазоне от 0,4 до 180 с. Точность работы реле $\pm 10\%$. Контактная система микропереключателя имеет длительный ток 3 А, ток отключения 0,21 А при переменном напряжении 380 В. Подробные сведения о реле приведены в [Л.11-3].

Работа реле времени с замедлителем в виде анкерного механизма происходит в следующем порядке. При подаче напряжения на электромагнит якорь заводит пружину, под действием которой приводится в движение механизм реле. Контакты реле связаны с анкерным механизмом и приходят в движение лишь после того, как анкерный механизм отсчитает определенное время.

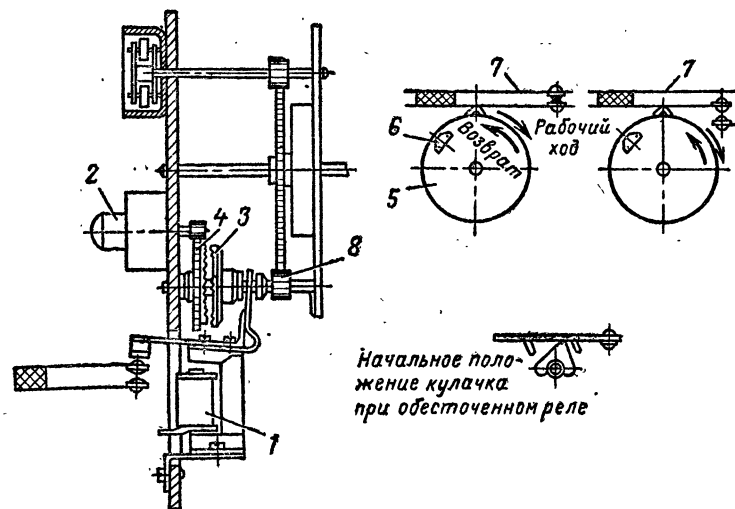


Рис. 12-7. Моторное реле.

Выдержка времени у этих реле регулируется в пределах от 7 до 17 с с точностью $\pm 10\%$ уставки. Реле также имеет и нерегулируемые, мгновенные контакты, которые связаны с якорем электромагнита. Реле надежно работают при напряжении до $0,85 U_n$.

Износостойкость часового механизма составляет всего 15 000 срабатываний, и реле не может применяться при частых операциях.

б) Моторные реле. Для создания выдержки времени в 20—30 мин используются моторные реле времени. Отечественная промышленность выпускает большую серию реле этого типа, обеспечивающих различные выдержки времени и имеющих различное исполнение контактов выходных цепей.

Рассмотрим принцип действия таких реле на примере реле типа РВТ-1200; его кинематическая схема изображена на рис. 12-7.

При срабатывании реле напряжение одновременно подается на электромагнит 1 и двигатель 2. При этом двигатель через муфту 3,4 и зубчатую передачу 8 вращает диски 5 с кулачками 6, воздействующими на контактную систему 7. Выдержка времени реле регулируется путем изменения начального положения диска 5.

Точность работы реле ± 5 с. Реле позволяет устанавливать различную выдержку времени в пяти совершенно независимых цепях. Выходные контакты реле имеют длительно допустимый ток 10 А. Контакты могут отключать при переменном токе нагрузки с мощностью 800 В·А при напряжении 220 В и 100 Вт при том же напряжении в сильно индуктивной цепи постоянного тока. Допустимые колебания напряжения (0,9—1,12) U_n . Износостойкость реле не менее 1000 коммутационных циклов. Время возврата не более 1 с. Выпускается целая серия таких реле с выдержкой времени от 1 с до 26 мин [Л.11-3].

12-4. Электронные реле времени

Для получения больших выдержек времени широко применяются реле времени, использующие электронную лампу. Принципиальная схема такого реле показана на рис. 12-8, а.

В цепи сетки лампы включены резистор R и конденсатор C . Конденсатор C заряжен до такого напряжения, при котором электронная лампа заперта и ток в анодной цепи равен нулю. Нагрузкой лампы является обмотка промежуточного реле постоянного тока $РП$. Контакты промежуточного реле являются выходными.

При отключении конденсатора от источника происходит разряд конденсатора через резистор R с постоянной времени $T=RC$. Отрицательный потенциал сетки падает, а анодный ток увеличивается (рис. 12-8, б). В момент достижения анодным током значения тока срабатывания $i_{ср}$ промежуточного реле последнее приводит в действие свои контакты.

Время срабатывания зависит от постоянной времени: чем больше произведение RC , тем медленней спадает отрицательный потенциал на сетке. Регулирование выдержки может производиться как за счет изменения активного сопротивления R , так и за счет изменения емкости C .

Теоретически такая схема может дать бесконечно большую выдержку времени. В действительности выдержка времени ограничивается из-за сопротивления утечки конденсатора и схемы.

Для того чтобы схема работала стабильно, сопротивление переменного резистора, включаемого параллельно конденсатору, должно быть значительно ниже сопротивления утечки.

Промежуточное реле имеет некоторый разброс тока трогания. Если реле работает на пологой части экспоненты разряда конден-

сатора, то разброс в токе трогания реле РП ведет к большим разбросам во времени срабатывания электронного реле. В связи с этим в современных реле времени конденсатор C не просто разряжается до нуля, а перезаряжается до другой полярности. При этом разброс уменьшается.

Серьезным недостатком электронных реле является ограниченный срок службы электронной лампы. При старении электронной лампы изменяется время срабатывания реле. Надежный срок ра-

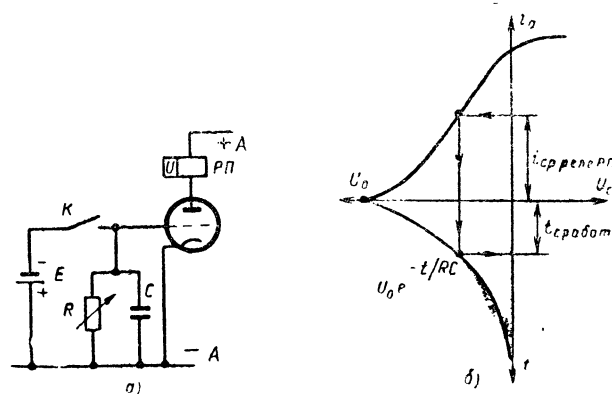


Рис. 12-8. Электронное реле времени.

боты электронной лампы составляет всего 500 ч, после чего она должна заменяться новой.

Перспективными являются полупроводниковые реле времени (§ 13-8). Они имеют малые габариты, малую потребляемую мощность и достаточную стабильность выдержки времени.

Глава тринадцатая

БЕСКОНТАКТНЫЕ АППАРАТЫ УПРАВЛЕНИЯ И АВТОМАТИКИ

13-1. Промышленные серии магнитных усилителей с самонасыщением

а) Характеристика управления в относительных единицах, единственная для каждой серии усилителей, имеющих определенную схему включения (рис. 13-1), позволяет найти характеристику управления в абсолютных единицах для каждого конкретного усилителя данной серии. Рассмотрим характеристику рис. 13-1 более подробно.

За базисный ток I_K принят ток нагрузки, ограниченный сопротивлением рабочих обмоток, номинальным

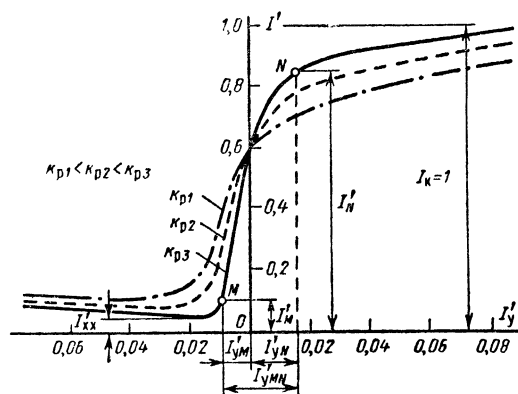


Рис. 13-1. Типовые характеристики МУС в относительных единицах при различных коэффициентах регулирования.

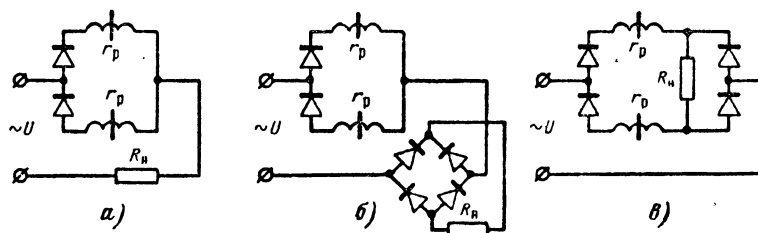


Рис. 13-2. Схемы включения однофазных МУС.

a — нагрузка на переменном токе; *б* — нагрузка на постоянном токе с питанием нагрузки через выпрямительный мост; *в* — нагрузка на постоянном токе.

сопротивлением нагрузки и сопротивлением вентиля в прямом направлении.

Для схемы с нагрузкой на постоянном токе (рис. 13-2, *б* и *в*)

$$I_K = \frac{0,9 U_c - \Sigma U_v}{\Sigma R}, \quad (13-1)$$

где U_c — напряжение сети, В;

ΣU_v — падение напряжения в вентилях, В;

ΣR — сопротивление цепи рабочих обмоток, равное $R_n + r_p$, Ом.

Для схемы с нагрузкой на переменном токе (рис. 13-2, а)

$$I_{\text{к.действ}} = \frac{U_{\text{с}} - \Sigma U_{\text{в}}}{\Sigma R}. \quad (13-2)$$

По оси ординат откладывается относительный ток нагрузки

$$I' = I/I_{\text{к}}. \quad (13-3)$$

По горизонтальной оси отложен ток управления в относительных единицах

$$I'_{\text{у}} = I_{\text{упр}}/I_{\text{к}}, \quad (13-4)$$

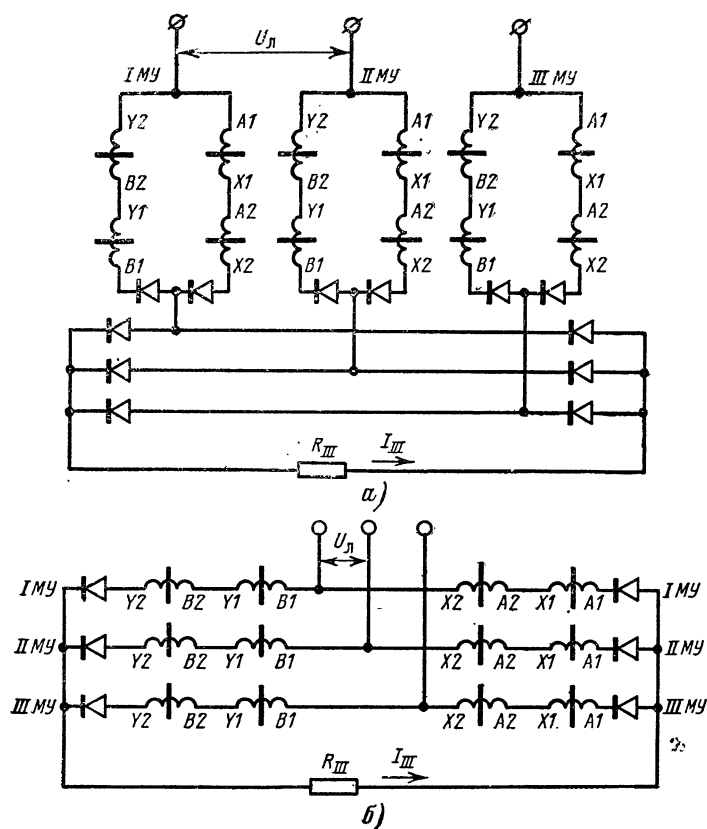


Рис. 13-3. Трехфазные схемы включения МУС.

а — схема с вынесенным мостом; б — схема с нагрузочными обмотками, включенными в плечи выпрямительного моста.

где $I_{упр}$ — ток обмотки управления, приведенный к рабочей обмотке,

$$I_{упр} = \frac{I_y \omega_y}{\omega_p} \Phi. \quad (13-5)$$

Коэффициент Φ определяется схемой МУС. Для схем рис. 13-2 $\Phi=2$, для трехфазных схем рис. 13-3 $\Phi=3$.

Для работы выбирается линейный участок MN характеристики рис. 13-1. Максимальный ток нагрузки I'_N обычно берется равным 0,85. Минимальный ток $I'_M \approx 0,05$. Ток холостого хода $I'_{x.x} = I'_M/1,5$. За номинальный ток управления I'_{yMN} принимается ток, необходимый для перевода усилителя из точки M в точку N . Очень важной характеристикой усилителя является кратность регулирования k_p , равная отношению тока насыщения I_K к току холостого хода $I_{x.x}$:

$$k_p = \frac{I_K}{I_{x.x}} = \frac{1}{I'_{x.x}}. \quad (13-6)$$

При данном напряжении питания и материале сердечника коэффициент k_p зависит от сопротивления нагрузки R_n : чем больше R_n , тем меньше I_K и k_p .

Если изменяется напряжение питания, то k_p изменяется как за счет тока I_K , так и за счет тока $I_{x.x}$.

Коэффициент кратности тока характеризует отношение номинального тока в нагрузке к минимальному

$$k_i = \frac{I'_N}{I'_M} = \frac{I_N}{I_M}. \quad (13-7)$$

Коэффициент усиления мощности

$$k_p \approx \frac{I_n^2 R_n}{I_y^2 R_y}. \quad (13-8)$$

Постоянная времени

$$T_y = \frac{1}{2f} \frac{\omega_y}{\omega_p} \frac{\Sigma R + R_b}{R_y} \left(1 - \frac{1}{k_i}\right) \frac{I_N}{I_y}, \quad (13-9)$$

где R_b — эквивалентное сопротивление выпрямителей в проводящем направлении, равное $\Sigma U_b/I_N$.

Наряду с током I_{yN} часто указывается ток $I_{y.d}$ — допустимое значение тока в обмотке управления с точки

зрения нагрева $I_{y.d} > I_{y.N}$. Часто на каждом магнитопроводе устанавливается по два комплекта рабочих обмоток. Обмотки могут включаться последовательно и параллельно. Выходные параметры МУС, приводимые в каталогах и [Л. 13-1], даются для последовательного соединения обмоток. При переходе на параллельное соединение обмоток номинальное напряжение уменьшается в 2 раза, номинальный ток увеличивается в 2 раза, сопротивление нагрузки уменьшается в 4 раза. Для МУС с нагрузкой на переменном токе (рис. 13-2, а) ток в нагрузке увеличивается с $1,2 I_N$ по $2,4 I_N$, питающее напряжение уменьшается в 2 раза, а сопротивление нагрузки — в 4 раза. Ток управления при изменении схемы соединения обмоток не изменяется. Если усилитель имеет два комплекта рабочих обмоток, то они оба должны быть включены в работу. При переходе на трехфазные схемы включения (рис. 13-3) обмотки управления всех фаз включаются согласно.

Соотношения между параметрами однофазных МУС и параметрами в трехфазной схеме приведены в табл. 13-1.

Таблица 13-1

Отношение величин	Схема рис. 13-3, а	Схема рис. 13-3, б	Отношение величин	Схема рис. 13-3, а	Схема рис. 13-3, б
U_d/U	2	1	R_{III}/R_N	2,22	0,555
I_{III}/I_N	1,36	2,72	P_{III}/P_N	4,07	4,07

Индекс N относится к однофазным МУС с двумя комплектами обмоток, соединенными последовательно.

Реверсивные (двухтактные) МУС могут быть собраны из одноктактных по схемам рис. 13-4. Соотношения параметров однофазного и двухтактного МУС приведены

Таблица 13-2

Отношение основных величин	Схема рис. 13-4, а	Схема рис. 13-4, б	Отношение основных величин	Схема рис. 13-4, а	Схема рис. 13-4, б
R_B/R_D	0,71	1,1	$U_{тр}/U$	1	0,5
R_D/R_N	2,0	0,475	I_{yD}/I_{yN}	0,5—0,55	0,5—0,55
I_{dN}/I_N	0,29	0,94	$\gamma, \%$	17	40

в табл. 13-2. Коэффициент $\gamma^2, \%$ — отношение мощности в нагрузке двухтактного МУС к мощности однофазного:

$$\gamma, \% = \frac{I_{N \text{ двух}}^2 R_{N \text{ двух}}}{I_N^2 R_N} 100 \%$$

Соотношения для стандартных МУС, работающих в различных схемах при смешанной нагрузке ($R-L$) и на

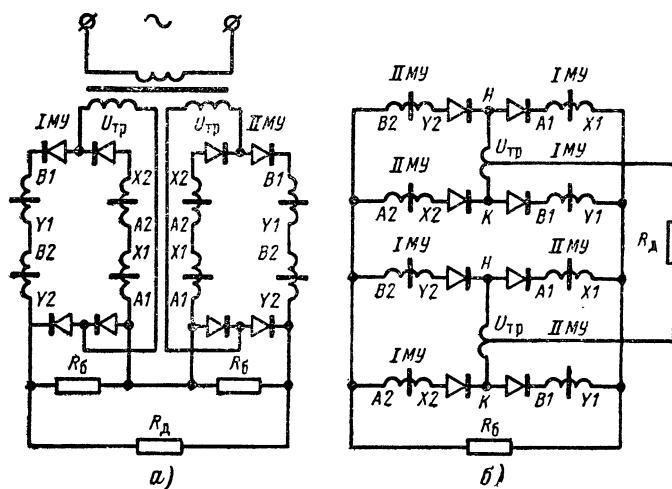


Рис. 13-4. Реверсивные схемы включения однофазных магнитных усилителей.

противо-э. д. с. подробно рассмотрены в [Л. 6-1]. В каталогах приводятся все электрические данные обмоток и основные входные и выходные параметры.

б) **Построение характеристик управления по каталожным данным.** Для схем рис. 13-2, б и в имеем:

ток нагрузки $I = I_K I'$;

ток управления $I_y = \frac{I_K \omega_p}{2\omega_y} I'_y$, где ω_p — число последовательно соединенных витков в рабочей обмотке;

ω_y — число витков обмотки управления; I' и I'_y — токи по характеристике в относительных величинах;

базисный ток $I_K = \frac{0,9 U_c - \Sigma U_B}{\Sigma R}$,

где $\Sigma R = R_n + \delta r_p$; δ — число обмоток на одном сердечнике, включенных последовательно; при двух обмотках

$\delta=2$, при одной $\delta=1$ и при параллельном соединении $\delta=0,5$; $\Sigma U_{\text{в}}$ — падение напряжения на вентилях. Для схемы рис. 13-2, б $\Sigma U_{\text{в}}$ определяется числом вентилях в цепи рабочей обмотки и двух плечах выпрямительного моста; для схемы рис. 13-2 в — числом вентилях в двух плечах моста; на один германиевый вентиль можно принять $U_{\text{в}}=1$ В, для кремниевого $U_{\text{в}}=1,2$ В.

Ток холостого хода можно определить через коэффициент регулирования $k_{\text{р}}$, который обычно дается в каталоге:

$$k_{\text{р}} = \frac{I_{\text{к}}}{I_{\text{х.х}}} = \frac{1}{I'_{\text{х.х}}}.$$

Если сопротивление нагрузки отлично от номинального, то новое значение $k_{\text{р}}^*$ равно $k_{\text{р}}^* = k_{\text{р}} I_{\text{к}}^* / I_{\text{к}}$,

где $I_{\text{к}}^*$ — ток короткого замыкания при нагрузке, отличной от номинальной.

Если напряжение отлично от номинального (допускается отклонение $\pm 10\%$, -15%), то согласно (13-1) изменяется ток короткого замыкания $I_{\text{к}}$. Значения тока холостого хода при изменении питающего напряжения берутся из каталожных данных. Тогда новое значение коэффициента $k_{\text{р}}$ равно:

$$k_{\text{р}} = I_{\text{к}}^* / I'_{\text{х.х}}. \quad (13-10)$$

В каталогах приводится семейство кривых в относительных единицах для различных значений коэффициента $k_{\text{р}}$ (рис. 13-6). Аналогичным образом строится характеристика управления для схемы рис. 13-2, а.

Характеристика управления в относительных единицах берется для действующих значений токов.

Токи нагрузки и управления определяются уравнениями:

$$I_{\text{действ}} = I_{\text{действ.к}} I'_{\text{действ}}; \quad (13-11)$$

$$I_{\text{у}} = \frac{I_{\text{действ}}}{2,22} \frac{w_{\text{р}}}{w_{\text{у}}} I'_{\text{у.действ}}. \quad (13-12)$$

Для трехфазных схем (рис. 13-3) методика построения остается той же, но расчет базисного тока $I_{\text{Пк}}$ производится по формуле:

$$I_{\text{Пк}} = \frac{1,35 U_{\text{л}} - \Sigma U_{\text{в}}}{\Sigma R}.$$

При расчете ΣU_v для схемы рис. 13-3, а число включенных диодов берется равным сумме числа диодов в цепи рабочей обмотки и в двух плечах трехфазного моста. Для схемы рис. 13-3, б берется число диодов в двух плечах трехфазного моста.

Ток в нагрузке $I_{II} = I_{IIK} I'$.

Ток управления находится по формуле

$$I_y = \frac{I_{IIK} w_p}{\phi w_y} I'_y.$$

Поскольку среднее значение тока в рабочей обмотке равно одной трети от среднего тока нагрузки, то коэффициент $\phi = 3$. Относительные значения токов I' и I'_y берутся по каталожной характеристике управления для трехфазного комплекта, собранного по схеме рис. 13-4. Ток холостого хода $I_{х.х}$ равен:

$$I_{х.х} = I_{IIK} / k_p.$$

Если в трехфазной схеме использованы однофазные МУС, то соотношения между параметрами берутся из табл. 13-1. Выходная характеристика трехфазной схемы, собранной из однофазных МУС (рис. 13-3, а), такая же, как характеристика управления однофазного МУС по схеме рис. 13-2, б. Для схемы рис. 13-3, б используется характеристика управления однофазного МУС по схеме рис. 13-2, в.

Ток холостого хода в нагрузке для трехфазных схем в 1,5 раза больше, чем для однофазных.

При вычислении коэффициента усиления по мощности следует иметь в виду, что обмотки управления всех трех фаз соединены последовательно и расчетная величина сопротивления утраивается по сравнению с каталожной.

Для реверсивных (двухтактных) схем рис. 13-4 в каталогах также приводятся характеристики в относительных единицах (рис. 13-5) при коэффициенте $k_p = 45$.

Наибольшее значение тока на выходе равно:

$$I_{д.к} \approx 0,94 I_k.$$

Ток нагрузки равен:

$$I_d = I_{д.к} I'_d = 0,94 I_k I'_d.$$

Номинальный ток управления определяется по формуле

$$I_y = \frac{I_k \omega_p}{\omega_y} I'_{y.d} = \frac{I_k}{2} \frac{\omega_p}{\omega_y} I'_{y.d}. \quad (13-13)$$

Для других реверсивных схем соотношения приведены в [Л. 13-1].

в) Промышленные серии МУС [Л. 13-1]. Основные данные серий приведены в табл. 13-3.

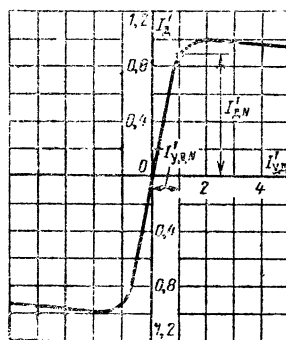


Рис. 13-5. Характеристика управления реверсивного МУС в относительных единицах.

Таблица 13-3

Некоторые данные серии МУС, выпускаемые промышленностью

Серия	Частота, Гц	Выходная мощность, Вт	Напряжение питания, В	Магнитопровод	Материал магнитопровода
ТУМ	50 и 60	2,36—45,3	До 220	Тороид	Э310
ТУМ-АК	400	50—368	До 220	»	Э340
УМТ	50	1—400	До 380	»	68НМП
УМТК	400	3—1000	До 380	»	68НМП
УМ1-П	50	60—4700	До 380	П-образный	Э310
УМ1-ПК	400	500 до 19 000	До 380	»	Э310
УСО и УСОА	50	4000—67 000	До 380	»	Э330

а) Серия ТУМ. Усилитель выполнен на тороидальном ленточном сердечнике из стали Э310. На каждом магнитопроводе имеется по две рабочих обмотки, которые могут соединяться последовательно или параллельно.

б) Серия ТУМ-АК. Эта серия аналогична серии ТУМ, но предназначена для работы при частоте 400 Гц и мощности нагрузки до 368 Вт.

в) Серия УМТ и УМТК. Серия УМТ предназначена для работы при частоте 50 Гц и мощностях 1—400 Вт. Серия УМТК вы-

полнена для частоты питания 400 Гц и охватывает мощность 3—1000 Вт. Магнитопроводы выполнены в виде тороидов из пермаллоя 68НМП. На рис. 13-6 приведены типовые характеристики усилителей серии УМТ при различных коэффициентах регулирования k_p .

Сопротивления цепи управления $R_{y*} = 400 R'_y$, где $R'_y = \frac{R_y}{\Sigma R} \left(\frac{\omega_p}{\omega_y} \right)^2$ — сопротивление цепи управления, приведенное к рабочей цепи.

г) *Серия УМ1-П*, выполнена на шихтованных П-образных сердечниках из стали Э310. Рабочая обмотка имеет две секции на каждом сердечнике. Мощность нагрузки

от 60 до 4700 Вт. Обмотка управления охватывает оба магнитопровода и выполнена в виде отдельной секции, расположенной у торцов рабочей обмотки.

Усилители УМ1-ПК предназначены для работы при частоте 400 Гц и мощности до 19 кВт. В отличие от серии УМ1-П обмотка управления распределена по всей длине рабочей обмотки.

д) *Серия УМ3-П*. Трехфазный усилитель, выполненный на базе УМ1-П. Обмотка управления охватывает шесть магнитопроводов. Схема соединений может быть выполнена по рис. 13-3. Диапазон мощностей от 0,26 до 21 кВт.

е) *Серия УСО и УСОА*. Однофазные усилители с мощностью в нагрузке от 4 до 67 кВт. Пластины сердечника П-образные с косыми срезами (см. рис. 6-25, б). Серия УСОА

имеет рабочие обмотки, выполненные из алюминиевой проволоки. С целью уменьшения габаритов устройств, использующих МУС, в настоящее время выпускаются блоки МУ и комплектные устройства.

В блоках, кроме МУС, обслуживающих данную схему управления, имеется разделительный (питающий) трансформатор, диодный мост для обмоток смещения и регулирующие резисторы [Л. 13-1]. Комплектное устройство служит для выполнения сложной функции управления, например регулирования тока возбуждения машины постоянного тока, и является конструктивно законченной установкой.

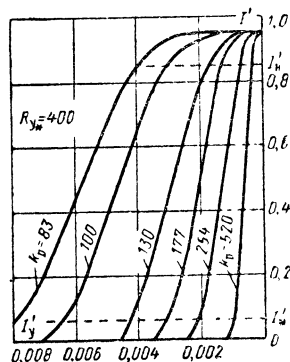


Рис. 13-6. Типовые характеристики управления МУС серии УМТ при различном k_p .

13-2. Бесконтактные магнитные реле (БМР) на базе МУС

Для получения релейного режима в схему МУС необходимо дополнительно намотать обмотку обратной связи $\omega_{o.c.}$. На рис. 13-7 дана схема, в которой ток обратной связи $I_{o.c.}$ пропорционален напряжению на нагрузке U_n . Результирующая м.д.с. управления складывается из м.д.с. обмотки управления $I_y \omega_y$ и м.д.с., создаваемой обмоткой обратной связи $I_{o.c.} \omega_{o.c.}$. На рис. 13-8, а кривая I — характеристика управления МУС без обратной связи. Про-

ведем луч обратной связи II так, что $\operatorname{tg} \alpha = I'_{o.c} / U_n$, где $I'_{o.c}$ — ток обратной связи, приведенный к обмотке управления и равный

$$I'_{o.c} = \frac{I_{o.c} \omega_{o.c}}{\omega_y} = \frac{U_n}{R_{o.c} + R_{доб}} \frac{\omega_{o.c}}{\omega_y} = k_{o.c} U_n, \quad (13-14)$$

где $R_{o.c}$ — сопротивление обмотки обратной связи;
 $R_{доб}$ — сопротивление для регулировки коэффициента обратной связи $k_{o.c}$.

При $I_y = 0$ поле управления создается только током обратной связи $I'_{o.c}$. Напряжение на нагрузке определяется точкой пересечения O луча II с характеристикой I . При токе управления I_{y1} поле управления создается суммарной м. д. с.

$$H_y I = I_{y.p} \omega_y = -I_{y1} \omega_y + I_{o.c} \omega_{o.c} \text{ или } I_{y.p} = -I_{y1} + I'_{o.c}.$$

Напряжение на нагрузке определяется точкой пересечения I луча II с характеристикой I и равно U_{n1} . Следует отметить, что току I_{y1} соответствуют также точки равновесия 6 и 7 . Однако точка 6 является точкой неустойчивого равновесия. В точку 7 усилитель может попасть только при переходе на ветвь $3, 7, 4$.

Напряжение на нагрузке U_n определяется точкой пересечения луча II с характеристикой I . При токе I_{y2} состояние определяется точками 2 и 3 . При малейшем возрастании тока I_y по модулю ($I_y < 0$) происходит скачкообразное уменьшение напряжения на нагрузке с U_{n2} до U_{n3} . Если ток I_y продолжать увеличивать по модулю, то напряжение на нагрузке мало меняется. Если ток I_y уменьшить по модулю ($I_y < 0$), то при $I_y = -I_{y4}$ происходит скачкообразное нарастание напряжения с U_{n4} до U_{n5} .

Таким образом, данный МУС с обратной связью ведет себя как реле с размыкающим контактом: при $I_y = 0$ напряжение на нагрузке максимально («контакты» замкнуты), при $I_y = I_{y2}$ напряжение U_n падает до значения U_{n3} («контакты» размыкаются). В реальных МУС отношение $U_{n2}/U_{n3} \geq 100$, а значение U_{n3} очень мало.

Для получения релейного режима необходимо, чтобы соблюдалось неравенство $\alpha > \gamma$. Результирующая характеристика $U_n(I_y)$ МУС в релейном режиме представлена на рис. 13-8,б.

Если в МУС добавить обмотку смещения, то в зависимости от м. д. с. этой обмотки могут быть получены реле с различными видами «контактов». При отрицательном смещении $I_{c1} \omega_{c1} / \omega_y$ БМР имеет «замыкающий контакт» (рис. 13-9, а).

Для реле с характеристикой рис. 13-9, а коэффициент возврата k_v равен:

$$k_v = \frac{I_{y.отп}}{I_{y.сп}} = \frac{I_{y.сп} - \Delta}{I_{y.сп}} = 1 - \frac{\Delta}{I_{y.сп}}. \quad (13-15)$$

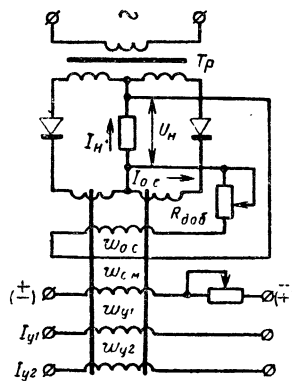


Рис. 13-7. Схема МУС с обратной связью по напряжению на нагрузке.

Коэффициент возврата тем меньше, чем больше ширина релейной петли Δ . В свою очередь эта величина зависит от коэффициента обратной связи $k_{o.c.}$. Чем больше $k_{o.c.}$, тем больше Δ , тем шире релейная петля. При отсутствии обмотки смещения МУС ведет себя как реле с размыкающим контактом (рис. 13-8, б). Коэффициент возврата для этого случая равен:

$$k_n = I_{y2}/I_{y4}.$$

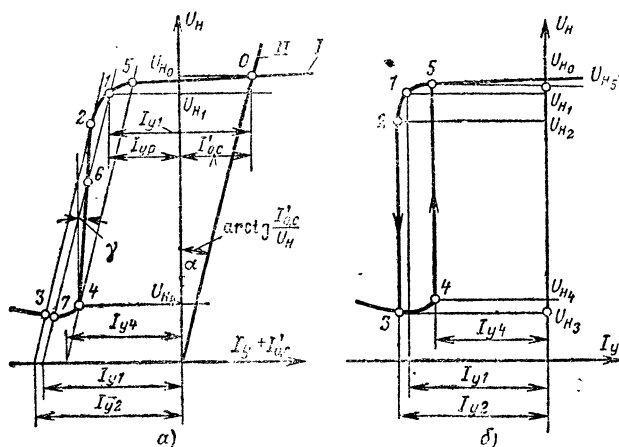


Рис. 13-8. К построению релейной петли МУС

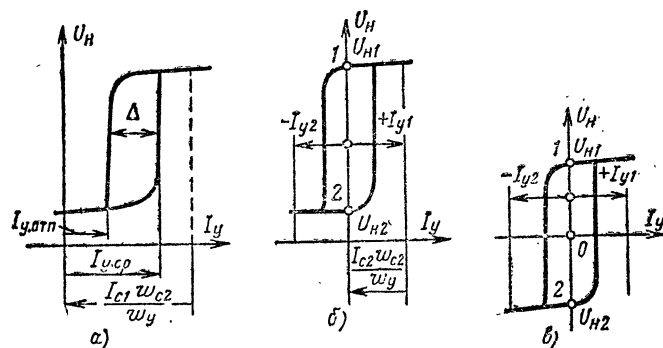


Рис. 13-9. Характеристики бесконтактных магнитных реле.

Если создать отрицательное смещение $I_{c2}\omega_{c2}/\omega_y$, меньшее, чем $I_{c1}\omega_{c1}/\omega_y$, то получим характеристику «вход — выход», изображенную на рис. 13-9, б. В этом случае реле может находиться в двух устойчивых состояниях. Если вначале БМР находилось в состоянии, соответствующем точке 1, и подан положительный сигнал $+I_{y1}$, то после снятия сигнала напряжение на нагрузке останется равным

$U_{н1}$. При подаче отрицательного сигнала $-I_{y2}$ напряжение упадет до напряжения $U_{н2}$. После снятия сигнала I_{y2} напряжение останется равным $U_{н2}$ (БМР работает аналогично поляризованному реле). Применяя БМР на реверсивных усилителях, можно получить реле с переменной знака напряжения на нагрузке (рис. 13-9, в) [Л. 13-2].

Большим достоинством БМР является отсутствие размыкающих контактов, которые часто являются причиной отказа в работе схем автоматики. Минимальная мощность срабатывания БМР может достигать 10^{-10} Вт. Отсутствие контактов и подвижных частей у БМР делает реле исключительно износостойкими и вибро- и ударостойкими. Реле могут работать во взрывоопасных средах.

При подаче на вход прямоугольного управляющего напряжения постоянная составляющая потока нарастает с постоянной времени цепи управления T_y . Срабатывание реле происходит при достижении током управления значения $I_{y.cр.}$. Замедление времени срабатывания, обусловленное электромагнитным процессом в обмотке управления, является большим недостатком бесконтактных реле.

Работа БМР зависит от напряжения питания, частоты, температуры окружающей среды и требует применения специальной стабилизации [Л. 13-3].

Недостатком БМР является также отсутствие разрыва цепи в положении, соответствующем размыканию контактов.

Реле с большим числом управляемых (выходных) цепей получается сложным и громоздким.

Коэффициент полезного действия рабочей цепи у БМР значительно ниже, чем у контактных реле.

При большой выходной мощности масса и габариты бесконтактных аппаратов значительно превышают массу и габариты контактных.

Как правило, исполнительные звенья, управляющие большими токами и мощностями, делаются на контактной аппаратуре или полупроводниковых элементах, а входные элементы выполняются на магнитных усилителях.

Вопросы теории и расчета БМР рассмотрены в [Л. 13-2, 13-3].

13-3. Принцип действия и основные соотношения полупроводниковых реле

а) **Общие сведения.** Транзисторы имеют ряд ценных качеств, которых нет у электромеханических элементов, электронных ламп и тиратронов. Они обладают малой массой, быстродействием, малыми размерами, высокой надежностью. Эти приборы вибро- и ударостойки. Отсутствие нагреваемого катода снижает потребляемую прибором мощность.

Полупроводниковые триоды для своей работы требуют низких напряжений и способны работать несколько десятков тысяч часов.

Аппараты с полупроводниковыми приборами имеют высокую чувствительность и высокий к. п. д. цепи нагрузки. Отсутствие размыкающихся контактов также являет-

ся большим преимуществом аппаратов на полупроводниковых приборах.

Недостатками транзисторов являются: отсутствие полного разрыва цепи в состоянии отсечки, гальваническая связь цепи управления (базы) и нагрузки, зависимость параметров приборов от температуры. Кроме того, выпускаемые транзисторы имеют довольно большой раз-

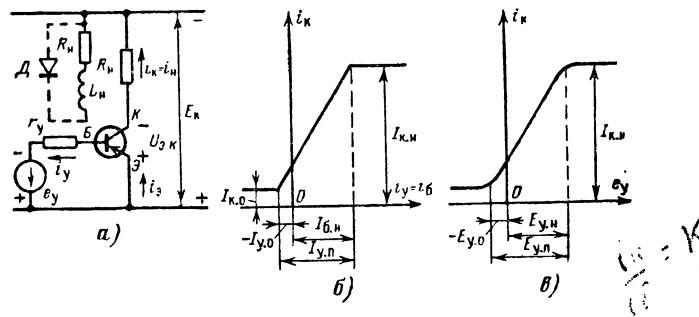


Рис. 13-10. Каскад усилителя на транзисторе.

брос параметров. Однако путем правильного выбора режимов работы, учитывающего широкий диапазон колебания температуры, удастся создать надежно работающие электрические аппараты на полупроводниковых приборах. Эти аппараты могут являться бесконтактными реле, логическими элементами. Последние широко используются в схемах автоматики и счетной техники.

б) **Однокаскадный полупроводниковый усилитель на транзисторе проводимостью $p-n-p$.** Схема усилителя с общим эмиттером изображена на рис. 13-10, а. Указанные на рисунке направления токов, напряжений и э. д. с. приняты за положительные.

Транзистор имеет три электрода: эмиттер Э, коллектор К и базу Б. Ток эмиттера равен сумме токов коллектора и базы $i_э = i_к + i_б$.

Транзистор является управляемым активным сопротивлением. В зависимости от тока, протекающего через базу, изменяется сопротивление между эмиттером и коллектором. В результате изменяется и ток, протекающий через нагрузку $R_н$.

Характеристика усилителя представлена на рис. 13-10, б. При отрицательном токе управления $-I_{у,о}$ через нагрузку протекает минимальный ток $I_{к,о}$, причем $|I_{к,о}| =$

$= |I_{y.o}|$. Этот режим усилителя называется *отсечкой* и обозначается буквой *О*.

Если ток управления i_y уменьшать до нуля, а затем увеличивать в положительной области, то ток в нагрузке линейно растёт.

При токе в базе $I_{б.н}$ наступает насыщение транзистора. В этом режиме сопротивление между эмиттером и коллектором мало и ток в цепи определяется сопротивлением нагрузки R_n . Такой режим называется режимом насыщения и обозначается буквой *Н*. Ток управления, который необходим для перевода из состояния *О* в состояние *Н*, называется током переключения $I_{y.п}$.

На рис. 13-10, в изображена зависимость тока в нагрузке от э. д. с. сигнала управления.

Вследствие нелинейности сопротивления перехода эмиттер — база зависимость тока в нагрузке i_n от управляющего напряжения e_y имеет нелинейный характер. Отрицательное значение сигнала — $E_{y.o}$ называется напряжением *отсечки*, а положительное напряжение $E_{y.н}$ — насыщения. Для транзистора *p-n-p* характерным является увеличение тока через него при увеличении отрицательного потенциала базы транзистора относительно эмиттера. Для того чтобы перевести транзистор из *запертого* состояния в *открытое*, необходимо к э. д. с. — $E_{y.o}$ добавить положительную э. д. с. переключения $E_{y.п}$.

Важнейшей характеристикой транзистора является зависимость между током коллектора и током базы. Отношение приращения тока в коллекторной цепи к приращению тока в цепи базы называется коэффициентом усиления по току. Для схемы с общим эмиттером этот коэффициент равен $\beta = \Delta I_k / \Delta I_b$. Чем больше β , тем круче идет зависимость $I_k(I_b)$.

Согласно [Л. 13-4] запирающее напряжение $E_{y.o} = 0,05 \div 0,12$ В для транзисторов с $\beta = 10 \div 100$. Однако ток и напряжение отсечки довольно сильно увеличиваются с ростом температуры. Поэтому для надежного запираения напряжения $E_{y.o}$ берется равным 0,1—0,5 В.

Надежная работа транзистора, стабильность его характеристик в значительной степени зависят от его температуры. Эта температура определяется температурой окружающей среды и мощностью, выделяющейся в транзисторе при прохождении по нему тока. Для того чтобы удержать температуру транзистора в допустимых пределах при данной наибольшей температуре окружающей

среды, мощность, выделяющаяся в транзисторе, должна быть меньше мощности, рассеиваемой транзистором. Эта мощность указывается в его паспорте.

Мощность, выделяющаяся в транзисторе в режиме отсечки, равна:

$$P_0 \approx E_k I_{k.o.}$$

Так как ток $I_{k.o.}$ мал, мощность, выделяющаяся в транзисторе, также мала. В этом режиме к коллекторному переходу приложено практически все напряжение источника E_k . Это напряжение должно быть меньше предельно допустимого значения напряжения, приводимого в паспорте транзистора $U_{k.доп.}$. Обычно напряжение источника $E_k = U_{k.доп.} / (1,5 \div 2)$.

При увеличении тока управления i_y растет ток нагрузки, увеличивается мощность, выделяемая в транзисторе, равная:

$$P = I_k U_{эк},$$

где $U_{эк}$ — напряжение между эмиттером и коллектором транзистора.

Поскольку мощность, которая может рассеиваться транзистором, постоянна, по условиям нагрева допустимые значения тока I_k и напряжения $U_{эк}$ связаны гиперболической зависимостью.

Вначале с ростом I_k мощность, выделяемая в транзисторе, растет, а затем падает, так как начинает превалировать уменьшение $U_{эк}$. Наибольшая мощность, выделяющаяся в транзисторе имеет место, когда сопротивление нагрузки R_n равно сопротивлению транзистора $R_{эк}$. Эта мощность должна быть меньше мощности, которую может рассеять транзистор при допустимой температуре:

$$P_{\max} \leq P_{\text{расс.}}$$

Для получения режима насыщения необходимо подать ток управления $I_{y.п.}$. Этот ток связан с током насыщения $I_{k.н}$ через коэффициент усиления по току:

$$I_{y.п.} = \frac{I_{k.н}}{\beta} = \frac{E_k - U_{эк.н}}{\beta R_n} \approx \frac{E_k}{\beta R_n}, \quad (13-16)$$

где $U_{эк.н}$ — падение напряжения между электродами эмиттер — коллектор в режиме насыщения. Учитывая, что $I_{y.o.}$ мал, можно считать:

$$I_{с.н} \approx E_k / \beta R_k.$$

Для уменьшения $U_{\text{эк.н}}$, а следовательно, и потерь в транзисторе рекомендуемый ток базы при насыщении берется больше $I_{\text{б.н}}$

$$I_{\text{б.реком}} = k_{\text{н}} I_{\text{б.н}}; \quad k_{\text{н}} = 1,5 \div 2.$$

Следует отметить, что увеличение $k_{\text{н}}$ повышает стойкость схемы по отношению к изменениям температуры, колебаниям напряжения питания и изменению и разбросу параметров, входящих в схему элементов. Однако при этом ухудшается быстродействие, так как требуется более длительное время для вывода транзистора из насыщения.

Для германиевых транзисторов напряжение $U_{\text{эк.н}}$ значительно меньше $E_{\text{к}}$, поэтому при расчете тока насыщения $I_{\text{к.н}}$ напряжением $U_{\text{эк.н}}$ можно пренебречь.

Мощность, выделяемая в транзисторе в этом режиме, равна:

$$P_{\text{нас}} = U_{\text{эк.н}} I_{\text{к.н}} < P_{\text{расс}}.$$

Эта мощность существенно больше, чем мощность P_0 .

В полупроводниковых релейных аппаратах и логических элементах триод находится либо в состоянии отсечки O , либо в насыщенном состоянии H . Переход из одного состояния в другое происходит так быстро, что определяющим по нагреву является только насыщенное состояние H , когда падение напряжения на транзисторе мало. Такой режим транзистора называется **к л ю ч е в ы м**. Насыщенное состояние эквивалентно замкнутому состоянию контактов реле, режим отсечки — разомкнутому.

Допустимая мощность, снимаемая с нагрузки для данного транзистора в ключевом режиме, в десятки раз больше допустимой нагрузки того же транзистора в режиме непрерывного управления. Поэтому ключевой режим позволяет лучше использовать транзистор по мощности.

В случае активно-индуктивной нагрузки при переходе из режима H в режим O на нагрузке возникает большая э. д. с. $-L di/dt$, обусловленная высокой скоростью спада тока. В результате между коллектором и эмиттером действует сумма напряжения источника питания $E_{\text{к}}$ и э. д. с. $-L di/dt$. Электродвижущая сила $-L di/dt$ может быть настолько большой, что произойдет пробой транзистора. Для снятия таких перенапряжений нагрузка шунтирует-

ся диодной цепью D (рис. 13-10, a). Подробно этот вопрос изложен в [Л. 13-4].

Следует отметить, что наличие диода снижает скорость спада потока в индуктивной нагрузке и, следовательно, уменьшает быстродействие при отключении.

в) **Двухкаскадный усилитель.** Для получения релейного режима необходимо, чтобы число каскадов было не

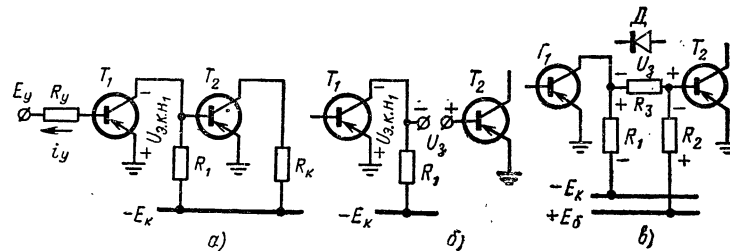


Рис. 13-11. Двухкаскадный транзисторный усилитель.

менее двух [Л. 13-4]. Некоторые из возможных вариантов схем двухкаскадного усилителя приведены на рис. 13-11.

В схеме рис. 13-11, a база транзистора T_2 непосредственно связана с коллектором транзистора T_1 . Если транзистор T_1 находится в состоянии O , то к базе транзистора T_2 приложено практически полное напряжение источника питания $-E_k$. Под действием этого напряжения транзистор T_2 полностью насыщен (находится в состоянии H) и через нагрузку течет ток $I_H \approx E_k/R_H$.

По мере того как мы будем увеличивать ток в базе транзистора T_1 , будет увеличиваться коллекторный ток этого транзистора, протекающий через резистор R_1 . Из-за падения напряжения на этом сопротивлении отрицательный потенциал на базе транзистора T_2 будет уменьшаться, что поведет к уменьшению тока в нагрузке. В момент, когда транзистор T_1 будет насыщен, к базе транзистора T_2 будет приложен потенциал, равный $-U_{э.к.н.1}$ транзистора T_1 . Для отсечки транзистора T_2 необходимо подать на его базу положительный потенциал, чего нельзя получить в схеме рис. 13-11, a .

Для полной отсечки транзистора T_2 необходимо ввести запирающее напряжение U_3 (рис. 13-11, $б$), которое создает необходимый отрицательный ток базы $-I_{y.o}$ (рис. 13-10, $б$).

Потенциал базы второго транзистора равен:

$$U_{б2} = -U_{эк.н} + U_3. \quad (13-17)$$

Для запираания этого транзистора необходимо соблюсти условие

$$-U_{эк.н} + U_3 \geq E_{у.о}.$$

По мере увеличения положительного сигнала E_y напряжение $U_{эк.н}$ по модулю уменьшается. При определенном значении E_y соблюдается условие закрытия второго транзистора и ток в нагрузке становится равным нулю.

Схема рис. 13-11, б обладает тем недостатком, что транзистор T_2 требует отдельного запирающего источника.

Более удобна схема рис. 13-11, в. Здесь необходимое запирающее напряжение получается от общего для многих транзисторов напряжения E_6 . Ток от источника $+E_6$, протекая по резисторам R_2 и R_3 , создает на них падения напряжения. Напряжение на R_3 является запирающим для транзистора T_2 .

Если транзистор T_1 находится в состоянии О, ток, протекающий через базу транзистора T_2 в схеме рис. 13-11, в, уменьшается по сравнению со схемой рис. 13-11, а из-за наличия резистора R_3 , что ведет к уменьшению коэффициента усиления каскада в отношении $R_1/(R_1+R_3)$ [Л. 13-4].

Этот недостаток можно практически устранить, если вместо резистора R_3 поставить стабилитрон D [Л. 13-4]. При полном насыщении транзистора T_1 ток от источника смещения $+E_6$, проходя через диод D и транзистор T_1 , создает на диоде падение напряжения, достаточное для полного закрытия T_2 . При отсечке транзистора T_1 через диод D проходит ток, открывающий триод T_2 . Из-за снижения сопротивления диода при большом токе падение напряжения остается небольшим (доли вольта).

г) **Релейный режим двухкаскадного усилителя.** Характерной особенностью усилителя схемы рис. 13-11, в является то, что приращение потенциала базы транзистора T_1 вызывает одинаковое по знаку и усиленное по величине приращение потенциала на коллекторе T_2 . Это позволяет получить положительную обратную связь путем соединения этих точек резистором обратной связи $R_{о.с}$

(рис. 13-12). Путь тока обратной связи показан на этом рисунке пунктирной линией. Ток базы $i_{б1}$ равен:

$$i_{б1} = -i_y + i_{o.c.}$$

Положительный ток сигнала i_y закрывает транзистор T_1 , а ток обратной связи, вытекающий из базы этого транзистора, наоборот, стремится открыть этот транзистор.

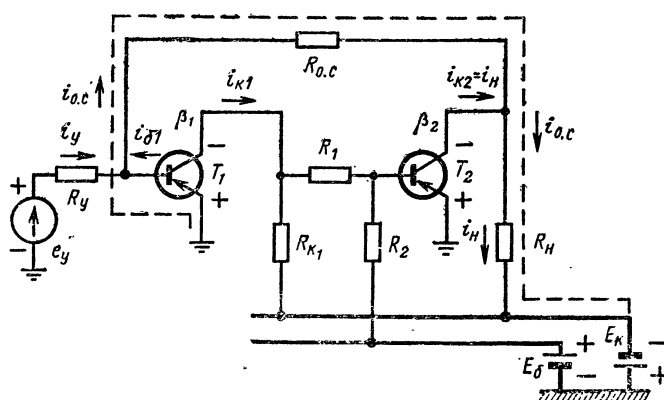


Рис. 13-12. Двухкаскадный транзисторный усилитель с положительной обратной связью.

Зависимость коллекторного тока транзистора T_1 и тока нагрузки i_H от тока управления показана на рис. 13-13, а. При отсутствии обратной связи ($R_{o.c.} = \infty$) усилитель находится в режиме непрерывного управления (рис. 13-13, а). Переход транзистора T_2 из состояния H_2 в состояние O_2 происходит при изменении тока управления от i_{y1} до i_{y2} . Соответствующие токи коллектора транзистора T_1 равны I_{K1H2} и I_{K1O2} . В зоне AA оба транзистора находятся в активном состоянии. В этой зоне при увеличении по модулю отрицательного сигнала управления $-i_y$ транзистор T_1 открывается, а транзистор T_2 , наоборот, закрывается. При этом отрицательный потенциал коллектора транзистора T_2 возрастает.

При наличии обратной связи процесс протекает таким образом: с увеличением отрицательного тока управления до значения $-i_{y1}$ транзистор T_2 находится в состоянии H_2 . Напряжение U_{oK2} мало и ток обратной связи практичес-

$$|i_{y3}| = |i_{y2}| - I_{o.c.}$$

373

Ток $I_{o.c}$ достигает максимального значения и примерно равен: $i_{o.c} = I_{o.c} = E_K / R_{o.c}$; $R_{o.c} \gg R_H$.

При дальнейшем увеличении отрицательного сигнала процесс идет по прямой O_2H_1 , параллельной $H_2(H_1)$, так как ток $I_{o.c}$ не меняется. При уменьшении модуля i_y процесс идет в обратном порядке по ломаной $(H_1)H_1O_2H_2O_1$. Для получения точки O_2 на $i_{K1}(i_y)$ из точки (O_2) проводим прямую, параллельную оси i_y , и на ней откладываем ток $I_{o.c}$. Получаем точку O_2 . После этого находим точку O_2 на характеристике i_{K2} (рис. 13-13, *г*).

При достаточно малом значении сопротивления $R_{o.c}$ возникает лавинообразный процесс увеличения тока в транзисторе T_1 и уменьшения тока в транзисторе T_2 . Получается релейный режим усилителя.

При $R_{o.c} = R_{o.c.кр}$ зависимость входных и выходных величин показана на рис. 13-13, *д* и *е*. При сигнале $-i_{y1}$ ток i_{K1} возрастает скачком до I_{K1O2} , а ток нагрузки падает до тока отсечки. Транзистор T_2 закрывается. Ток обратной связи максимален. При дальнейшем возрастании модуля тока i_y процесс в транзисторе T_1 идет по прямой O_2H_1 , параллельной $H_2(H_1)$. Для надежной работы сопротивление $R_{o.c}$ берется меньше $R_{o.c.кр}$. В этом случае зависимость входных и выходных величин показана на рис. 13-13, *ж* и *з*. Из-за сильной обратной связи процесс в первом каскаде идет по ломаной $O_1H_2O_2H_1(H_1)$, а во втором — по $H_2O_2(O_2)$. Поскольку режим на ломаной $H_2O_2(O_2)$ является неустойчивым, при токе сигнала i_{y1} ток нагрузки i_H падает по пунктирной линии H_2K , а ток i_{K1} возрастает до тока насыщения $I_{K.пл}$. При обратном изменении тока управления процесс протекает следующим образом. До тех пор пока i_y не достигнет i_{y3} , транзистор T_2 находится в отсечке и ток обратной связи $I_{o.c}$ обеспечивает условия отсечки транзистора T_2 . При дальнейшем небольшом увеличении тока i_y процесс в T_2 идет по ломаной O_2H_2M , а в T_1 — по ломаной O_2H_2M . Из-за неустойчивости режима практически ток i_{K1} падает до тока отсечки, а ток i_{K2} возрастает до $I_{Kн2}$.

По аналогии с электромеханическими контактными реле ток i_{y1} называется током отпущения, а ток i_{y3} — током срабатывания. Ширина релейной петли ΔI равна:

$$\Delta I = i_{y3} - i_{y1} = i_{y3} + |i_{y1}|.$$

Для получения релейного режима необходимо, чтобы сопротивление резистора обратной связи $R_{o.c}$ было мень-

ше критического значения $R_{o.c.кр}$, определяемого (13-18) [Л. 13-4]:

$$R_{o.c.} \leq R_{o.c.кр} = \frac{R_y R_n \gamma \beta_1 \beta_2}{R_y + r_{эб1}} = \frac{R_n \gamma \beta_1 \beta_2}{1 + \frac{r_{эб1}}{R_y}}, \quad (13-18)$$

где $\gamma = R_{к1}/(R_{к1} + R_1)$;

β_1 и β_2 — коэффициенты усиления по току транзисторов T_1 и T_2 ;

$r_{эб1}$ — сопротивление между эмиттером и базой транзистора T_1 .

Если $(r_{эб1}/R_y) \rightarrow \infty$ (источник сигнала имеет малое сопротивление), то $R_{o.c.кр}$ стремится к нулю. Так как неравенство (13-18) соблюсти невозможно, то релейный режим осуществить нельзя. Для получения релейного режима в данной схеме источник сигнала должен иметь большое внутреннее сопротивление ($R_y \gg r_{эб1}$), т. е. реле должно управляться источником тока.

Условие релейного режима принимает вид:

$$R_{o.c.} < R_{o.c.кр} = R_n \gamma \beta_1 \beta_2.$$

Согласно [Л. 13-4] ток переключения $I_{y.п}$ в этом случае равен:

$$I_{y.п} = \frac{E_k}{R_{o.c.}} \left(1 - \frac{R_{o.c.}}{\gamma \beta_1 \beta_2 R_n} \right). \quad (13-19)$$

13-4. Влияние параметров схемы на характеристики полупроводниковых реле

а) **Сопротивление обратной связи $R_{o.c.}$.** В состоянии срабатывания транзистор T_2 насыщен, напряжение $U_{эк.п2}$ мало и ток $i_{o.c.} = 0$. Поэтому при изменении сопротивления $R_{o.c.}$ ток управления отпущения I_y^o остается неизменным. В состоянии отпущения транзистор T_2 закрыт, ток обратной связи максимален и равен $I_{o.c.} = E_k/R_{o.c.}$ ($R_n \ll R_{o.c.}$). При уменьшении сопротивления $R_{o.c.}$ ток обратной связи возрастает.

Ток базы транзистора T_1 при срабатывании равен:

$$i_{б1}^c = \frac{I_{к1}^c}{\beta_1} = -i_y^c + I_{o.c.} \quad (13-20)$$

Ток $i_{б1}^c$ является неизменной величиной. При уменьшении $R_{o.c.}$ возрастает ток $I_{o.c.}$, что ведет к увеличению

тока i_y^0 согласно (13-20). Релейная петля при этом расширяется.

При возрастании $R_{o.c}$ ток обратной связи уменьшается и при большом значении $R_{o.c}$ ток i_y^0 может даже изменить знак ($i_y^0 < 0$). При малом $R_{o.c}$ усилитель переходит в режим самоблокировки (рис. 13-13,з). Согласно

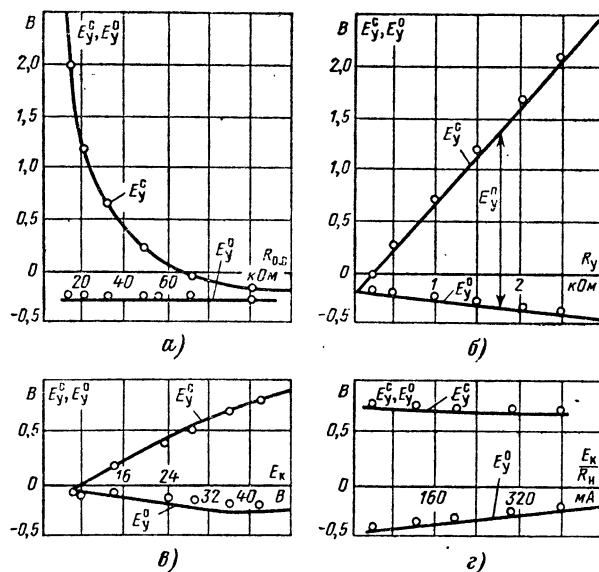


Рис. 13-14. Зависимость напряжения сигнала срабатывания (E_y^c) и сигнала отпускания E_y^0 от различных факторов.

[Л. 13-4] для обеспечения режима самоблокировки сопротивление $R_{o.c}$ должно быть равно:

$$R_{o.c} \leq R_{o.c.кр}^* = \frac{E_k R_y}{I_y^0 R_y + U_{эб1}^0},$$

где $U_{эб1}^0$ — напряжение эмиттер — база транзистора T_1 при отпуске реле.

При таком сопротивлении после срабатывания реле транзистор T_1 находится в состоянии отсечки.

На рис. 13-14,а показана зависимость э. д. с. управления E_y^0 и E_y^c от сопротивления $R_{o.c}$ для реле, параметры которого рассчитаны в [Л. 13-4].

б) **Сопротивление источника управления R_y .** Уменьшение R_y приводит к уменьшению э.д.с. срабатывания, отпускания и переключения. Ширина релейной петли уменьшается, и при $R_y = R_{y.kp}$ релейный режим исчезает [Л.1-9]:

$$R_{y.kp} = \frac{r_{эб1} R_{o.c}}{\gamma \beta_1 \beta_2 R_H - R_{o.c}}.$$

На рис. 13-14, б показана зависимость э.д.с. E_y^c и E_y^o от R_y .

в) **Напряжение питания E_k .** Обычно для питания цепей коллекторов и баз транзисторов используется общий источник питания. Деление напряжения производится с помощью стабилитронов. Можно считать, что $E_k/E_b = \text{const}$. С изменением напряжения питания токи I_y^c , I_y^o и $I_{y.п}$ изменяются примерно пропорционально этому напряжению. При некотором достаточно малом значении E_k (по сравнению с номинальным) может происходить ложное срабатывание реле. Пусть данное реле при номинальном напряжении питания находится в отпущенном состоянии и $R_{o.c} < R'_{o.c.kp}$ — рис. 13-13, з. При уменьшении напряжения питания I_y^c будет уменьшаться, пока не достигнет нулевого значения.

Поскольку к цепи базы транзистора T_1 приложен нулевой сигнал управления, то произойдет самопроизвольное срабатывание реле. Если напряжение питания снова поднимется до номинального значения, то реле все равно останется в положении срабатывания.

Для того чтобы предотвратить ложное срабатывание, должно удовлетворяться неравенство для самого низкого значения питающего напряжения [Л. 13-4]:

$$E_k > \left(I_y^o + \frac{U_{эб1}^o}{R_y} \right) R_{o.c}.$$

Зависимость э.д.с. срабатывания и отпускания от напряжения питания представлена на рис. 13-14, в. При напряжении 7 В происходит ложное срабатывание реле.

г) **Сопротивление нагрузки R_H .** В состоянии отпускания реле транзистор T_2 находится в состоянии O и ток обратной связи определяется сопротивлениями $R_{o.c}$ и R_H . Поскольку $R_{o.c} \gg R_H$, то R_H не оказывает влияния на ток обратной связи $I_{o.c}$, а следовательно, и на ток срабатывания I_y^c .

В состоянии срабатывания через R_n протекает ток нагрузки, равный $I_n = E_k/R_n$. Транзистор T_2 насыщен. При увеличении R_n уменьшается ток $I_{k,n2} = I_n$. При этом уменьшается и ток базы $i_{b2} = I_{k,n2}/\beta_2$, создающий насыщение транзистора T_2 . Для того чтобы создать ток $i_{b,n2}$, необходимо большее открытие транзистора T_1 , что требует увеличения тока базы i_{b1} , а следовательно, увеличения отрицательного напряжения отпущения E_y^o ($E_y^o < 0$).

Таким образом, при увеличении сопротивления нагрузки R_n напряжение срабатывания E_y^c не меняется, а напряжение отпущения E_y^o возрастает (по модулю). На рис. 13-14, з представлена зависимость э. д. с. E_y^o и E_y^c от (E_k/R_n) при $E_k = \text{const}$.

На работу реле значительное влияние оказывает разброс параметров транзисторов, что необходимо иметь в виду при расчете схемы. Этот вопрос подробно рассмотрен в [Л. 13-4]. При надлежащем выборе параметров схемы и стабилизации источника питания ($\pm 10\%$) удается получить надежно работающее реле.

Температурный сдвиг входной характеристики транзистора составляет примерно -2 мВ/°С. При этом изменяются напряжения $U_{\text{эб1}}^o$ и $U_{\text{эб1}}^c$ и э. д. с. срабатывания и отпущения.

Рассмотренная нами схема получила название бесконтактного реле с коллекторной обратной связью. Источник сигнала для этого реле должен обладать большим внутренним сопротивлением $R_y \gg r_{\text{эб1}}$.

Можно осуществить бесконтактное реле, применив положительную обратную связь в цепи эмиттера. Такие реле могут работать от источника сигнала с низким внутренним сопротивлением R_y . Однако эта схема имеет меньшую максимальную выходную мощность, чем схема с коллекторной связью (при прочих одинаковых условиях).

Возможна схема, в которой положительная обратная связь создается за счет коллекторной и эмиттерной связи одновременно (комбинированная связь). Такая схема не критична к сопротивлению источника сигнала.

Полупроводниковые реле нашли очень широкое применение как релейный измерительный элемент «Логика Т», в схемах автоматического управления [Л. 13-11], как усилители мощности в режиме переключения [Л. 13-12], как составная часть реле времени [Л. 13-4], датчиков и др.

13-5. Логические элементы

Автоматическое управление электроприводом или каким-либо процессом осуществляется элементами, которые взаимодействуют друг с другом и с управляемым

объектом в определенной зависимости. Общая схема автоматической системы управления представлена на рис. 13-15.

Логическая (функциональная) часть является наиболее сложной частью системы автоматического управления. Она предназначена для преобразования сигнала командных органов и датчиков в выходные сигналы в соответствии с заданной программой. Сигналы из логи-

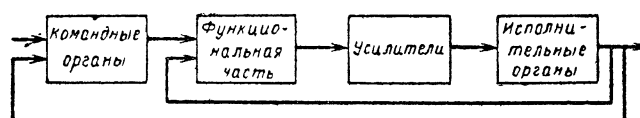


Рис. 13-15. Структурная схема системы автоматического управления.

ческой части подаются в усилительные, а затем исполнительные органы.

В большом числе случаев схемы автоматики работают на дискретных сигналах, т. е. либо на вход аппарата подается сигнал, значение которого достаточно для срабатывания аппарата, либо на вход аппарата не подается сигнал или подается малый сигнал, недостаточный для срабатывания. Для математического отображения этого процесса очень удобна двоичная система. В первом случае говорят о том, что в аппарат подана 1, во втором — 0.

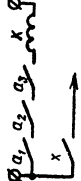
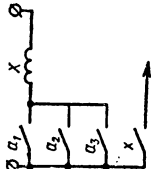
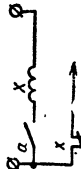
Логическая часть дискретной системы управления состоит из элементов дискретного действия, которые или выдают на выходе сигнал (появляется 1), или снимают сигнал с выхода (появляется 0) в зависимости от того, какие сигналы подаются на вход. Функции, выполняемые логическими элементами, и их релейные эквиваленты представлены в табл. 13-4.

Допустим, необходимо, чтобы логический элемент выдал сигнал при условии, что на вход будут одновременно поданы три входных сигнала. Эту функцию выполняет элемент И (табл. 13-4).

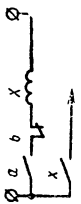

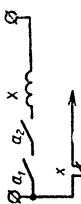

Для срабатывания элемента необходимо подать сигналы (напряжения) на обмотки реле a_1 — a_3 , которые при этом замкнут свои контакты, изображенные в таблице, и подадут напряжение на обмотку электромагнита X . Выходной сигнал появится после замыкания контакта x .

Логические функции и их релейные эквиваленты

Т а б л и ц а 13-4

Наименование логической функции	Содержание логической функции	Релейный эквивалент	Функциональная формула
Функция И	Сигнал на выходе появляется тогда, когда имеются сигналы на всех входах		$x = a_1 a_2 a_3$
Функция ИЛИ	Сигнал на выходе появляется тогда, когда имеется сигнал хотя бы на одном из входов		$x = a_1 + a_2 + a_3$
Функция НЕ (отрицание)	При наличии сигнала на входе сигнал на выходе отсутствует, сигнал на выходе появляется при исчезновении сигнала на входе		$x = \bar{a}$

Продолжение табл. 13-4

Наименование логической функции	Содержание логической функции	Релейный эквивалент	Функциональная формула
«Запрет»	При отсутствии сигнала на входе «запрет b » сигнал на выходе появляется одновременно с сигналом на входе a , при наличии сигнала на входе «запрет b » сигнал на выходе отсутствует		$x = a\bar{b}$
«Задержка»	Сигнал на выходе появляется через некоторое время после подачи сигнала на вход и исчезает одновременно с входным сигналом		
И-НЕ элемент Шеффера	Сигнал на выходе отсутствует тогда, когда имеются сигналы на всех входах		$x = \overline{a_1 a_2} = \bar{a}_1 + \bar{a}_2$
Функция «импликация»	Сигнал выхода отсутствует тогда, когда имеется сигнал на входе a и отсутствует на входе b		$x = \bar{a} + b$

Наименование логической функции	Содержание логической функции	Релейный эквивалент	Функциональная формула
Функция «эквивалентность» («равнозначность»)	Сигнал на выходе имеется тогда, когда на всех входах одновременно имеются или одновременно отсутствуют входные сигналы (состояние входов одинаково)		$x = \bar{a}b + a\bar{b}$
Функция «неравнозначность» («альтернатива»)	Сигнал на выходе имеется тогда, когда состояния входов a и b разные		$x = \bar{a}b + a\bar{b}$
«Память»	После подачи сигнала на вход a (включения) записанная информация сохраняется вплоть до подачи сигнала на вход b (отключения) памяти независимо от последующего состояния входа a		$x = (a + x_1)\bar{b}$

Содержание функций, выполняемых некоторыми другими логическими элементами, расшифровано в табл. 13-4.

Логические функции, выполняемые элементами, могут быть обозначены алгебраически (табл. 13-4). Так, операция И может быть записана уравнением

$$X = a_1 a_2 a_3.$$

Если отсутствует хотя бы один входной сигнал (допустим, $a_1=0$), то выходной сигнал также равен 0.

Наряду с рассмотренными в табл. 13-4 функциями для работы схем автоматики необходимо выполнить ряд других операций, например «память с запретом» и др. Содержание таких функций и их релейные эквиваленты описаны в [Л.13-5].

Описанные выше логические элементы могут выполняться и на базе бесконтактных аппаратов, в качестве которых могут быть использованы БМР, магнитно-полупроводниковые и чисто полупроводниковые элементы.

13-6. Логические элементы на бесконтактных магнитных реле (БМР). Магнитно-полупроводниковые логические элементы

Если БМР не имеет обмотки смещения, то при отсутствии сигнала в обмотке управления (подается 0) ток в нагрузке имеет максимальное значение (на выходе выдается 1). При подаче отрицательного сигнала (подается 1) ток в нагрузке падает до небольшой величины (на выходе выдается 0). Таким образом, БМР может выполнять логическую операцию НЕ.

Если снабдить усилитель обмоткой смещения и двумя обмотками управления, то БМР может выполнять функции И, ИЛИ, «Запрет», «Память».

Для выполнения логической операции И с помощью обмотки смещения начальная точка перемещается влево (рис. 13-9, а). Если входные сигналы подаются на обе обмотки управления и осуществляется равенство $I_{y1}\omega_{y1} + I_{y2}\omega_{y2} \geq I_{y.c.p}\omega_y$, появляется сигнал на выходе.

В промышленной серии бесконтактных логических элементов [Л. 13-6] за основу взята схема быстродействующего МУС рис. 13-16, именуемая иногда схемой Рейми.

При разомкнутом контакте K сердечник все время находится в насыщенном состоянии. В нагрузке R_n протекает максимальный ток (на выходе элемента появляется 1). При замыкании управляющего контакта K в управляющий полупериод происходит размагничивание сердечника до $-B_s$ и ток в нагрузке падает до нуля (на выходе элемента появляется 0). Таким образом, МУС выполняет логическую функцию НЕ.

Для того чтобы иметь возможность управлять элементом с помощью импульсов напряжения, включаются диоды D_2 и D_3 согласно схеме рис. 13-17. При отсутствии сигнала на входе ($U_c = 0$) источник смещения $E_{см}$ открывает диод D_2 и размагничивающее напряжение $U_{ур}$ подается на обмотку w_y . В результате на выходе элемента появляется 0.

При подаче на вход сигнала U_c указанной на схеме полярности диод D_2 закрывается, так как к его катоду подан положительный потенциал, а к аноду — отрицательный. Это равносильно от-

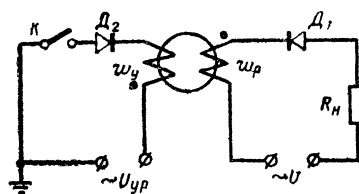


Рис. 13-16. Магнитно-диодный логический элемент НЕ.

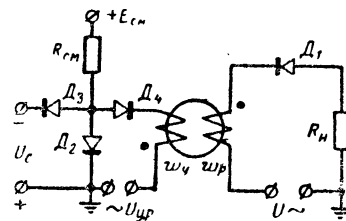


Рис. 13-17. Магнитно-диодный логический элемент «Повторение».

ключению размагничивающего напряжения $\sim U_{ур}$. При этом на выходе появляется 1. Таким образом, при подаче сигнала на вход на выходе появляется сигнал. Эту функцию называют функцией повторения.

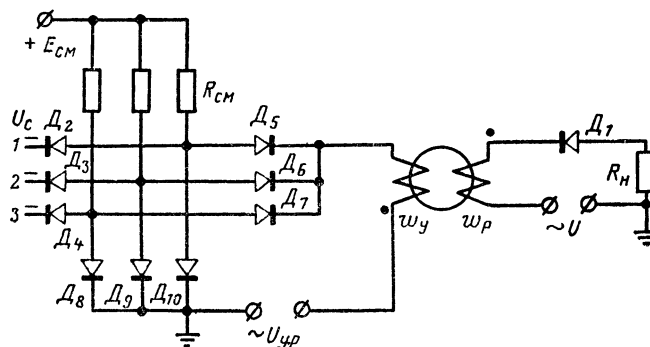


Рис. 13-18. Магнитно-диодный логический элемент И

На базе схемы рис. 13-17 легко получить логические элементы И (рис. 13-18), ИЛИ (рис. 13-19).

Размагничивающее напряжение $U_{ур}$ не подается на обмотку w_y только в том случае, если на все три входа поданы управляющие напряжения. Если хотя бы на один вход, например 3, напряжение не подается, то остается открытым диод D_8 , через который подается размагничивающее напряжение $U_{ур}$.

При подаче отрицательного напряжения на входы x_1 — x_4 схемы рис. 13-22, а на выходе появляется отрицательное напряжение, которое является выходным. В отличие от элемента Т-101 элемент Т-106 является пассивным, его выходное напряжение зависит от входного сигнала. Элемент Т-106 может быть включен на вход элемента Т-101, соединенного по схеме ИЛИ. При этом увеличивается число входов и выходной сигнал поднимается до необходимого уровня (активный элемент).

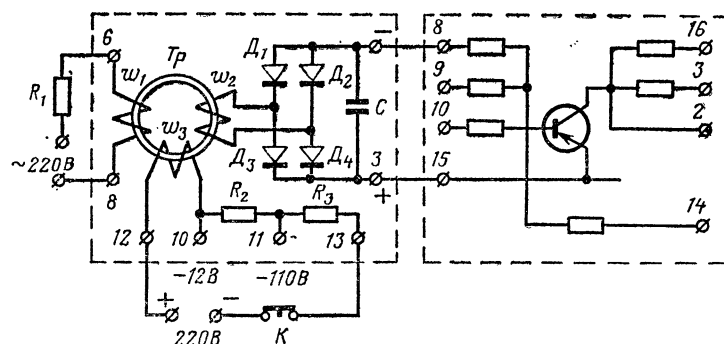


Рис. 13-23. Согласующий элемент Т-201.

Элемент Т-107 (рис. 13-22, б) работает следующим образом. При отсутствии входных сигналов диоды D_1 — D_3 открыты источником U_n . Внутреннее сопротивление источников сигналов управления e_c практически равно нулю ($R_c=0$). Таким образом, сопротивление нагрузки R_n шунтировано прямым сопротивлением диодов и сопротивлением R_c . Поскольку эти сопротивления малы, напряжение на выходе равно нулю. При подаче сигналов на все три входа диоды D_1 — D_3 запираются напряжением сигнала и на выходе появляется напряжение (выполняется функция И). Сигнал с выхода может подаваться на два блока ИЛИ-НЕ, соединенные последовательно (рис. 13-21). Использование элементов Т-106 и Т-107 позволяет упростить схему автоматики.

Число входов элементов Т-106 (ИЛИ) не более десяти. При подаче сигнала на один вход через диоды остальных входов протекает обратный ток, который вызывает понижение напряжения источника сигнала.

Число входов элемента Т-107 (И) также не более десяти. Допускается последовательное соединение только двух диодных ячеек И. Дело в том, что при последовательном соединении диодов возрастает падение напряжения на них в открытом состоянии и увеличивается значение сигнала 0.

В случае необходимости гальванической развязки цепей применяются специальные согласующие элементы Т-201 (рис. 13-23). При замкнутой кнопке К сердечник трансформатора глубоко насыщен магнитным полем обмотки w_3 , питаемой постоянным током. Поэтому между обмотками w_1 и w_2 трансформаторная связь отсутствует. При размыкании кнопки К сердечник трансформатора становится

ся ненасыщенным. Вследствие трансформации на обмотке ω_2 появляется переменное напряжение, которое после выпрямления и сглаживания подается на вход логического элемента.

В заключение отметим, что выходная мощность логических элементов и функциональных блоков недостаточна для воздействия на исполнительные элементы (мощные электромагниты и др.). Поэтому логические элементы питают выходные элементы, которые могут выполняться на магнитных усилителях, транзисторных усилителях или тиристорах. Так, в серии «Логика Т» усилитель Т-405 имеет мощность 100 Вт. Подробно параметры, схемы, указания по эксплуатации приведены в [Л. 13-6].

13-8. Полупроводниковые функциональные элементы

Для схем автоматики часто бывает необходимым выполнить функции «память», «время» и др.

а) **Элемент памяти.** В качестве элемента памяти в серии «Логика Т» используется триггер. Условное

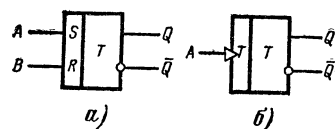


Рис. 13-24. Условные обозначения триггеров.

обозначение триггера представлено на рис. 13-24. Триггер может иметь два входа — рис. 13-24, а или один вход — рис. 13-24, б. Один выход всегда находится в состоянии 0, другой — в состоянии 1. При подаче сигнала на вход А на выходе Q появляется 1, а на выходе \bar{Q} — 0. Эта информация будет сохраняться в триггере до тех пор, пока не будет подан сигнал на вход В. Вторичная подача импульса на вход А не меняет состояние триггера. Входы А и В могут быть объединены. Тогда при подаче первого импульса триггер запоминает информацию. При подаче второго он возвращается в исходное состояние. Такие устройства называют триггерами со счетным входом.

Схема триггера приведена на рис. 13-25. Устройство состоит из двух транзисторных ключей (на Т1 и Т2) и двух потенциально импульсных ячеек D_1, C_1, R_5, R_9 на входе Т1 и D_2, C_2, R_8, R_{10} на входе Т2. Каскады на Т1 и Т2 имеют глубокую положительную обратную связь через резисторы R_3 и R_4 , обеспечивающие релейный режим работы.

Рассмотрим вначале работу потенциально-импульсной ячейки (рис. 13-26). При подаче на вход 1 сигнала 1 на выходе 4 появляется отрицательный импульс напряжения, равный $i_{заряда} R_1$. Диод Д закрыт, и на выходе 3 сигнал отсутствует. После снятия сигнала со

входа 1 (подается нуль) конденсатор C_1 разряжается на резистор R_1 . Диод открывается и на выходе появляется положительный импульс. Такая ячейка (Логика Т-104, Т-105) служит для превращения длительных сигналов 0 и 1 в соответствующие импульсы. Вернемся к схеме рис. 13-25. Пусть T_1 открыт, а T_2 закрыт. На выходе 8 имеем выходной сигнал 1, а на выходе 7 — нулевой сигнал 0. Большой отрицательный потенциал с коллектора T_2 подается через резистор R_3 на базу T_1 и обеспечивает его надежное открытие. Поскольку

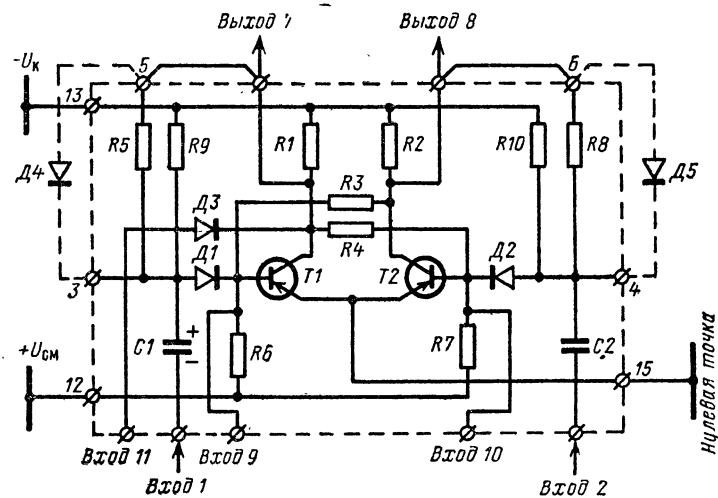


Рис. 13-25. Элемент Т-102 (маломощный триггер).

транзистор T_1 открыт, то за счет напряжения смещения $+U_{см}$ (ток течет от $+U_{см}$ через резисторы R_7 , R_4 , транзистор T_1) создается положительный потенциал на базе T_2 , что обеспечивает его закрытие. Поскольку к катоду диода D_2 приложен положительный потенциал, а к аноду — отрицательный (через делитель R_8 , R_{10}), то этот диод закрыт. К катоду диода D_1 приложен отрицательный потенциал (от коллектора T_2 через резистор R_3), а к аноду — практически нулевой ($-U_{ак.в1}$). Поэтому диод D_1 открыт. При подаче входного отрицательного сигнала 1 на вход 1 происходит заряд конденсатора C_1 через резисторы R_5 и открытый транзистор T_1 . Полярность напряжения на конденсаторе указана на рисунке. Однако на базу T_1 сигнал не поступает (рис. 13-26). После подачи сигнала 0 на вход 1 нижняя обкладка соединяется с нулевой шиной, а верхняя имеющая положительный потенциал, подается на базу T_1 и он закрывается. При этом отрицательный потенциал с коллектора T_1 подается на

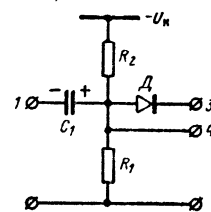


Рис. 13-26. Потенциально-импульсная ячейка (элементы Т-104, Т-105).

базу T_2 и последний открывается. При этом D_1 закрывается, а D_2 открывается. Так как диод D_1 закрыт, то при повторной подаче сигнала на вход 1 триггер не меняет своего состояния. Если теперь подать и снять сигнал на входе 2, то транзистор T_2 закроется, а транзистор T_1 откроется и триггер вернется в исходное положение. Наличие диодов D_1 и D_2 обеспечивает нормальную работу триггера при объединении входов 1 и 2. При первом сигнале закрывается транзистор T_1 , при втором — закрывается транзистор T_2 .

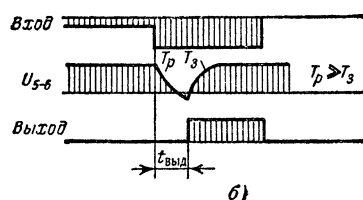
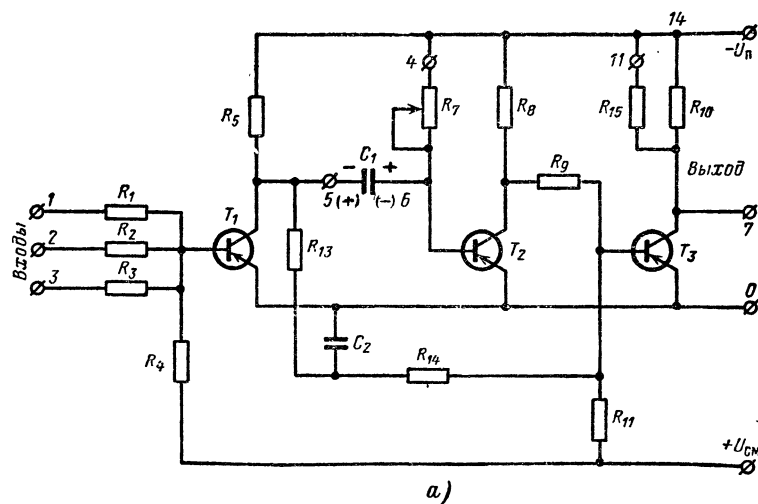


Рис. 13-27. Упрощенная схема элемента времени (Т-303).

Сопротивления резисторов обратной связи R_3 и R_4 выбраны небольшой величины ($R_3 = R_4 = R_1 = R_2$), что обеспечивает стабильность параметров триггера.

Поскольку после подачи команды на вход идет заряд конденсатора C_1 через резистор R_5 , то число срабатываний триггера за 1 с не должно превышать 5000. Для повышения частоты операций (до 15 000) резисторы R_5 и R_8 шунтируются диодами D_4 и D_5 .

б) **Элемент времени.** Простейшим элементом малой задержки времени являются RC -цепочки (Т-301).

Для создания больших выдержек времени служит элемент Т-303. Упрощенная схема элемента дана на рис. 13-27, а. При отсутствии входного сигнала на входах 1, 2, 3 транзистор T_2 находится в на-

сыщении, так как к его базе приложен потенциал $-U_{\text{п}}$ через резистор R_7 . Поскольку T_1 закрыт, то потенциал $-U_{\text{п}}$ приложен к базе T_3 через резисторы R_5, R_{13}, R_{14} . Транзистор T_3 насыщен, и на выходе элемента выдается 0. Конденсатор C_1 заряжается до напряжения $U_{\text{п}}(R_5 \ll R_{13} + R_{14})$ с указанной на рисунке полярностью.

Транзистор T_3 выполняет роль элемента ИЛИ-НЕ с двумя резисторными входами R_9 и $R_{13} + R_{14}$.

При подаче сигнала на вход T_1 насыщается. Зажим 5 через T_1 соединяется с нулевой шиной и происходит перезаряд конденсатора C_1 на обратную полярность (показана в скобках). После открытия T_1 вначале на базу T_2 подается положительный потенциал (зажим 6 конденсатора C_1). Этот потенциал спадает по закону: $U_6 = U_{\text{п}} - 2 U_{\text{п}}(1 - e^{-t/T_p})$, где $T_p = C_1 R_7$.

Через время $t = 0,7 T_p$ потенциал точки 6 упадет практически до нуля. Под действием положительного потенциала $+U_{62}$ транзистор T_2 закрывается и остается в отсечке до тех пор пока U_{62} не достигнет нуля. В этот момент времени T_3 находится в насыщении за счет тока базы i_{63} , определяемого сопротивлениями R_8 и R_9 (транзистор T_2 закрыт). После открытия T_2 транзистор T_3 запирается напряжением смещения $+U_{\text{см}}$. На выходе появляется сигнал, который будет держаться до тех пор, пока имеется сигнал на входах 1, 2, 3. После снятия входного сигнала транзистор T_1 закрывается, при этом открывается T_3 через резисторы R_{13} и R_{14} . Выходной сигнал пропадает. Конденсатор C_1 заряжается через резистор R_5 . Так как $R_5 \ll R_7$, то время заряда конденсатора значительно меньше выдержки времени реле. Для правильной работы реле повторный импульс на вход реле можно подавать не ранее, чем через $(3-4) R_5 C_1 = (3-4) T_3$. В противном случае конденсатор C_1 не будет успевать заряжаться до напряжения $U_{\text{п}}$. Временная диаграмма работы реле представлена на рис. 13-27, б.

Если транзистор T_2 находится в насыщении, то при подаче входного сигнала возможен случай, когда транзистор T_1 откроется раньше, чем закроется транзистор T_2 . При этом на выходе реле может появиться напряжение — ложный сигнал. Конденсатор C_2 предотвращает появление такого сигнала. В полной схеме элемента Т-303 вместо одного транзистора T_2 используются два транзистора для повышения коэффициента усиления и получения необходимого выходного сопротивления.

Выдержка реле регулируется в пределах от 1 до 10 с. Максимальное значение сопротивления $R_7 \leq 150 \text{ кОм}$.

Для получения большей выдержки времени (до 100 с) применяется элемент Т-304.

Функциональные элементы на полупроводниковых приборах подробно рассмотрены в [Л. 13-7]. В настоящее время выпускаются логические элементы серии «Спектр», позволяющие осуществить более широкую гамму операций [Л. 13-13].

13-9. Применение тиристоров в аппаратах управления

а) **Свойства тиристора.** Тиристор является управляемым полупроводниковым вентилем. Условное обозначение тиристора дано на рис. 13-28, а. Там же приведена его вольт-амперная характеристика. Ток управления подается на управляющий электрод. При от-

сутствии сигнала управления ($I_y = 0$) и $U_{\text{макс}} < U_{\text{т.макс}}$ тиристор имеет большое (но конечное) сопротивление и через нагрузку протекает небольшой ток (ветвь 1 на рис. 13-28, а). Если $U_{\text{макс}} > U_{\text{т.макс}}$, то тиристор открывается и через нагрузку течет ток, определяемый ее сопротивлением. При номинальном токе управления $I_{y.n}$ переход на ветвь 2 происходит по пунктирной кривой. Таким

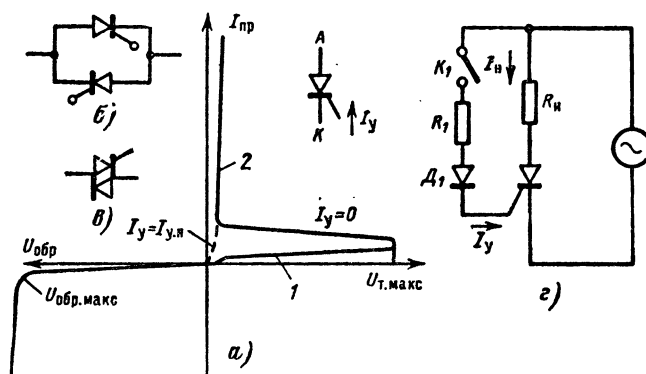


Рис. 13-28. Вольт-амперная характеристика тиристора, релейный элемент на тиристоре. Графическое изображение тиристора.

образом, при отсутствии тока управления $I_y = 0$ тиристор ведет себя как очень большое сопротивление, при наличии номинального тока управления — как очень малое сопротивление. После прохождения переменного тока через нуль тиристор восстанавливает свои вентильные свойства, цепь тока обрывается.

Эти свойства тиристора могут быть использованы для построения схем автоматического управления, создания усилителей, релейных элементов и для бездуговой коммутации электрических цепей.

Для регулирования тока в оба полупериода применяется схема включения рис. 13-28, б. В настоящее время создан полупроводниковый управляемый вентиль на оба направления — симметричный тиристор или симистор, обладающий свойствами схемы рис. 13-28, б. Условное обозначение симистора дано на рис. 13-28, в. Большим недостатком тиристора является гальваническая связь между входной цепью и управляемой цепью. В настоящее время созданы тиристоры с оптической системой уп-

равления (оптроны). Управляющий сигнал воздействует на светодиод. Световой поток этого диода воздействует на фототиристор, который открывается под действием светового потока. Уже сейчас созданы оптроны на ток $I_n=150$ А, напряжение источника 380 В, ток управления открытия 30 мА, срок службы 180 000 ч.

б) **Тиристор как релейный элемент.** Простейший релейный элемент, использующий тиристор, показан на рис. 13-28, г. Источник питания переменного тока. Цепь управления питается от того же источника. Напряжение питания выбирается так, что $U_{\max} < U_{T.\max}$. При разомкнутом ключе K_1 ток $I_y=0$, тиристор закрыт и ток в нагрузке R_n равен нулю. После замыкания K_1 при положительной полуволне напряжения тиристор открывается и через нагрузку протекает ток, пока полярность напряжения не станет отрицательной. В следующий положительный полупериод через нагрузку снова протекает ток. После размыкания ключа K_1 в положительный полупериод напряжения ток продолжает протекать через нагрузку до своего нулевого значения. После прохода тока через нуль цепь разрывается.

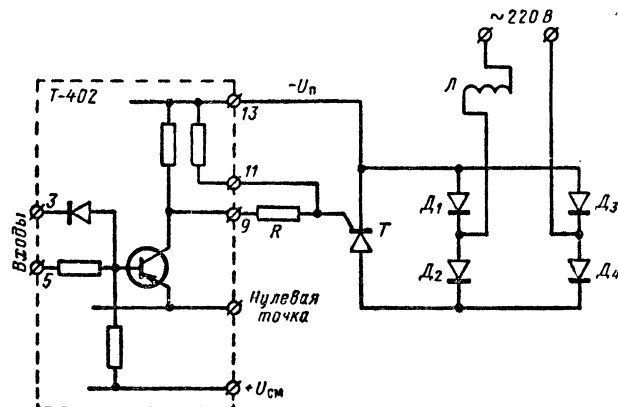
Резистор R_1 ограничивает ток I_y , а вентиль D_1 защищает управляющий переход тиристора от обратного напряжения. Следует отметить, что принципиально схема может работать и на постоянном токе, но для закрытия тиристора после снятия управляющего сигнала необходимо применение специальных схем, которые отключаемый постоянный ток превращают в переменный, после чего цепь разрывается тиристором.

Ключ K_1 может быть бесконтактным (транзистор, магнитный усилитель).

На рис. 13-29 представлена схема управления обмоткой L мощного контактора. Элемент Т-402 имеет мощность 3 Вт, недостаточную для управления таким контактором. При подаче напряжения на вход 3 или 5 транзистор открывается. Точка 9 соединяется с нулевой шиной. Потенциал управляющего электрода становится положительным. Тиристор открывается, и через него получает питание обмотка L . Резистор R ограничивает ток управляющего электрода. Коэффициент усиления тиристора по току достигает 10^4 , а по мощности 10^5 .

в) **Тиристор как регулирующий элемент.** Если использовать для управления тиристором МУС или БМУ, то, изменяя ток управления усилителя, мы можем изменять

7-1



The diagram shows a thyristor converter circuit with a feedback loop. The input is an AC voltage U_m . The thyristor T is in series with a load consisting of a resistor R_D and a capacitor C in parallel, followed by a resistor R_H . The feedback voltage U_H is taken across R_H and fed back to the control input of the thyristor through a diode D_2 . The output of the converter is connected to a load consisting of a resistor R_L and an inductor L in parallel, followed by a diode D_1 . The output voltage is U_H and the output current is i_H . The graph shows the input voltage u and the output current $i_H = i_a$ over one cycle of the input voltage. The output current is zero during the interval $[0, \alpha]$ and follows the input voltage during the interval $[\alpha, \pi]$. The output voltage is zero during the interval $[\pi, 2\pi]$ and follows the input voltage during the interval $[2\pi, 2\pi + \alpha]$.

Рис. 13-30. Тиристорная схема управления двигателем постоянного тока.

396

токе управления МУС, равному нулю, ток нагрузки через резистор R_n был минимальным. Диод D_2 служит для того, чтобы тиристор T не открывался током холостого хода МУС (напряжение холостого хода на резисторе R_n меньше порогового напряжения диода D_2). При подаче тока управления в МУС напряжение, создаваемое на резисторе R_n , открывает тиристор, через двигатель протекает ток i_a . Из-за наличия индуктивности цепи якоря тиристор закрывается не в нуле напряжения, а в момент t_2 , когда ток становится равным нулю. Регулируя ток управления МУС, можно менять угол открытия тиристора α и средний ток, протекающий через якорь.

г) **Тиристорный пускатель.** На рис. 13-31 приведена одна из возможных схем тиристорного пускателя. Пускатель имеет следующие основные блоки: B_1 — силовой блок. В рассечку каждой фазы включены тиристоры VU_1 — VU_3 и диоды D_1 — D_3 , рассчитанные на номинальный и пусковой токи двигателя АД. При подаче сигнала на управляющие электроды тириستоров они переходят в открытое состояние и подключают двигатель к сети. В отрицательный полупериод, когда тиристоры закрываются отрицательным анодным напряжением, ток двигателя пропускается диодами. В более дорогих схемах вместо диодов тоже установлены тиристоры.

При снятии сигнала управления с тиристоров (при перегрузке, потере фазы, нажатии кнопки *Стоп*) они закрываются. Следующий полупериод тока пропускается диодами. После этого все три диода D_1 , D_2 , D_3 закрываются и двигатель отключается от сети (протекает небольшой ток утечки тиристоров и диодов).

Управляющие сигналы на тиристоры подаются от B_2 — блокинг-генератора. Транзистор T_3 работает в генераторном режиме. При подаче напряжения кнопкой *Пуск* (включается тиристор VU_5) все напряжение прикладывается к резистору R_{15} . При этом транзистор T_3 закрыт, так как напряжение на резисторе R_{15} больше, чем на резисторе R_{13} . По мере заряда конденсатора C_4 наступают условия для открытия транзистора T_3 и конденсатор начинает разряжаться на обмотку ω_1 . Электродвижущая сила, возникающая на обмотке ω_0 , способствует быстрому и полному открытию транзистора T_3 . При разряде конденсатора напряжение на резисторе R_{15} возрастает, T_3 закрывается и снова идет процесс заряда конденсатора C_4 . Таким образом генерируются импульсы тока в обмотке ω_1 и в трех выходных обмотках ω_2 появляются управляющие импульсы. Диоды D_{15} — D_{17} пропускают импульсы только положительной полярности. Длительность импульса 30 мкс, пауза между импульсами 300 мкс (частота около 3 кГц).

Возможны схемы с управлением сигналами постоянного тока или переменным током низкой частоты. Использование блокинг-генератора дает возможность быстро включать тиристор и уменьшить тепловую нагрузку по управляющему электроду.

Питание блокинг-генератора осуществляется от блока B_3 . При нормальном режиме транзистор T_2 находится в насыщении и лампа L_2 не горит. Если на зажимы 7, 8 подано напряжение от блока защиты B_4 , тиристор VU_4 включается и закорачивает источник питания, при этом генерация в блоке B_2 прекращается, тиристор VU_5

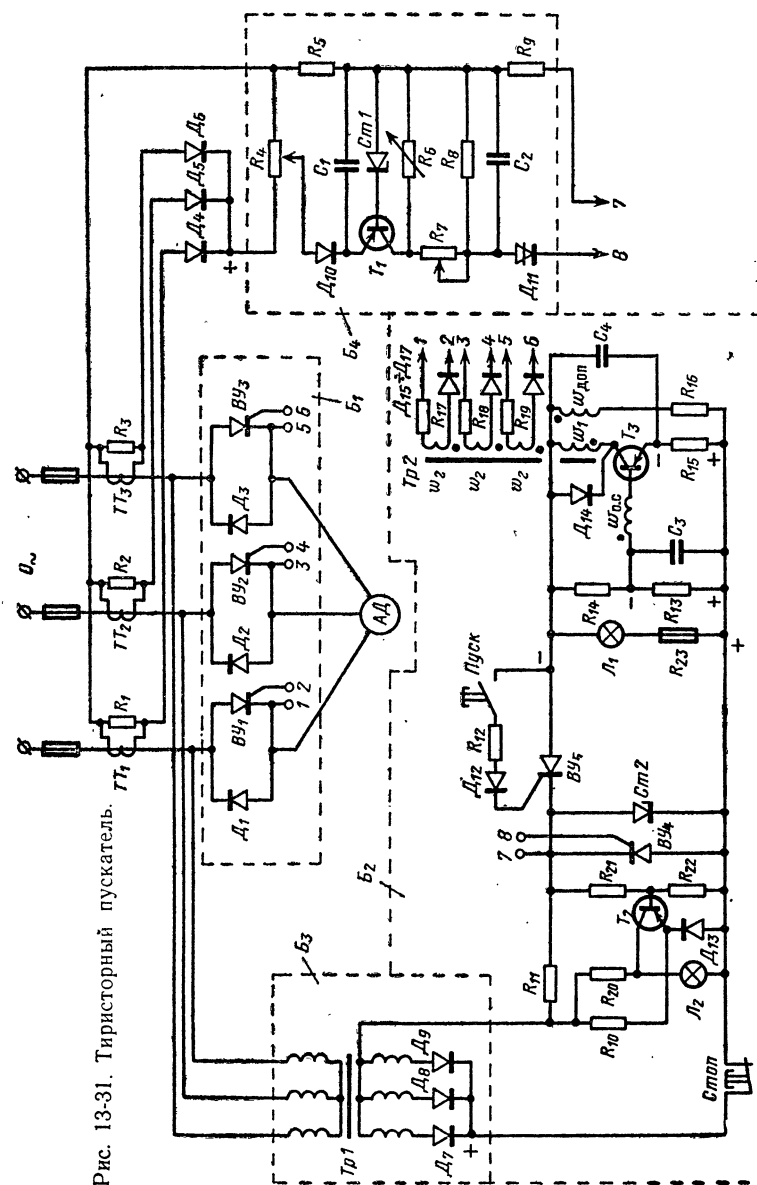


Рис. 13-31. Тиристорный пускатель.

отключается. Одновременно транзистор T_2 закрывается и лампа L_2 загорается, сигнализируя об отключении пускателя от защиты. В случае потери фазы в выходном напряжении (после диодов $D_7—D_9$) появляется пауза. В эту паузу блок B_2 останавливается, тиристор BU_5 отключается. Все это ведет к закрытию силовых тиристоров.

Блок B_4 защиты от перегрузки двигателя и силовых тиристоров питается от трансформаторов тока $TT_1—TT_3$. Напряжение с нагрузочных резисторов $R_1—R_3$ после выпрямления подается на потенциометр R_4 .

Стабилитрон $Ст1$ работает в режиме пробоя. До тех пор, пока напряжение на нем меньше напряжения пробоя ($U < U_{проб}$), стабилитрон имеет очень высокое сопротивление и ток базы транзистора T_1 недостаточен для его открытия. При напряжении $U > U_{проб}$ сопротивление стабилитрона резко падает, ток в базе T_1 возрастает и он насыщается. Ток в стабилитроне ограничивается резистором R_5 до величины, безопасной для него. Если восстановится неравенство $U < U_{проб}$, то стабилитрон снова приобретет высокое сопротивление и T_1 закроется. После открытия триода T_1 начинается заряд конденсатора C_2 . Однако напряжение на конденсаторе C_2 на выход $7, 8$ не подается до тех пор, пока это напряжение не превысит напряжения переключения динистора D_{11} . Динистор имеет такую же вольт-амперную характеристику, как и тиристор при $I_g = 0$. Если перегрузка была кратковременной, то напряжение на выходе не появляется и пускатель остается в работе. Если U_{C2} станет больше напряжения переключения динистора D_{11} , произойдет разряд конденсатора C_2 на цепь управления тиристора BU_4 и последний откроется. Параметр срабатывания изменяется потенциометром R_4 . В более сложных блоках защиты можно создать выдержку времени в зависимости от перегрузки.

Защита двигателя и силовых тиристоров от токов короткого замыкания в данном аппарате осуществляется специальными предохранителями типа ПНБ-5 (§ 17-4). По сравнению с контактными пускателями (§ 10-3) бесконтактный аппарат обладает следующими преимуществами.

1. Отсутствие электрической дуги при коммутациях делает аппарат незаменимым при работе во взрывоопасных и пожароопасных средах.
2. Высокая электрическая износостойкость ($15 \cdot 10^6$ циклов).
3. Возможность осуществления совершенных защит от перегрузки, токов короткого замыкания, потери фазы, что безусловно увеличит срок службы двигателя.
4. Допустимое число включений в час 2000.
5. Длительность отключения не более 0,02 с.

Следует отметить, что ограничение по износостойкости и числу включений в час зависит от конструкции и технологии производства тиристоров. В настоящее время уже созданы тиристоры новой конструкции, у которых эти величины практически не ограничены.

Недостатками тиристорного пускателя являются сложность схемы, громоздкость и высокая стоимость. Несмотря на эти недостатки, эти аппараты уже сейчас находят широкое применение во взрыво- и пожароопасных производствах. По мере совершенствования тиристорные пускатели найдут самое широкое применение.

Значительное уменьшение износа контактов и длительности горения дуги можно получить в тиристорно-контактной схеме рис. 13-32.

Контакт аппарата K шунтирован двумя тиристорами T_1 и T_2 . При появлении тока в замкнутой цепи на выходе трансформаторов тока TT_1 и TT_2 появляется напряжение, которое подается на управляющие электроды тиристоры. Диоды D_1 и D_2 обеспечивают возможность открытия одного тиристора только в положительной полуволне тока, а другого — только в отрицательной.

В момент размыкания контактов K они оказываются шунтированными открытым тиристором, например T_1 , и ток из ветви контактов перебрасывается в этот тиристор. После прохождения тока через нуль тиристор закрывается и цепь отключается. Тиристор T_2 не открывается, так как трансформатор тока TT_2 открывающего сигнала не выдает.

Для защиты тиристоры от высокого значения производной di/dt в цепь включен дроссель L (§ 13-9д). Следует указать, что переброс тока в открытый тиристор затрудняется тем, что для перехода тока в него необходимо напряжение между катодом и анодом 0,5—1 В [Л. 13-9]. Таким образом, после размыкания контактов возникает дуга, которая затем перехватывается тиристором. По сравнению со схемой рис. 13-31 схема рис. 13-32 обладает тем преимуществом, что при замкнутых контактах тиристоры током не обтекаются, отпадает необходимость в радиаторах. После размыкания контактов ток через тиристор протекает долю полупериода. При этом допустимый ток в десятки раз больше номинального значения, что позволяет брать тиристор на малый номинальный ток.

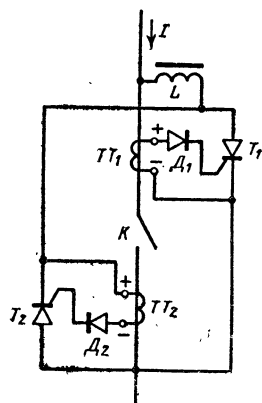


Рис. 13-32. Тиристорно-контактный коммутирующий аппарат.

В ВЭИ инж. И. В. Зайцевым разработан контактно-тиристорный выключатель высокого напряжения со следующими параметрами: $U_H = 10$ кВ, $I_H = 300$ А, $I_{ном.отк} = 5000$ А.

Применение тиристоры для шунтирования контактов позволило увеличить электрическую износостойкость контактов серии КТ-7000Б с $0,5 \cdot 10^6$ до $10 \cdot 10^6$, а серии КТП-7000Б до $15 \cdot 10^6$ циклов. Число допустимых включений в час возросло с 1200 до 2000.

Следует отметить, что после перехвата тока тиристором к моменту прохождения тока через нуль электрическая прочность междоу контактного промежутка должна быть достаточной, чтобы выдержать восстанавливающееся напряжение. Поэтому в качестве коммутатора используется камера КВД-21 (§ 19-9) с индукционно-динамическим приводом (§ 19-10). Каждый тиристор представляет собой столбик из 20 тиристоры без радиаторы. Номинальный ток тиристора 500 А, номинальное напряжение тиристора 1,5 кВ. Полное время отключения аппарата 0,01 с. Время расхождения контактов 0,001 с. Применение тиристоры позволило резко повысить число допустимых отключений токов короткого замыкания камерой КВД-21.

д) **Выбор тиристоры.** 1. Номинальный ток тиристора — среднее значение за период выпрямленного

тока при угле открытия $\alpha=0$ и номинальных условиях охлаждения. Средний ток установки не должен превышать номинальный ток тиристора. Расчет среднего тока для различных схем выпрямления приведен в [Л. 13-14].

2. Скорость нарастания прямого тока через вентиль определяется параметрами цепи. При большой скорости нарастания возможно повреждение структуры вентиля (прожигание). Поэтому должно быть

$$\left(\frac{di}{dt}\right)_{\text{установки}} < \left(\frac{di}{dt}\right)_{\text{доп. тиристора}}.$$

Иногда для ограничения в цепь ставятся специальные дроссели.

3. Ток выключения — величина прямого тока, обрываемого вентилем при разомкнутой цепи управления, должен выбираться так, чтобы минимальный мгновенный ток установки был больше этого тока.

4. Ток утечки — ток через прибор при номинальном запирающем напряжении и разомкнутой цепи управления. При последовательном соединении приборов распределение обратного напряжения по тиристорам обеспечивается делителем, ток которого должен быть значительно больше тока утечки.

5. Номинальное (классификационное) напряжение — максимально допустимое значение амплитуды напряжения синусоидальной формы, длительно прикладываемое в прямом и обратном направлении. Оно составляет примерно 60% напряжения переключения в прямом направлении $U_{\text{т. макс}}$ или напряжения загиба обратной ветви вольт-амперной характеристики $U_{\text{обр. макс}}$ при температуре 125° С.

6. Скорость нарастания прямого напряжения — максимальная скорость нарастания прямого напряжения; при которой еще не происходит переключения вентиля при номинальном напряжении и рабочей температуре. Поэтому необходимо, чтобы

$$\left(\frac{dU}{dt}\right)_{\text{установки}} < \left(\frac{dU}{dt}\right)_{\text{доп. тиристора}}.$$

7. Граничные значения тока I_y и напряжения U_y управления. Эти величины определяются системой, которая управляет тиристором. Они выбираются таким образом, чтобы обеспечить быстрое и надежное его открытие в требуемый момент времени и, с другой стороны, избежать повреждения тиристора.

Диаграмма управления тиристора дана на рис. 13-33. Величины i_y и U_y должны лежать в области между кривыми 1 и 2, определяющими надежное открытие тиристора. Кривая $P_{y, \text{доп}}$ определяет предельно допустимую

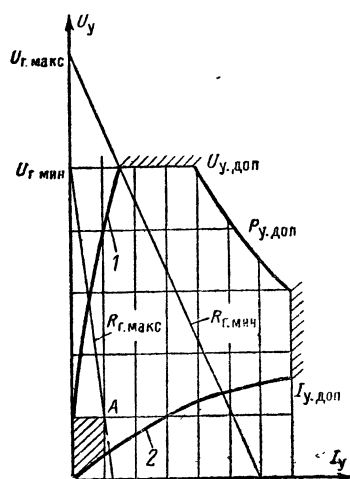


Рис. 13-33. К выбору параметров тиристора.

мощность потерь в цепи управления прибора. Кроме того, задаются предельно допустимые значения тока управления $I_{y, \text{доп}}$ и напряжения управления $U_{y, \text{доп}}$. Линия нагрузки при $U_g = U_{g, \text{мин}}$ и $R_g = R_{g, \text{макс}}$ не должна проходить ниже точки пересечения A граничных значений тока и напряжения при самой низкой заданной температуре, а при $U_g = U_{g, \text{макс}}$ и $R_g = R_{g, \text{мин}}$ не должна пересекать линий допустимых значений тока, напряжения и мощности потерь в цепи управления. Длительность включающего импульса берется такой, чтобы к моменту

его окончания ток успел нарасти до значения, превышающего ток выключения в 2—5 раз. При уменьшении длительности открывающего импульса возрастает величина тока управления. Так, при сокращении импульса со 100 до 10 мкс, ток управления возрастает в 2 раза. Рекомендуемая скорость нарастания управляющего тока $\frac{dI_y}{dt} = 0,2 \div 2$ А/мкс. Во избежание ложного включения величина напряжения помехи на управляющем электроде должна быть меньше минимального напряжения открытия в заданных условиях.

13-10. Транзисторные элементы релейной защиты для высоковольтных распределительных устройств и низковольтных автоматических выключателей

Стремление сделать релейную защиту более совершенной, малогабаритной, внедрение прогрессивной технологии и автоматизации производственных процессов привели к созданию устройств за-

щиты, автоматики и управления КРУ 3—10 кВ (§ 25-2) на полупроводниковых приборах. В этих устройствах используются серийные элементы «Логика Т» (§ 13-7). Устройство выполнено в виде отдельных, конструктивно оформленных блоков релейной защиты, автоматики и управления [Л. 13-10].

Рассмотрим модуль релейной защиты, структурная схема которого представлена на рис. 13-34. В качестве логических элементов и оконечных усилителей используются элементы Т-205, Т-303 и Т-402.

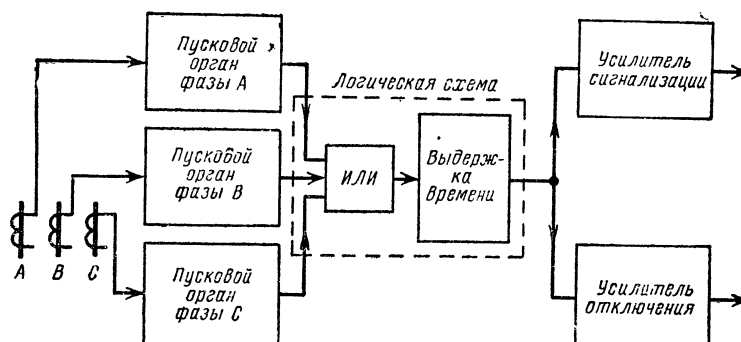


Рис. 13-34. Структурная схема модуля защиты.

Работа элемента выдержки времени Т-303 рассмотрена в § 13-8. Разберем более подробно работу пускового органа (рис. 13-35). Разделительный насыщающийся трансформатор с отпайками служит для регулирования тока срабатывания и ограничения входного сигнала на элементе Т-109 при больших кратностях тока.

Напряжение, пропорциональное первичному току (для линейной зоны T_p), подается на выпрямительный мост. После выпрямления сигнал поступает на вход релейного усилителя (§ 13-3), выполненного на элементе Т-205. До тех пор, пока напряжение $U_{вх}$ меньше напряжения пробоя $U_{проб}$ стабилитрона Д6 все транзисторы усилителя находятся в состоянии отсечки и выходной сигнал отсутствует. При $U_{вх} > U_{проб}$ все транзисторы переходят в насыщенное состояние и на выходе появляется сигнал, который поступает на элемент времени.

Плавное регулирование тока срабатывания $I_{ср}$ осуществляется резистором R_4 , скачкообразное — отпайками трансформатора T_p . Для расширения диапазона изменения $I_{ср}$ трансформатор T_p выпускается в нескольких модификациях.

Для защиты пускового органа при больших кратностях тока предусмотрен диод Д5, закрытый напряжением $U_{п2}=24$ В. При напряжении $U_{вх} > U_{п2}$ диод Д5 шунтирует вход элемента Т-205.

Распределительное устройство снабжается также модулем автоматики на элементах «Логика Т», который обеспечивает защиту от перегрузки электродвигателей, питающихся от КРУ. Время выдержки обратно пропорционально квадрату тока нагрузки. Кроме того, модуль автоматики содержит устройства, обеспечивающие

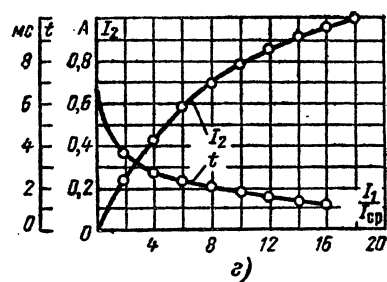
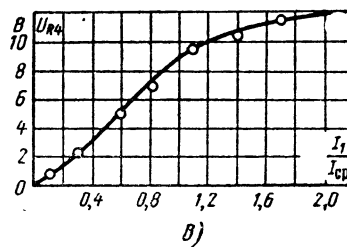
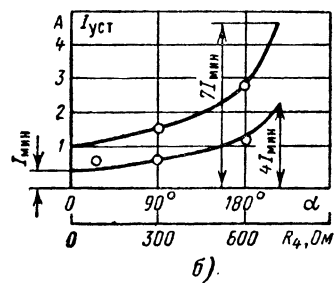
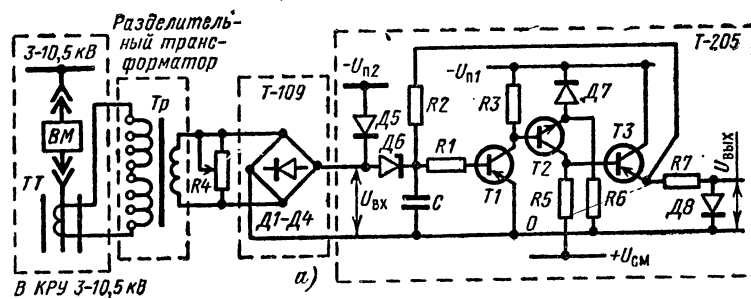


Рис. 13-35. Пусковой орган.

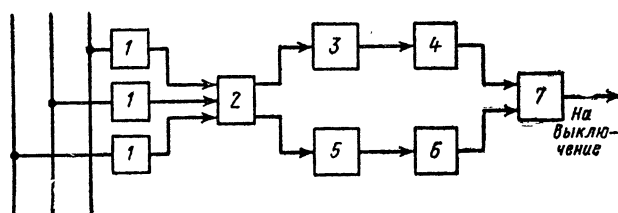


Рис. 13-36. Схема бесконтактного устройства защиты.

автоматическое повторное включение, автоматическое включение резерва и др. Модуль управления содержит усилители мощности. На вход этого модуля подаются команды от модуля защиты, автоматики и командоаппаратов. Выход усилителей воздействует на силовые цепи — электромагниты включения, отключения выключателя, элементы сигнализации.

На базе полупроводниковых элементов созданы релейные защиты от перегрузки и токов короткого замыкания для автоматических выключателей (автоматов) низкого напряжения (гл. 18) [Л. 13-15]. Блок-схема устройства представлена на рис. 13-36.

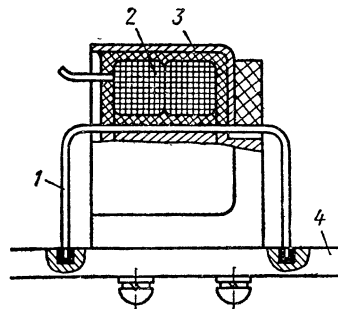


Рис. 13-37. Датчик постоянного тока на базе магнитного усилителя.

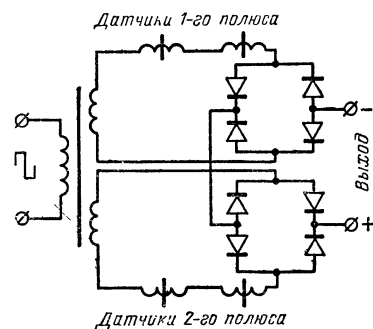


Рис. 13-38. Схема включения датчиков в два полюса автомата.

Измерительные элементы 1 выдают сигнал, пропорциональный току нагрузки автомата. Они же являются источниками питания всего устройства. Блок 2 выделяет из трех сигналов блоков 1 наибольший и подает его на цепочку перегрузки (блоки 3 и 4) и на цепочку тока короткого замыкания (блоки 5 и 6). Блок 3 — это реле тока, блок 4 — реле времени. Последнее создает выдержку времени, обратно пропорциональную току нагрузки. В цепочке короткого замыкания блок 5 играет роль реле тока, а блок 6 — реле времени. В этой цепочке реле 6 создает выдержку времени, независимую от тока.

Блок 7 является усилительным органом, питающим электромагнит расцепителя (§ 18-4).

При переменном токе в качестве датчика тока используют насыщающийся трансформатор.

На постоянном токе в качестве датчика используется дроссельный магнитный усилитель в режиме подавления четных гармоник в цепи управления [Л. 6-1]. В таком режиме сохраняется равенство мгновенных и средних значений м. д. с. рабочей обмотки и м. д. с. обмотки управления усилителя $I_p \omega_p = I_y \omega_y = I_y$, так как $\omega_y = 1$.

В качестве обмотки управления используется шина, по которой протекает измеряемый постоянный ток. Выпрямленный мостом ток

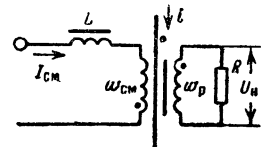


Рис. 13-39. Магнитный элемент уровня тока.

рабочей обмотки пропорционален току управления. Этот ток используется для работы пускового органа. На рис. 13-37 показан такой датчик. Тороидальный магнитопровод с обмотками 2 защищен магнитным экраном 3. Часть тока автомата ответвляется в шунт 1. Схема включения датчиков в двух полюсах выключателя показана на рис. 13-38. Источник переменного тока имеет э. д. с. с прямоугольной формой кривой. Недостатком датчика по рис. 13-37 является сложность припайки шунта к шине 4 и недостаточное быстродействие (5—10 мс) [Л. 13-15].

Более быстродействующим является датчик рис. 13-39. Ток управления протекает по шине, пропущенной через окно тороидального сердечника с обмотками. Магнитопровод выполнен из материала с прямоугольной петлей гистерезиса. Элемент имеет рабочую обмотку w_p , включенную на нагрузку R и обмотку смещения $w_{см}$. Для устранения наведенного тока в цепи обмотки смещения включен дроссель L . В номинальном режиме $|I_H| < I_{см} w_{см}$ и магнитопровод находится в насыщенном состоянии. Для срабатывания элемента необходимо условие:

$$I_{сраб.к.э} = I_{см} w_{см} + 2H_c l,$$

где $2H_c$ — динамическая ширина петли гистерезиса;

l — средняя длина тороида.

При достижении током значения $I_{сраб.к.э}$ происходит перемагничивание магнитопровода и на нагрузке появляется импульс, который используется для запуска последующих полупроводниковых элементов защиты.

Глава четырнадцатая

ДАТЧИКИ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

14-1. Общие сведения

Автоматизация производственных процессов, автоматическое управление сложными системами немыслимы без датчиков неэлектрических величин. Датчик преобразует непрерывное изменение входной (контролируемой) величины в изменение какой-либо электрической величины, являющейся выходной величиной.

Датчики могут быть основаны на применении самых разнообразных физических явлений. В качестве выходных величин чаще всего используются активное, индуктивное, емкостное сопротивления, ток, э. д. с. или падение напряжения, частота и сдвиг фаз переменного тока. Основной характеристикой датчика является его чувствительность

$$S = \Delta Y / \Delta X,$$

где ΔY — приращение выходной величины;
 ΔX — приращение входной величины.

В практике пользуются также относительной чувствительностью

$$S_o = \frac{\Delta Y / Y}{\Delta X / X},$$

где Y — полное изменение выходной величины;

X — полное изменение входной величины.

Датчики могут быть линейными ($S = \text{const}$) и нелинейными ($S = \text{var}$). У последних чувствительность зависит от значения входной величины.

Существенным параметром датчика является порог чувствительности — это изменение входной величины, вызывающее наименьшее изменение выходной величины, которое может быть обнаружено без каких-либо дополнительных устройств.

Важнейшим параметром датчика является его погрешность.

Номинальной характеристикой датчика называется зависимость выходной величины от входной, которая приписывается паспортом и используется как расчетная при проведении измерений. Экспериментально снятая, реальная зависимость «вход — выход» отличается от номинальной на погрешность.

Различают абсолютную и относительную погрешности датчика по входу.

Абсолютная погрешность ΔX равна:

$$\Delta X = X_{\text{вх.н}} - X_{\text{д}},$$

относительная погрешность

$$\gamma_o = \Delta X / X_{\text{д}},$$

где $X_{\text{вх.н}}$ — значение входной величины датчика, определяемое по физическому значению выходной величины и номинальной характеристике;

$X_{\text{д}}$ — истинное значение входной величины.

Аналогично могут быть рассмотрены погрешности датчика по выходу.

На погрешность оказывают влияние внешние условия: температура, магнитные и электрические поля, влажность окружающей среды, напряжение и частота источника питания, вибрации и др.

Допустимая интенсивность внешних (влияющих) факторов ограничивается техническими условиями или стандартом.

Погрешности датчика при нормальных значениях влияющих внешних факторов называются основными.

На рис. 14-1 показана зависимость относительной погрешности γ_o от входной величины X . Здесь X_n — нижнее значение, X_v — верхнее значение входных величин, при которых нормируется основная погрешность.

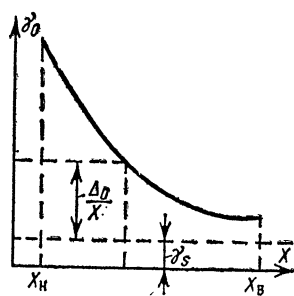


Рис. 14-1. Погрешности датчиков.

Различают аддитивную погрешность, независимую от X , и мультипликативную погрешность, зависящую от входной величины (погрешность чувствительности).

Абсолютная и относительная погрешности выражаются формулами:

$$\Delta X = \pm (\Delta_o + \gamma_s X);$$

$$\gamma_o = \pm [\gamma_s + (\Delta_o/X)],$$

где Δ_o — аддитивная погрешность;

γ_s — относительная погрешность чувствительности.

Если влияющие внешние факторы выходят за границы нормируемых, то возникают дополнительные погрешности. Для уменьшения дополнительных погрешностей либо снижают чувствительность датчика к внешним факторам, либо уменьшают их действие путем экранирования и других средств.

Наряду с высокой чувствительностью и малой погрешностью датчики должны обладать следующими свойствами: необходимым диапазоном изменения входной величины, удобным согласованием с измерительной схемой, минимальным воздействием на входную величину. При быстропотекающих процессах изменения входной величины важно, чтобы датчик был малоинерционным.

Существует весьма большое число как принципов датчиков, так и их конструктивных оформлений. В табл. 14-1 рассмотрены принципы действия и области применения индуктивных датчиков, имеющих очень широкое распространение.

Датчики можно разбить на две большие группы — параметрические (пассивные) и генератор-

Т а б л и ц а 14-1

Принципы действия индуктивных датчиков

Входные величины	Способы изменения магнитной проводимости
Перемещение	Изменение воздушного зазора
Сила, давление	1. Магнитоупругий эффект — изменение магнитной проницаемости под действием силы, давления 2. Прогиб гибкой мембраны и перемещение якоря, связанного с ней. Изменение воздушного зазора
Температура	Изменение магнитной проницаемости
Напряженность магнитного поля	Изменение магнитной проницаемости (дроссели насыщения)

ные (активные). К последним относятся датчики, использующие эффект электромагнитной индукции, пьезоэффект, эффект Холла и появление э. д. с. при воздействии радиоактивных излучений, термопары, фотоэлементы с запирающим слоем и т. п.

В настоящем учебнике мы рассматриваем устройство, основные характеристики и область применения некоторых датчиков, которые по своему принципу действия близки к электроаппаратостроению. Подробные сведения по датчикам самых различных принципов даны в [Л. 14-1—14-3, 14-6, 3-14].

14-2. Резистивные и контактные датчики

а) **Резистивный датчик.** В таких датчиках ползунок переменного резистора связан с элементом, перемещение которого контролируется. Конструктивные исполнения датчика могут быть разнообразными (рис. 14-2).

Если сечение каркаса датчика всюду одинаково (рис. 14-2, а и б), то сопротивление датчика меняется пропорционально углу поворота α или ходу x . При необходимости зависимость $R(\alpha, x)$ может быть сделана нелинейной, если каркас имеет переменное сечение или резисторы $r_1—r_6$ неодинаковы по сопротивлению (рис.

14-2, в и г). Возможные схемы включения датчиков приведены на рис. 14-3. Наиболее простой является реостатная схема рис. 14-3, а. Широко применяется потенциометрическая схема рис. 14-3, б. Если входное сопротивление измерительной схемы велико, то выходное напряжение связано с α или x уравнением (14-1) и не зависит от сопротивления R_0 :

$$U_{\text{вых}} = \frac{U_0}{\alpha_{\text{макс}}} \alpha \quad \text{или} \quad U_{\text{вых}} = \frac{U_0}{x_{\text{макс}}} x. \quad (14-1)$$

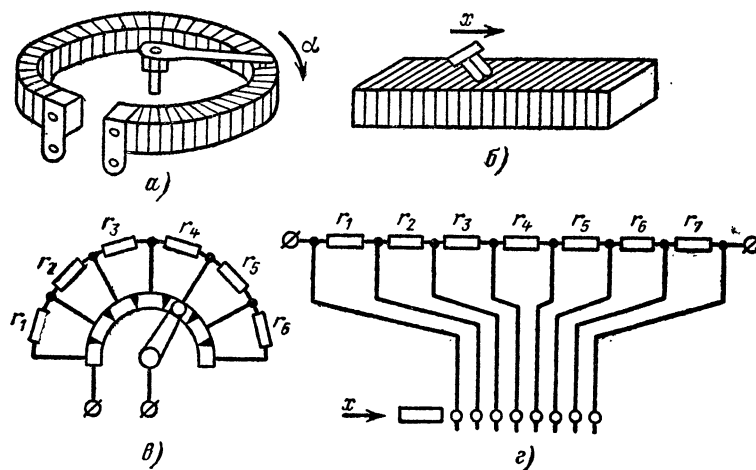


Рис. 14-2. Схемы выполнения резистивных датчиков.

Рассмотрим чувствительность S для датчика с поступательным движением ползунка.

Чувствительность S равна:

$$S = \frac{dU_{\text{вых}}}{dx} = \frac{U_0}{x_{\text{макс}}}. \quad (14-2)$$

Для повышения чувствительности желательно увеличивать напряжение питания U_0 . Однако при этом растет мощность, рассеиваемая датчиком. Максимальная чувствительность $S_{\text{макс}}$ равна:

$$S_{\text{макс}} = \frac{\sqrt{P_{\text{макс}} R_0}}{x_{\text{макс}}},$$

где $P_{\text{макс}}$ — наибольшая допустимая мощность резистора R_0 .

При больших сопротивлениях R_0 предел увеличения чувствительности ограничивается возможностью перекрытия изоляции датчика. В схеме рис. 14-3, в при перемещении ползунка вниз от начального положения ($\alpha = 0$) выходное напряжение имеет одну полярность, а при

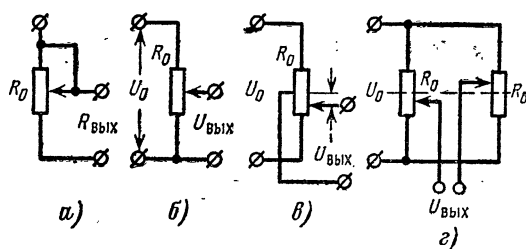


Рис. 14-3. Схемы включения резистивных датчиков.

перемещении вверх напряжение меняет знак. В схеме рис. 14-3, г при перемещении левого ползунка вниз правый с помощью механической передачи движется вверх. При этом чувствительность возрастает в 2 раза. Чувствительность резистивных датчиков составляет 3—5 В/мм.

Точность работы датчиков зависит от стабильности питающего напряжения U_0 , точности изготовления датчика, его температурной стабильности. Поэтому для датчика следует применять проволоку с малым температурным коэффициентом сопротивления.

Для регистрации хода контактов силовых коммутационных аппаратов очень удобна схема включения, на рис. 14-4, а.

Выходное напряжение датчика подается на осциллографический гальванометр.

Зная ширину неподвижного контакта, ширину изоляционной пластины и масштаб времени, можно найти время Δt_1 , которое требуется для прохождения участка Δx_1 . Пример осциллограммы процесса представлен на рис. 14-4, б.

Скорость на первом участке равна $v_1 = \Delta x_1 / \Delta t_1$. Аналогично находится скорость на других участках хода.

Достоинством такого датчика является независимость его точности от питающего напряжения.

Преимуществами резистивных датчиков являются: простота конструкции, высокая точность работы (до 0,5%), малая масса и габариты, высокая стабильность.

Недостатком является наличие подвижного контакта, ухудшающего надежность работы и уменьшающего срок службы.

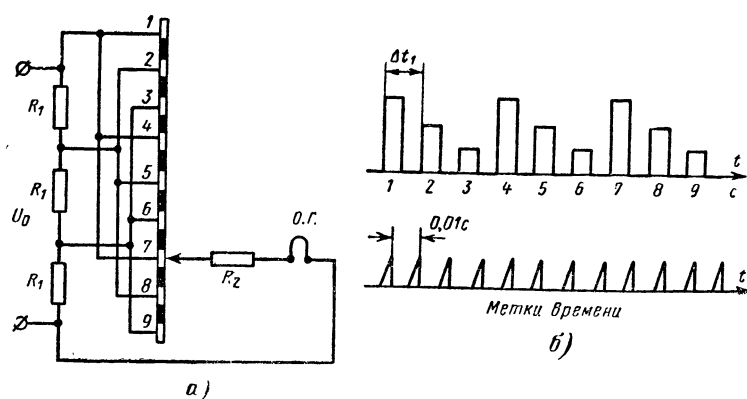


Рис. 14-4. Схема резистивного датчика хода высоковольтных выключателей.

Резистивные датчики применяются для контроля перемещений, уровня жидкости (датчик соединяется с поплавком), силы (датчик соединяется с упругим элементом, деформируемым силой), размеров.

б) **Контактные (релейные) датчики.** Для контроля размеров деталей, отбраковки негодных изделий широко применяются контактные датчики (рис. 14-5).

В качестве индикаторов используются лампы тлеющего разряда 1—3. Если толщина детали находится в поле допуска, то горит лампа 2. Если толщина детали больше нормы, то замыкаются контакты 4 и 5, загорается лампа 1 и гаснет лампа 2. Если толщина детали меньше нормы, то замыкаются контакты 4 и 6, загорается лампа 3 и гаснет лампа 2.

Теория работы контактов подробно рассмотрена в гл. 3. Здесь необходимо отметить, что точность и надежность работы датчика зависят от работы контактной системы. Напряжение на контактах и ток в них не должны превышать значений, приведенных в табл. 3-3.

Дугообразование должно быть исключено. Для уменьшения износа контактов целесообразно применять схемные методы § 3-2.

Следует отметить, что при малом расстоянии между контактами (1 мкм) даже напряжение 10 В создает высокие градиенты поля $E=10^7$ В/м, которые могут приводить к интенсивной эрозии контактов. Мощность, управляемая контактами, не должна превышать 100—150 мВт [Л. 14-2].

Большое значение для работы датчика имеет выбор материала контактов. Хорошие результаты получены с контактами из сплава палладия и иридия и сплава вольфрама с рением [Л. 14-2]. Контактные давления 0,03 Н. Минимальная погрешность при срабатывании контактного датчика находится в пределах 1—2 мкм.

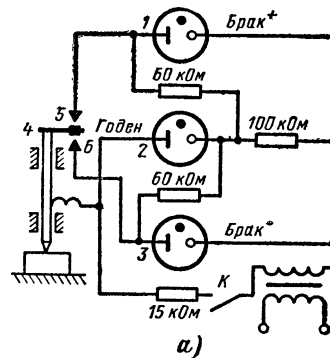


Рис. 14-5. Контактные датчики.

14-3. Индуктивные датчики

а) Датчики с переменной индуктивностью. Рассмотрим простейший датчик, изображенный на рис. 14-6, а. Если пренебречь магнитным сопротивлением стали, потоком рассеяния и выпучиванием в рабочем зазоре, то согласно § 5-3 индуктивность обмотки L равна:

$$L = \omega^2 G_\delta = \omega^2 \frac{\mu_0 S}{2\delta},$$

Ток, протекающий в цепи, выражается уравнением

$$I = \frac{U}{\sqrt{(R_n + R)^2 + (\omega L)^2}}.$$

Индуктивность обмотки L может изменяться за счет изменения зазора δ , площади S или магнитной проницаемости μ . Это явление используется в индуктивных датчиках.

На рис. 14-6, б показана зависимость индуктивности L и тока I от зазора.

Погрешности индуктивных датчиков определяются стабильностью амплитуды и частоты источника питания, влиянием температуры на активное сопротивление обмотки датчика и размеры рабочего зазора.

На рис. 14-7, а и б представлены датчики с поперечным перемещением якоря и его характеристика.

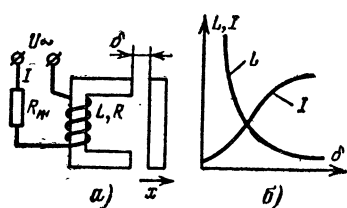


Рис. 14-6. Схема и характеристика датчика с изменяющимся зазором.

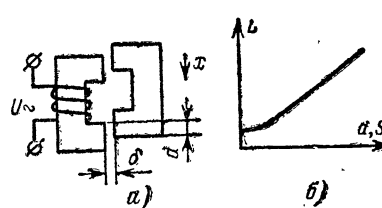


Рис. 14-7. Схема и характеристика датчика с изменяющейся площадью.

Согласно § 5-3 чувствительность датчика при изменении зазора равна:

$$S_{\delta} = - \frac{\Delta L}{\Delta \delta} = \frac{L_0}{\delta_0 [1 + \Delta \delta / \delta_0]^2}.$$

Чувствительность при изменении площади:

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

где L_0 — начальное значение индуктивности датчика при $\delta = \delta_0$ и $S = S_0$; $\Delta \delta$ и ΔS — изменение зазора и площади.

Таким образом, чувствительность S_{δ} является нелинейной функцией $\Delta \delta$. Для работы с малой нелинейностью целесообразно выбирать $\Delta \delta / \delta_0 \leq 0,2$.

Недостаток описанных выше датчиков состоит в том, что на якорь действует сила, создающая механическую нагрузку на элемент, перемещение которого контролируется. Эта сила согласно § 5-6 равна:

$$F = F_m \sin^2 \omega t = 2 \frac{B_m^2}{\mu_0} S \sin^2 \omega t.$$

Для устранения этого недостатка применяют дифференциальный датчик (рис. 14-8). Ток, текущий через на-

грузку I_n равен разности токов I_1 и I_2 . При увеличении зазора δ_1 ток I_1 в обмотке w_1 увеличивается, а ток I_2 в обмотке w_2 уменьшается, так как зазор $\delta_2 = \delta - \delta_1$ тоже уменьшается.

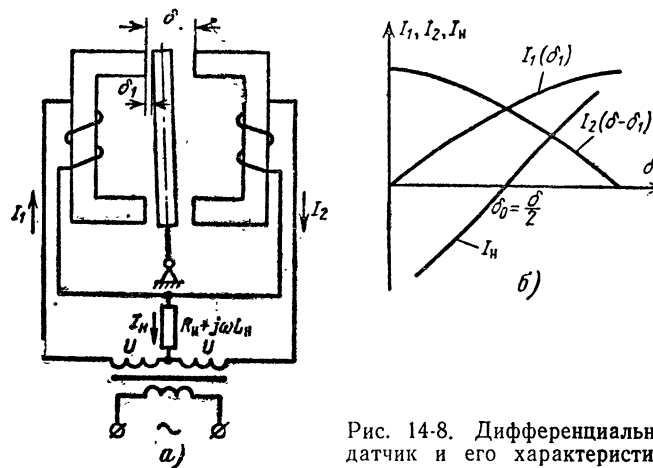


Рис. 14-8. Дифференциальный датчик и его характеристика.

Токи для каждой из ветвей соответственно будут равны:

$$I_1 = \frac{U}{\sqrt{(R_n + R)^2 + \omega^2 \left(L_n + k \frac{S}{\delta_1} \right)^2}},$$

$$I_2 = \frac{U}{\sqrt{(R_n + R)^2 + \omega^2 \left(L_n + k \frac{S}{\delta - \delta_1} \right)^2}}.$$

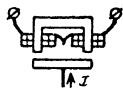

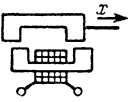


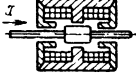
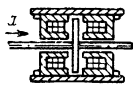
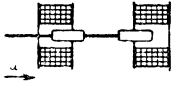
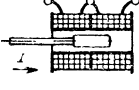
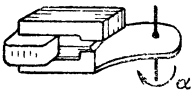
Ток в нагрузке I_n равен:

$$I_n = I_1 - I_2.$$

Зависимость тока в нагрузке от зазора показана на рис. 14-8. По сравнению с рис. 14-6 возрастает крутизна характеристики $I_n = f(\delta)$, характеристика становится более линейной. Если пренебречь активным сопротивлением цепи, то согласно § 5-6 сила, действующая на якорь, от зазора не зависит. Таким образом, в схеме рис. 14-8 на якорь действуют равные и направленные в противоположные стороны силы.

Таблица 14-2

Магнитные системы индуктивных датчиков

Тип системы	Схема	Входное перемещение, мм	Примечание
Датчик с П-образным сердечником		0,01—5	—
Датчик с Ш-образным сердечником		0,01—5	—
Датчик с переменной площадью зазора		0,5—15	—
Дифференциальный датчик с П-образной системой		0,01—5	—
Дифференциальный датчик с Ш-образной системой		0,01—5	—
Дифференциальный датчик цилиндрического типа		0,1—15	Изготавливается из сплошного материала (армко)
То же		0,01—5	То же
Соленоидный датчик		3—100	Для увеличения чувствительности соленоиды снабжены магнитопроводом в виде стального цилиндра
То же		3—50	
Датчик с профилированным диском		$\alpha = 0 \div 360^\circ$	Возможно получение любого вида зависимости $L = f(\alpha)$

При передвижении якоря приходится преодолевать только силы тяготения и трения.

Дифференциальные датчики обеспечивают большой предел измеряемой величины, большую чувствительность и меньшую погрешность за счет влияния температуры.

Схемы конструктивных выполнений индуктивных датчиков представлены в табл. 14-2. В датчиках, использующих изменение зазора δ , контролируемый размер находится в пределах $(0,01—5)10^{-3}$ м. В датчиках с переменной площадью S измеряемое перемещение может находиться в пределах $(0,5—15)10^{-3}$ м.

Если в воздушный зазор вводить профилированный ферромагнитный диск (последняя строка табл. 14-2), то контролируемый угол достигает 360° . Может быть получена любая зависимость $L=f(\alpha)$.

В зазор может вводиться также диск из немагнитного электропроводящего материала. Как показано в § 5-3, введение короткозамкнутого витка (диска) создает реактивное магнитное сопротивление $X_{\mu k}$. Тогда индуктивность равна:

$$L = \frac{\omega^2}{\sqrt{\left(\frac{1}{G_\delta}\right)^2 + (X_{\mu k})^2}} ; \quad X_{\mu k} = \frac{\omega}{r_{\text{диска}}}.$$

Магнитное сопротивление $X_{\mu k}$ зависит от формы диска, электрической проводимости материала и положения диска в рабочем зазоре.

С целью повышения чувствительности этого датчика он включается в колебательный контур с частотой 10—15 кГц, ферромагнитный сердечник для уменьшения потерь удален.

Катушки индуктивности выполняются в виде двух плоских спиральных обмоток. Диск перемещается между ними.

При изменении положения диска изменяется частота колебательного контура, включенного в цепь сетки электронной лампы, и в определенном положении возникают условия самовозбуждения генератора. Контролирующий прибор включен в анодную цепь [Л. 14-1]. Устройство имеет очень высокую чувствительность (150 А/мм).

Большим достоинством датчика с немагнитным диском является малое механическое воздействие датчика на элемент, перемещение которого контролируется.

б) Трансформаторные датчики. Принципиальные схемы датчиков представлены на рис. 14-9. При изменении зазора δ сопротивление $z_1 \approx \omega L_1 \mu_0 \omega_1^2 \frac{S}{2\delta}$ также меняется.

Происходит перераспределение напряжений \dot{U}_1 и \dot{U}_2 .

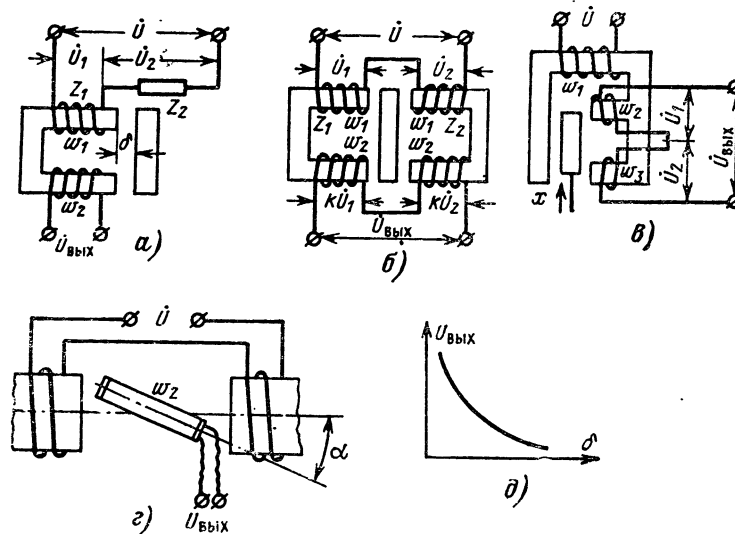


Рис. 14-9. Трансформаторные датчики.

а — трансформаторный датчик с одним магнитопроводом; б — дифференциальный трансформаторный датчик; в — трансформаторный датчик с изменяемой площадью зазоров; г — датчик с поворотной рамкой.

Для определения выходного напряжения воспользуемся уравнениями:

$$\dot{U} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2; \quad \dot{U}_1 = \dot{U} \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2};$$

$$\dot{U}_{\text{вых}} = \frac{\omega_2}{\omega_1} \dot{U}_1 = k \dot{U}_1.$$

Зависимость $U_{\text{вых}}(\delta)$ представлена на рис. 14-9, д. В таком датчике контролируемое перемещение может быть до 2 мм.

Более совершенным является дифференциальный датчик рис. 14-9, б. С некоторым приближением выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ можно найти с помощью уравнений:

$$\dot{U} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2; \quad \frac{U_1}{U_2} = \frac{Z_1}{Z_2} \approx \frac{L_1}{L_2} = \frac{G_1}{G_2} = \frac{\delta_2}{\delta_1};$$

$$G_1 = \frac{\mu_0 S}{2\delta_1}; \quad G_2 = \frac{\mu_0 S}{2\delta_2};$$

$$\dot{U}_{\text{вых}} = \frac{\omega_2}{\omega_1} (\dot{U}_1 - \dot{U}_2) \approx kU \frac{G_1 - G_2}{G_1 + G_2} = kU \frac{\delta_2 - \delta_1}{\delta_1 + \delta_2}.$$

Таким образом, выходное напряжение прямо пропорционально разности зазоров $\delta_2 - \delta_1$.

Для работы при больших перемещениях применяются датчики с изменяемой площадью зазора (рис. 14-9, в).

Для измерения угла поворота используются датчики с поворотной рамкой (рис. 14-9, г). Выходное напряжение в таком датчике пропорционально синусу угла поворота

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

где ω_p — число витков рамки;
 B — максимальное значение индукции в рабочем зазоре, Т;
 S_p — площадь рамки, м²;
 α — угол поворота.

Имеется большое разнообразие конструкций трансформаторных датчиков [Л. 14-1]. Отсутствие переключающихся контактов является большим преимуществом индуктивных датчиков.

Индуктивные и трансформаторные датчики нашли широкое применение для измерения перемещений, деформаций, контроля размеров. Динамические свойства датчиков определяются инерционными свойствами подвижной системы.

Трансформаторные датчики по сравнению с индуктивными имеют преимущества — нет гальванической связи между цепью питания и выходной цепью, проще измерительные схемы. Предельное контролируемое перемещение достигает 4 мм.

Относительно большая мощность датчиков (до нескольких десятков ватт) позволяет применять их без усилителей. Однако они также широко применяются с мостовыми измерительными схемами [Л. 14-3].

Погрешность преобразования вызывается изменением питающего напряжения, частоты, несинусоидальностью формы тока, изменением окружающей температуры. Применением уравновешенных мостовых измерителей погрешность от колебания напряжения и частоты может

быть снижена до 0,5—0,1% при колебании напряжения и частоты на 1% [Л. 14-3]. Температурная погрешность связана с изменением магнитной проницаемости и активного сопротивления обмоток. Применяя дифференциальные датчики, можно компенсировать изменение активного сопротивления от температуры.

в) **Магнитоупругие датчики.** Ферромагнитные материалы обладают следующим свойством: если материал

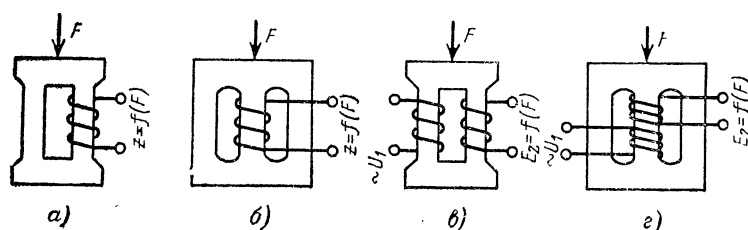


Рис. 14-10. Разновидности магнитоупругих датчиков измерения больших усилий.

подвергнут воздействию механических сил, то меняется магнитная проницаемость μ_a . Это явление называется магнитоупругим эффектом, и его можно использовать в датчиках, измеряющих статические, знакопеременные и быстроизменяющиеся нагрузки. Возможные варианты магнитоупругих датчиков представлены на рис. 14-10. В датчиках рис. 14-10, а и б при изменении силы F изменяется магнитная проницаемость μ и, следовательно, индуктивное сопротивление обмотки. В датчиках рис. 14-10, в и г сила F изменяет взаимную индуктивность обмоток и, следовательно, выходное напряжение E_2 . Относительная чувствительность датчика равна:

$$S_{\text{отн}} = \frac{\Delta\mu/\mu}{\Delta l/l} \geq 100.$$

В пределах упругих деформаций отношение $\Delta l/l$ пропорционально приложенной силе. Согласно [Л. 14-2] чувствительность датчика выражается формулой

$$S = 2 \frac{\lambda_{\infty}}{B_{\infty}^2} \mu_a,$$

где B_{∞} — индукция насыщения;
 λ_{∞} — магнитострикция при насыщении.

Для увеличения чувствительности желательно, чтобы материалы имели высокую проницаемость μ_a и небольшую индукцию насыщения. Поэтому для таких датчиков широко применяется пермаллой.

С целью увеличения чувствительности магнитопровод не имеет зазоров. В некоторых случаях тонкая пластина пермаллоя с обмоткой приклеивается к детали так же, как тензодатчик [Л. 14-2].

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

Поэтому устройство с магнитоупругим датчиком должно питаться от стабилизированного источника питания. Для компенсации температурной погрешности в плечи моста включаются активный и компенсационный датчики.

Погрешности за счет гистерезиса могут достигать 4%. Для уменьшения этой погрешности выбирается материал с узкой петлей гистерезиса. Напряженность магнитного поля должна приближаться к напряженности насыщения. Максимальная механическая нагрузка не должна превышать $1/6$ — $1/7$ предела упругости.

14-4. Индукционные датчики

В индукционных датчиках используются явления электромагнитной индукции. Если изменяется потокосцепление, связанное с проводником или катушкой, то в них возникает э. д. с. Этот принцип может быть реализован, если проводник движется в магнитном поле или проводник неподвижен, а перемещается магнитное поле. В катушке э. д. с. индукции возникает также, если потокосцепление изменяется в результате изменения магнитной проводимости.

Индукционные датчики используются как датчики скорости. Если использовать дифференцирующие и интегрирующие цепочки, то можно получить выходные величины, пропорциональные ускорению и перемещению.

Простейший датчик скорости линейного перемещения показан на рис. 14-11. На выходе датчика э. д. с. равна:

$$E = kBl\omega v,$$

где k — коэффициент пропорциональности; B — индукция, Т; l — длина витка, м; ω — число витков; v — скорость, м/с. Чувствительность датчика S равна:

$$S = kBl\omega.$$

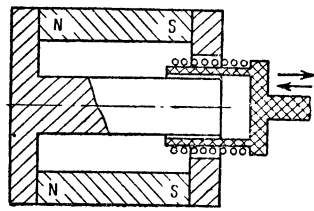


Рис. 14-11. Датчик скорости линейного перемещения.

Она может быть увеличена за счет возрастания индукции и числа витков. Для получения сигнала, пропорционального перемещению, сигнал с обмотки интегрируется с помощью цепочки RC . При интегрировании с малой погрешностью постоянная времени $T=RC$ берется достаточно большой и сигнал уменьшается.

Усилитель должен иметь большое входное сопротивление, так как он шунтирует конденсатор.

Контроль частоты вращения осуществляется с помощью датчиков в виде тахогенераторов и импульсных индукционных датчиков.

Тахогенератор постоянного тока представляет собой генератор малой мощности с возбуждением от постоянных магнитов. Напряжение на выходе такого генератора пропорционально частоте вращения генератора

$$E = kn.$$

С целью повышения линейности характеристики датчика сопротивление нагрузки должно быть возможно больше (уменьшается реакция якоря). Сопротивление между щетками и коллектором вносит погрешность в характеристику. При малой частоте вращения якоря n напряжение на выходе равно нулю. Характеристика управления пересекает ось скорости при $n > 0$ [Л. 14-4].

Более надежным является асинхронный тахогенератор переменного тока (рис. 14-12). Статор имеет обмотку 1, питаемую от источника переменного тока частотой 400—500 Гц. Обмотка 2 неподвижна и повернута относительно обмотки 1 на 90° . Алюминиевый ротор 3 связан с валом, скорость которого контролируется.

При неподвижном роторе пульсирующий поток от обмотки 1 не вызывает э. д. с. в выходной обмотке, так как оси обмоток сдвинуты на 90° . При вращении барабана 3 в нем возникают э. д. с. и токи резания, пропорциональные частоте вращения.

Эти токи создают поперечное магнитное поле с частотой питающей обмотки. Возникающая в обмотке 2 под действием магнитного поля ротора э. д. с. имеет амплитуду, пропорциональную угловой скорости ротора,

$$E \sim \omega.$$

Достоинством такого датчика является отсутствие щеточной контактной системы и неизменность частоты сигнала выходной обмотки.

Если обмотку 1 питать от сети постоянного тока, то обмотка 2 выдает э. д. с., пропорциональную угловому ускорению вала [Л. 14-4].

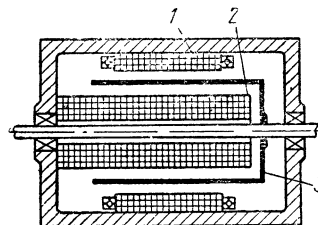


Рис. 14-12. Асинхронный тахогенератор переменного тока.

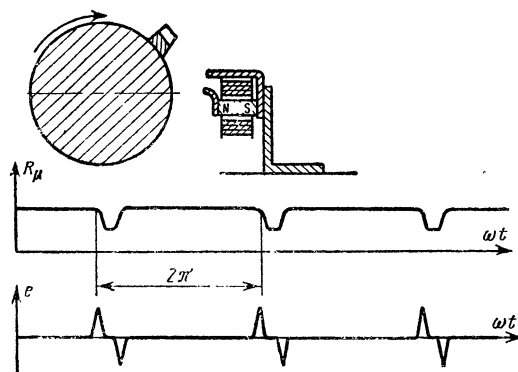


Рис. 14-13. Импульсный индукционный датчик.

На рис. 14-13 представлен принцип действия импульсного индукционного датчика. На валу укреплен стальной зуб. При прохождении зуба мимо рабочего зазора магнитное сопротивление системы постоянного магнита изменяется.

При нарастании потока появляется первый импульс напряжения в выходной обмотке, при спадании потока — второй. За каждый оборот появляется два импульса. Число импульсов в единицу времени считывается измерительным устройством. Большим достоинством такого датчика является высокая точность — она не зависит от качества выполнения системы, старения постоянного магнита, расстояния между валом и магнитом и других факторов. Источником погрешностей первых двух типов датчиков являются — старение магнитов и изменение сопротивления обмоток под действием температуры.

Принимая ряд мер, погрешность можно уменьшить до 0,5—1,5% [Л. 14-2].

Глава пятнадцатая

МУФТЫ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ

15-1. Общие сведения

Для регулирования частоты вращения, вращающего момента на валу, соединения и разъединения ведущего и ведомого валов в настоящее время широко применяют-

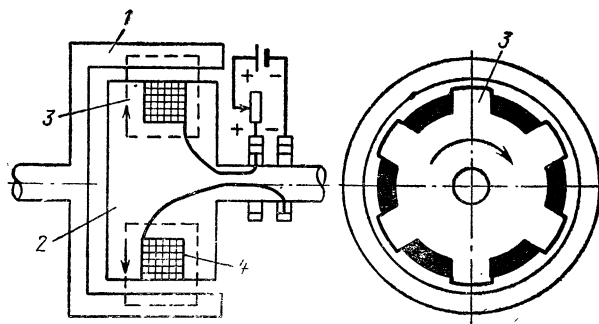


Рис. 15-1. Индукционная муфта.

1 — якорь; 2 — индуктор; 3 — магнитная система; 4 — катушка возбуждения.

ся муфты с электрическим управлением. Эти муфты можно разбить на три группы: индукционные, электростатические и электромагнитные.

Индукционные муфты (рис. 15-1) по своему принципу действия сходны с асинхронным двигателем с

короткозамкнутым ротором. Приводной двигатель соединяется с якорем 1, ведомый вал связан с индуктором 2. Катушка возбуждения 4 создает магнитный поток 3, пересекающий массивный якорь 1. При вращении якоря магнитное поле индуктора пересекает цилиндрическое тело якоря и в нем наводятся вихревые токи. Взаимодействие этих токов с магнитным полем создает силу, кото-

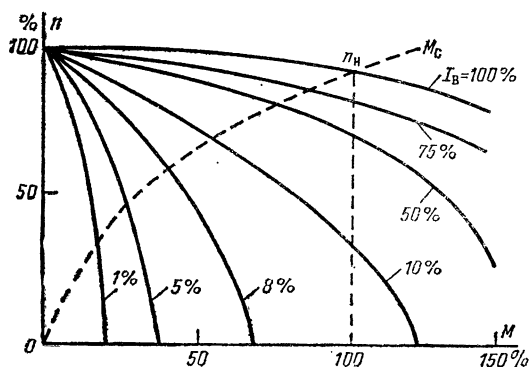


Рис. 15-2. Механические характеристики индукционной муфты при различном токе возбуждения.

--- момент сопротивления (нагрузки); ——— характеристика муфты.

рая увлекает индуктор за якорем. К материалу якоря предъявляются следующие требования: для увеличения токов в нем необходимо увеличение электрической проводимости; для уменьшения магнитного сопротивления необходима высокая магнитная проницаемость.

Регулируя ток возбуждения и меняя магнитное поле, можно плавно регулировать в широких пределах частоту вращения ведомого вала и передаваемый момент (рис. 15-2).

На этом рисунке I_B — ток возбуждения, %;

M_c — момент сопротивления, %;

M — момент муфты, %;

n — частота вращения, % относительно частоты вращения при $M_c = 0$.

При изменении момента нагрузки, например при увеличении его, угловая скорость ведомой части муфты уменьшается. При этом возрастают скольжение и ток в якоре муфты. Увеличение тока в якоре увеличивает момент, развиваемый муфтой.

Однако равновесие наступает при более низкой частоте вращения. Механические характеристики муфты в сильной степени зависят от нагрузки. Поэтому для стабилизации скорости применяются специальные регулирующие устройства [Л. 15-1].

Поскольку процессы, происходящие в такой муфте, больше тяготеют к процессам в электрических машинах, то здесь они не рассматриваются. Конструктивное исполнение индукционных муфт, теория их действия, схемы, стабилизирующие частоту вращения, подробно рассмотрены в [Л. 15-1 и 15-2].

Электростатические муфты в качестве силового элемента имеют конденсатор, у которого одна обкладка подвижна относительно другой. При подаче напряжения на обкладки между ними возникает сила притяжения, которую можно найти, воспользовавшись энергетическим методом (§ 1-2):

$$F = \frac{dA}{dx} = \frac{d}{dx} \left(\frac{CU^2}{2} \right) = \frac{U^2}{2} \frac{dC}{dx}.$$

Для плоского конденсатора $C = \epsilon_a S/d$.
Тогда величина силы F равна:

$$F = - \frac{U^2}{2} \frac{\epsilon_a S}{d^2}, \text{ Н,}$$

где ϵ_a — абсолютная диэлектрическая проницаемость среды, Ф/м;

S — площадь обкладок, м²;

d — расстояние между ними, м.

Для увеличения передаваемого момента сила нажатия F преобразуется в силу трения $F_{тр}$ через поверхности трения, связанные с обкладками. Электростатические муфты чаще всего применяются как тормоза [Л. 15-2].

Очень широкое применение получили электромагнитные муфты, использующие силы, возникающие между ферромагнитными телами, пронизываемыми магнитным потоком (§ 5-6). Эти муфты удобны в эксплуатации, имеют малые габариты и небольшое время срабатывания, передают большие мощности на валу при сравнительно малой мощности управления. Рассмотрим три вида электромагнитных муфт: фрикционные, ферропрошковые и гистерезисные.

15-2. Электромагнитные фрикционные муфты

а) **Принцип действия и основные параметры.** Простейшая электромагнитная муфта представлена на рис. 15-3. Постоянное напряжение подводится к щеткам, скользящим по кольцам 1, соединенным с выводами обмотки 2. Обмотка имеет форму кольца прямоугольного

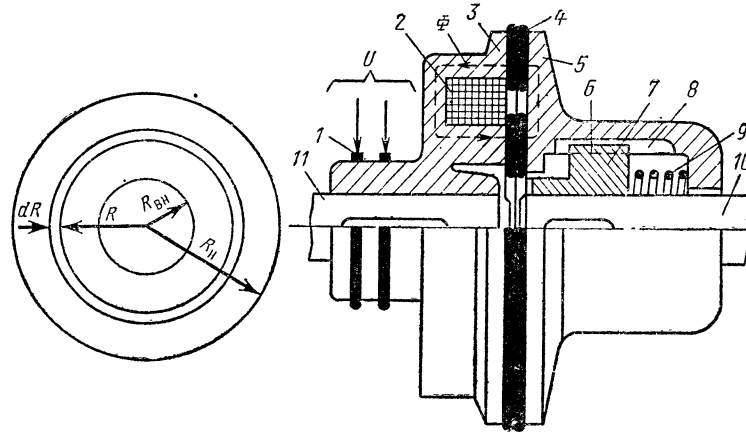


Рис. 15-3. Электромагнитная фрикционная муфта.

сечения и располагается в пазу магнитного корпуса 3. Подвижная часть муфты 5 имеет пазы 8, в которые входят шлицы 6, и может перемещаться вдоль ведомого вала 10. В обесточенном состоянии пружина 9, упираясь в направляющую втулку 7, отодвигает подвижную часть вправо и поверхности трения (диски 4) не соприкасаются. Ведомый 10 и ведущий 11 валы разобщены.

При подаче управляющего напряжения возникают магнитный поток Φ и сила, притягивающая детали 3 и 5. При этом между дисками 4, жестко связанными с деталями 3 и 5, возникает сила нажатия, обеспечивающая необходимую силу трения.

На рис. 15-3 изображена поверхность трения. Элементарный момент трения равен:

$$dM_{\text{тр}} = k_{\text{тр}} F_{\text{уд}} 2\pi R^2 dR, \quad (15-1)$$

где $F_{\text{уд}}$ — давление на поверхность трения, Па;
 $k_{\text{тр}}$ — коэффициент трения;
 R — текущий радиус поверхности, м.

Результирующий момент, развиваемый муфтой.

$$M_{\text{тр}} = \int_{R_{\text{вн}}}^{R_{\text{н}}} dM_{\text{тр}} = 2\pi k_{\text{тр}} F_{\text{уд}} \frac{R_{\text{н}}^3 - R_{\text{вн}}^3}{3} =$$

$$= \frac{2}{3} \pi k_{\text{тр}} F_{\text{уд}} R_{\text{н}} (1 - \beta^3), \quad (15-2)$$

где $\beta = R_{\text{вн}}/R_{\text{н}}$.

Коэффициенты трения для дисков из различных материалов приведены в табл. 15-1.

Т а б л и ц а 15-1

Материал	Коэффициент трения	
	Режим покоя	Режим движения
Сталь — сталь	0,15	0,15
Сталь — мягкая сталь	—	0,2
Сталь — чугун	0,3	0,18
Сталь — бронза	0,15	0,15
Чугун — чугун	0,15	0,15
Металлокерамический материал на медной основе — сталь	0,3—0,4	—
Металлокерамический материал на железной основе — сталь	0,4—0,8	—

Наиболее совершенными являются диски из металлокерамики. Металлокерамика на медной основе состоит из 68% меди, 8% олова, 7% свинца, 6% графита, 4% кремния и 7% железа. Составляющие в порошкообразном состоянии прессуются при высоком давлении (сотни мегапаскалей) и затем спекаются при температуре 700—800° С. Аналогично изготавливается металлокерамика на железной основе.

Металлокерамические материалы имеют высокое значение $k_{\text{тр}}$, высокую рабочую температуру (до 200° С), работают плавно, без заеданий.

Для выполненных муфт коэффициент $\beta=0,3\div 0,8$. Давление $F_{уд}$ определяется износом поверхностей трения. Для металлокерамических материалов оно составляет 0,8—1 МПа, для сталей 0,4—0,6 МПа.

В процессе пуска момент, который должен быть передан муфтой, возрастает, так как необходимо кроме статического момента нагрузки M_n передать динамический момент $M_{дин}$. При этом проскальзывание (пробуксовка) поверхностей трения должно быть небольшим, иначе

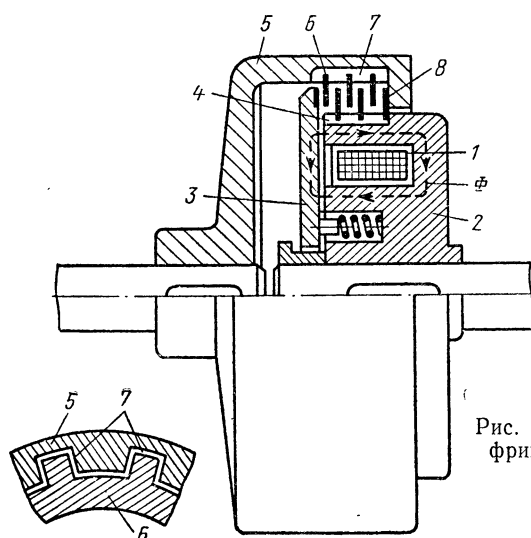


Рис. 15-4. Многодисковая фрикционная муфта.

поверхности трения могут выйти из строя из-за нагрева до высокой температуры. В режиме пуска

$$M_{тр} = M_n + M_{дин} = M_n + J \frac{d\omega}{dt} = M_{ст} k_3. \quad (15-3)$$

Коэффициент запаса k_3 учитывает возрастание момента муфты при пуске. Значения коэффициента k_3 для различных видов нагрузок приведены ниже.

Вид нагрузки	Коэффициент запаса k_3
Металлорежущие станки	1,25—2,5
Краны, подъемники	3—5
Центробежные насосы	2—3
Воздуходувки	1,25—2,0
Мельницы, дробилки	4,0

В ряде случаев момент, который должен быть передан муфтой, настолько велик, что габариты муфты с одной поверхностью трения получаются чересчур большими. В этом случае применяется многодисковая система (рис. 15-4). Диски 6 связаны с ведущей частью муфты 5 и могут свободно перемещаться вдоль направляющих 7. Диски 8, связанные с электромагнитом, также могут перемещаться по направляющей 4. В данной конструкции магнитный поток, создаваемый обмоткой 1, не проходит через диски, а замыкается через магнитопровод 2 и якорь 3. Момент, развиваемый такой муфтой, равен:

$$M_{\text{муфты}} = M_{\text{диска}} (n - 1),$$

где $M_{\text{диска}}$ — момент одной пары дисков;
 n — общее число дисков.

Зная поверхность трения S и допустимое давление $F_{\text{уд}}$, можно найти основные параметры электромагнита. Поскольку рабочий зазор мал, то при определении силы можно пользоваться формулой Максвелла (§ 5-6)

$$F_{\text{уд}} S = 4,0 B_{\delta}^2 S_{\text{э.м}} \cdot 10^5,$$

где B_{δ} — индукция в рабочем зазоре, Т;
 $S_{\text{э.м}}$ — удвоенная площадь полюса, м².
 В общем случае $S \neq S_{\text{э.м}}$.

Индукция определяется уравнением

$$B_{\delta} = \sqrt{\frac{F_{\text{уд}} S}{4,0 S_{\text{э.м}} \cdot 10^5}}. \quad (15-4)$$

Расчет магнитной цепи и катушки обмотки ведется по методике § 5-2 и 5-4. Коэффициенты рассеяния для магнитных систем даны в [Л. 15-2].

На базе электромагнитной муфты созданы электромагнитные тормоза. В обесточенном состоянии пружина создает необходимое давление на диски трения. При этом вал надежно заторможен. Для освобождения тормоза необходимо подать напряжение на электромагнит, преодолевающий силу пружины.

При остановке вращающегося вала вся кинетическая энергия превращается в тепло

$$J \frac{\omega_0^2}{2} = M_{\text{тр}} \alpha_{\text{тр}} = c m n (\theta_{\text{доп}} - \theta_0). \quad (15-5)$$

где J — момент инерции подвижных частей;
 ω_0 — начальная угловая скорость;
 $M_{\text{тр}}$ — момент трения;
 $\alpha_{\text{тр}}$ — угол поворота вала, при котором происходит торможение;
 c — удельная теплоемкость материала дисков;
 m — масса диска;
 n — число дисков;
 $\theta_{\text{доп}}$ — допустимая температура материала диска;
 θ_0 — температура окружающей среды.

Уравнение (15-5) позволяет рассчитать параметры электромагнитного тормоза с точки зрения нагрева.

Недостатком конструкций, изображенных на рис. 15-3 и 15-4, является наличие скользящего контакта.

В настоящее время разработаны конструкции муфт, у которых катушка возбуждения неподвижна, а магнитный поток проходит через притягивающиеся ферромагнитные детали ведущей и ведомой частей муфты [Л. 15-2]. Однако передаваемый такими муфтами момент значительно ниже, чем у контактных.

б) **Динамика муфты.** При включении муфты различают три этапа. Первый этап — с момента подачи напряжения до момента соприкосновения дисков. Длительность этого этапа определяется только параметрами самой муфты.

Расчет времени трогания и времени движения производится по формулам § 5-7 и 8-3.

Второй этап — с момента соприкосновения дисков до окончания проскальзывания дисков относительно друг друга. Для определения времени второго этапа необходимо рассмотреть уравнения движения ведущих и ведомых частей [Л. 15-2]:

$$J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = M_d - M_{\text{тр}}; \quad (15-6)$$

$$J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = M_{\text{тр}} - M_n, \quad (15-7)$$

где J_1 и J_2 — моменты инерции ведущей и ведомой частей передачи;

ω_1 — угловая скорость ведущей части передачи;

ω_2 — угловая скорость ведомой части передачи;

M_d — момент, развиваемый электродвигателем;

$M_{\text{тр}}$ — момент трения в муфте;

M_n — момент нагрузки на ведомой части передачи.

Введем скорость скольжения ω_c :

$$\omega_c = \omega_1 - \omega_2.$$

Тогда из системы уравнений (15-6) и (15-7) получим:

$$\frac{d\omega_c}{dt} = \frac{1}{J_1} M_d - \left(\frac{1}{J_1} + \frac{1}{J_2} \right) M_{тр} + \frac{1}{J_{тр}} M_n. \quad (15-8)$$

Для решения уравнения необходимо знать, как изменяется M_d , $M_{тр}$, M_n в динамике. В общем случае M_d является функцией скорости ω_1 , момент $M_{тр}$ зависит от $F_{уд}$ и $k_{тр}$, а момент нагрузки M_n зависит от скорости ω_2 и времени t .

С целью упрощения решения зависимости M_d , $M_{тр}$ и M_n линеаризуются на небольших участках изменения скорости.

Зная зависимость $\omega_c = f(t)$, из уравнения (15-8) определяем время t , при котором $\omega_c = 0$. Это и будет время скольжения.

Третий этап — разгон. Ведущая и ведомая части муфты жестко связаны. Время разгона определяется уравнением

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_d - M_n, \quad (15-9)$$

где J — момент инерции всех движущихся частей;

M_d — момент двигателя;

M_n — момент сопротивления.

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

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

Время отключения — это промежуток времени от обесточивания цепи до спада вращающего момента до 0,1% номинального значения. Это время увеличивается с ростом габаритов муфты, магнитного потока и колеблется от 0,1 до 0,4 с.

Необходимо отметить, что при каждом сцеплении муфты происходит нагрев дисков за счет энергии, выделяемой при проскальзывании. Число включений, допус-

каемых муфтой, определяется температурой нагрева ее дисков [Л. 15-2].

Электромагниты муфт выполняются на постоянном токе, что упрощает технологию изготовления и уменьшает габариты муфты (§ 5-6). Если источник питания переменного тока, то муфта питается через полупроводниковые выпрямители, которые встраиваются в нее, причем переменный ток подается непосредственно на кольца. Для ускорения срабатывания быстродействующих муфт применяется форсировка, описанная в § 5-7.

Электромагнит муфты имеет большую постоянную времени. Поэтому при отключении муфты на контактах коммутирующего аппарата возникает дуга, которая замедляет процесс отключения и вызывает сильную эрозию контактов. При быстром обрыве дуги возможно возникновение перенапряжения и пробой обмотки (§ 4-2). Для облегчения процесса отключения обмотка шунтируется разрядным резистором (рис. 3-7, а). Для того чтобы после обесточивания избежать залипания муфты в притяннутом состоянии магнитная система должна иметь небольшой зазор. Иногда применяется специальное размагничивание добавочной обмоткой.

15-3. Ферропорошковые муфты

Принципиальное устройство ферропорошковой муфты барабанного типа показано на рис. 15-5. Ведущий вал 1 через немагнитные фланцы 2 соединен с ферромагнитным цилиндром (барабаном) 3. Внутри цилиндра располагается электромагнит 4 с обмоткой 5. Питание обмотки осуществляется через контактные кольца (на рисунке не показаны). Внутренняя полость 7 заполнена ферромагнитным порошком (чистое или карбонильное железо) с размером зерен от 4—6 до 20—50 мкм.

Ферромагнитный порошок смешивается с сухим (тальк, графит) или жидким (трансформаторное масло, кремнийорганические масла) наполнителем. При отсутствии напряжения на обмотке электромагнита при вращении ведущей части (барабана) электромагнит, связанный с ведомым валом, остается неподвижным, поскольку наполнитель обеспечивает свободное перемещение ферромагнитных зерен относительно друг друга.

Конечно, определенное трение между барабаном и магнитом существует, но оно относительно невелико.

При подаче напряжения на электромагнит вязкость среды, находящейся в барабане, резко возрастает. Увеличивается сила трения между барабаном и электромагнитом. На ведомом валу появляется вращающий момент.

При определенном значении тока возбуждения ферромагнитный порошок и наполнитель полностью затвердевают. Барабан и электромагнит при этом жестко связаны. Можно рассматривать передаваемый момент как момент от силы трения, действующей между порошком и внутренней цилиндрической поверхностью.

Сила трения, возникающая на единице внутренней поверхности барабана:

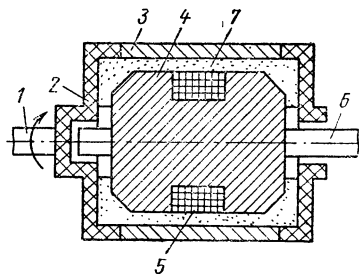


Рис. 15-5. Ферропорошковая муфта барабанного типа.

$$F_{\text{тр.уд}} = k_{\text{т.э}} F_{\text{уд}} = k_{\text{т.э}} \frac{B^2}{2\mu_0 \mu_c}, \quad (15-10)$$

где $k_{\text{т.э}}$ — эквивалентный коэффициент трения;
 $F_{\text{уд}}$ — удельное усилие, нормальное к ведущей поверхности, создаваемое магнитным потоком, равное $B^2/2\mu_0\mu_c$;
 B — индукция в зазоре;
 μ_c — относительная проницаемость смеси;
 μ_0 — проницаемость вакуума.

Следует отметить, что проницаемость μ_c является функцией индукции B .

Момент, передаваемый муфтой цилиндрического типа, равен:

$$M = 2\pi R^2 L F_{\text{тр.уд}} = \pi R^2 L k_{\text{т.э}} \frac{B^2}{\mu_0 \mu_c}, \quad (15-11)$$

где R — радиус барабана;
 L — его длина.

Благодаря тому, что зазор между барабаном и электромагнитом заполняется ферромагнитной смесью, магнитная проводимость зазора резко увеличивается, что позволяет уменьшить необходимую м. д. с. обмотки и увеличить коэффициент управления муфты, рав-

ный отношению передаваемой мощности к мощности электромагнита.

Если положить, что магнитные сопротивления барабана и электромагнита равны нулю и $\mu_c = \text{const}$, то момент, передаваемый муфтой, будет пропорционален квадрату тока:

$$M = \pi R^2 L \frac{B^2}{\mu_c \mu_0} k_{т.э} = \pi R^2 L k_{т.э} \frac{1}{\mu_c \mu_0} \left(\frac{I \omega}{2 \delta} \mu_0 \mu_c \right)^2 =$$

$$= \frac{1}{4} \pi R^2 L k_{т.э} \frac{\mu_0 \mu_c}{\delta^2} (I \omega)^2, \quad (15-12)$$

где δ — зазор между электромагнитом и барабаном;
 $I \omega$ — м. д. с. электромагнита.

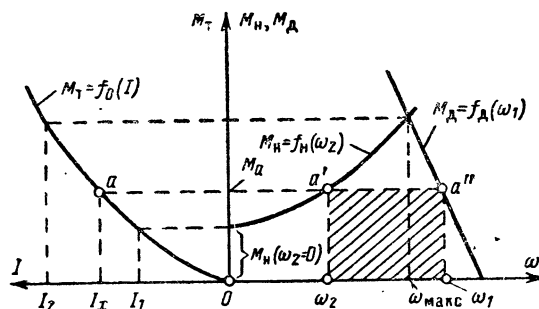


Рис. 15-6. Характеристика муфты.

В действительности из-за насыщения магнитной цепи при большой м. д. с. зависимость $M = f(I)$ близка к линейной.

Рассмотрим характеристики муфты в статическом режиме.

Во втором квадранте рис. 15-6 изображена зависимость момента, передаваемого муфтой, от тока возбуждения I .

В первом квадранте представлены механическая характеристика двигателя $M_d = f_d(\omega_1)$ и характеристика нагрузки $M_n = f_n(\omega_2)$. До тех пор, пока $I < I_1$, момент, передаваемый муфтой, меньше момента нагрузки при $\omega_2 = 0$ и ведомый вал остается в покое. При токе $I_x > I_1$ муфта развивает момент M_a и ведомый вал имеет скорость ω_2 (точка a'). Угловая скорость двигателя при этом равна ω_1 .

Мощность, отдаваемая двигателем, равна $P_d = M_a \omega_1$, а мощность, передаваемая в нагрузку, $P_n = M_a \omega_2$. Потери в муфте за счет скольжения равны:

$$P_{\text{п}} = P_d - P_n = M_a (\omega_1 - \omega_2). \quad (15-13)$$

Эта мощность пропорциональна заштрихованной площади прямоугольника. Потери $P_{\text{п}}$ расходуются на нагрев муфты и наряду с мощностью, теряемой в обмотке электромагнита, определяют ее температуру.

При токе возбуждения I_2 ведомый и ведущий валы соединены жестко и вращаются с угловой скоростью $\omega_{\text{макс}}$. Передаваемый момент $M = M_{\text{макс}}$, а потери $P_{\text{п}} = 0$. Для расчета температуры муфты необходимо определить $P_{\text{п.макс}}$.

Пусть моменты M_n и M_d линейно зависят от угловой скорости

$$M_n = M_{n0} + k_n \omega_2; \quad (15-14)$$

$$M_d = k_d (\omega_{10} - \omega_1), \quad (15-15)$$

где k_n и k_d — коэффициенты пропорциональности;
 ω_{10} — угловая скорость двигателя при холостом ходе.

Воспользовавшись (15-13) — (15-15), выразим потери $P_{\text{п}}$ через M :

$$P_{\text{п}} = M \left(\omega_{10} + \frac{M_{n0}}{k_n} \right) - M^2 \left(\frac{1}{k_n} + \frac{1}{k_d} \right). \quad (15-16)$$

При $\omega = \omega_1 = \omega_2 = \omega_{\text{макс}}$ имеем $P_{\text{п}} = 0$.

Тогда максимальный момент муфты равен:

$$M = M_{\text{макс}} = \frac{\omega_{10} + \frac{M_{n0}}{k_n}}{\frac{1}{k_n} + \frac{1}{k_d}}. \quad (15-17)$$

Для определения $P_{\text{п.макс}}$ необходимо производную $dP_{\text{п}}/dM$ приравнять нулю.

Передаваемый момент при этом равен:

$$M = \frac{\omega_{10} + \frac{M_{n0}}{k_n}}{2 \left(\frac{1}{k_n} + \frac{1}{k_d} \right)} = \frac{M_{\text{макс}}}{2}; \quad (15-18)$$

$$P_{\text{п. макс}} = \frac{\left(\omega_{10} + \frac{M_{\text{н0}}}{k_{\text{н}}}\right)^2}{4 \left(\frac{1}{k_{\text{н}}} + \frac{1}{k_{\text{д}}}\right)}. \quad (15-19)$$

Охлаждающая поверхность муфты $S_{\text{охл}}$ выбирается такой, чтобы температура ее не превосходила $\theta_{\text{пред}} = 80 \div 120^\circ \text{C}$, т. е. из условия

$$P_{\text{п. макс}} + P_{\text{эм}} = k_{\text{н}} S_{\text{охл}} (\theta_{\text{пред}} - \theta_0). \quad (15-20)$$

При работе муфты на ферромагнитные зерна, кроме электромагнитных сил $F_{\text{эм}}$, действуют центробежные силы $F_{\text{ц}}$, пропорциональные квадрату угловой скорости. Для оценки влияния центробежных сил вводится отношение $k_{\text{ц}} = F_{\text{ц}}/F_{\text{эм}}$.

Это отношение увеличивается с ростом радиального размера R , угловой скорости и уменьшается с ростом индукции в рабочем зазоре [Л. 15-2].

Исследования показали, что даже при $B = 1,8 \text{ Т}$ отношение $F_{\text{ц}}/F_{\text{эм}}$ достигает 40%, если частота вращения равна 3000 об/мин [Л. 15-2]. При определенном значении частоты вращения отношение $F_{\text{ц}}/F_{\text{эм}}$ приближается к 100% и муфта теряет управление [Л. 15-2].

Поэтому ферропорошковые муфты не следует применять при больших скоростях (более 3000 об/мин).

По сравнению с электромагнитными муфтами трения ферропорошковые муфты имеют значительно большее быстродействие (примерно в 10 раз) благодаря отсутствию подвижного якоря. Изменение момента во времени для линейной части характеристики $M(i)$ определяется законом роста тока i . Поэтому в схемах автоматики порошковая муфта является инерционным звеном первого порядка. Большим преимуществом ферропорошковой муфты является отсутствие быстроизнашивающихся дисков трения.

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

Ферропорошковые муфты целесообразно применять там, где требуется высокое быстродействие, большая частота включения и плавное регулирование скорости ведомого вала. Вопрос расчета и конструкции ферропорошковых муфт рассмотрен в [Л. 15-2 и 15-3].

15-4. Гистерезисные муфты

Возможны два варианта исполнения муфт: в первом магнитное поле индуктора создается обмоткой, во втором — постоянными магнитами. Недостатком первого варианта является наличие контактной системы для передачи тока в индуктор. Достоинством — возможность электрического управления муфтой. Муфты с постоянными

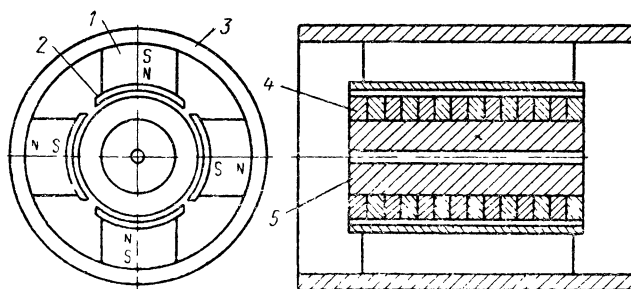


Рис. 15-7. Магнитно-гистерезисная муфта с радиальным рабочим зазором.

ми магнитами (магнитно-гистерезисные) обладают высокой надежностью. Однако регулирование передаваемого момента в них затруднено [Л. 15-5].

Рассмотрим принцип действия муфты, у которой магнитное поле создается постоянными магнитами (рис. 15-7). Постоянные магниты 1 с полюсными наконечниками 2 укреплены в магнитопроводе 3, связанном с ведущим валом. На оси ведомого вала сидит втулка 5 из немагнитного или магнитно-мягкого материала. На поверхности втулки укреплены кольца 4 из материала, имеющего большие потери на гистерезис. Эти кольца являются активным слоем. Шихтованная структура активного слоя устраняет вихревые токи и возникновение асинхронного вращающего момента. Теория, конструкция и проектирование магнитно-гистерезисных муфт подробно рассмотрены в [Л. 15-5].

Пусть ротор заторможен, а индуктор вращается приводным двигателем с угловой скоростью ω_1 .

Под действием вращающегося магнитного поля элементарные магнетики активного слоя будут вращаться, появляются потери на гистерезис от перемагничивания. Потери за один цикл определяются максимальным зна-

чением индукции. Частота перемангничивания f_1 равна:

$$f_1 = p\omega_1/2\pi, \quad (15-21)$$

где p — число пар полюсов муфты.

Мощность, передаваемая активному слою через рабочий зазор, можно выразить уравнением

$$P_r = p_r f_1 V_r, \quad (15-22)$$

где p_r — удельные потери от гистерезиса за один цикл;
 V_r — объем активного слоя.

Взаимодействие магнитов индуктора с магнитами, возникшими в гистерезисном слое, создает вращающий момент. Этот момент связан с активными потерями в роторе. Как показано в [Л. 15-4], момент, действующий на ротор равен:

$$M_r = \frac{P_r}{2\pi n_1} = \frac{1}{2\pi} p p_r V_r. \quad (15-23)$$

Если ротор освободить, то под действием момента M_r он начнет вращаться в направлении вращения индуктора со скоростью ω_2 . Скольжение ротора относительно индуктора равно:

$$s = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1}. \quad (15-24)$$

Это скольжение будет меняться от 1 до 0 при $n_2 = n_1$. В процессе разгона частота перемангничивания меняется:

$$f_2 = \frac{p\omega_2}{2\pi} = f_1 s. \quad (15-25)$$

При этом потери от гистерезиса соответственно уменьшаются

$$P_{r2} = p_r f_2 V_r. \quad (15-26)$$

Полезная мощность, передаваемая на ведомый вал, равна:

$$P_2 = P_{r1} - P_{r2} = p_r f_1 (1 - s) V_r. \quad (15-27)$$

Крутящий момент, передаваемый муфтой, выразится уравнением

$$M_r = \frac{P_2}{2\pi n_2} = \frac{p_r f_1 (1-s) V_r}{2\pi n_1 (1-s)} = \frac{p_r f_1 V_r}{2\pi n_1} = M_r. \quad (15-28)$$

Таким образом, момент, развиваемый муфтой, не зависит от частоты вращения. Если момент нагрузки $M_n \leq M_r$, то скорость ведомой части увеличивается, пока ω_2 не станет равной ω_1 . Муфта достигает синхронной частоты вращения. В этом режиме можно считать, что активный слой становится тоже постоянным магнитом, вращающимся синхронно с полем (рис. 15-8). По мере увеличения момента нагрузки возрастает угол θ между вращающимся полем индуктора и магнитом активного слоя и при $M_n = M_r$ этот угол достигает максимального значения θ_{\max} . Этот угол зависит от свойств материала гистерезисного слоя. Работа гистерезисной муфты в синхронном режиме аналогична работе синхронного двигателя. В общем случае величину момента, развиваемого гистерезисной муфтой, можно выразить следующим уравнением [Л. 15-5]:

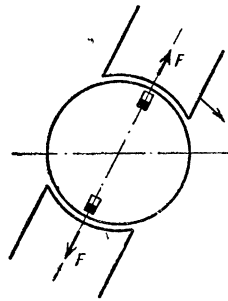


Рис. 15-8. Синхронный режим гистерезисной муфты.

$$M_r = c F_1 \Phi_\delta \sin \theta, \quad (15-29)$$

где c — конструктивный фактор;

F_1 — м. д. с. индуктора;

Φ_δ — магнитный поток в гистерезисном слое.

Угол θ при передаче момента нагрузки M_n равен:

$$\theta = \arcsin \frac{M_n}{c F_1 \Phi_\delta}. \quad (15-30)$$

При дальнейшем возрастании момента нагрузки ($M_n > M_r$) муфта переходит в асинхронный режим.

На рис. 15-9 изображена зависимость скольжения гистерезисной муфты от момента нагрузки. До тех пор, пока $M_n \leq M_r$, ведомый вал вращается с синхронной скоростью ($s=0$) (кривая 1). Если момент нагрузки превышает гистерезисный момент, то ведомый вал вращается со скольжением (кривая 2). Однако момент, передаваемый муфтой, остается постоянным, равным M_r .

Интересно отметить, что при $M_n > M_r$ рабочий угол $\theta = \theta_{\text{макс}}$ остается неизменным, т. е. ось полюсов, наведенных в активном слое, продолжает вращаться синхронно с полем индуктора, отставая при этом на постоянный угол $\theta_{\text{макс}}$. В то же время ротор движется со скольжением s . Если активный слой выполнен в виде литого цилиндра, то, кроме гистерезисного момента M_r , появляется асинхронный момент (прямая 3), пропорциональный скольжению:

$$M = M_r + M_{a.\text{макс}} s.$$

При этом момент, передаваемый муфтой, возрастает, но становится зависимым от угловой скорости ведомого вала муфты (рис. 15-9).

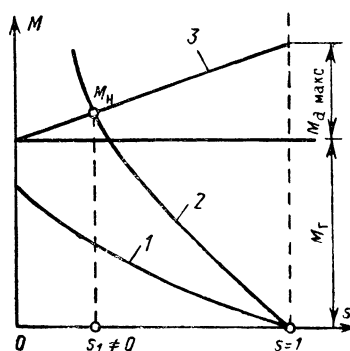


Рис. 15-9. Механические характеристики гистерезисной муфты.

Большим достоинством гистерезисной муфты является постоянство передаваемого момента. Если нагрузочный момент M_n резко возрастает (неполадки, поломки механизма), то максимальный момент, передаваемый на приводной двигатель, ограничен M_r . Таким образом, гистерезисная муфта защищает двигатель от перегрузки. Постоянный момент муфты обеспечивает быстрый разгон нагрузки. В ряде схем автоматики необходима быстрая остановка системы. Здесь эффективно применить тормоз на базе гистерезисной муфты. Ведомая часть муфты делается неподвижной, а ведущая часть соединяется с приводным двигателем. Для торможения двигателя отключается и включается муфта. Постоянный тор-

момент муфты обеспечивает быструю остановку механизма.

В синхронной муфте можно также использовать силы электромагнитного тяжения. Статор с обмоткой возбуждения выполнен с явными полюсами. Ротор из магнитно-мягкого материала имеет форму звездочки с таким же числом полюсов [Л. 15-5]. Однако такая муфта не имеет естественного пускового момента. Кроме того, момент, передаваемый такой муфтой, при $\theta > \theta_{\text{макс}}$ падает с увеличением угла θ , что является большим недостатком.

Гистерезисные муфты широко применяются также в тех случаях, когда необходимо передать момент в среду с агрессивным веществом, находящимся под высоким давлением. В этом случае применяются муфты с аксиальным рабочим зазором. Ведущая часть с индуктором отделена немагнитной стенкой от ведомой части с активным слоем в виде колец.

АППАРАТЫ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ НИЗКОГО И ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Глава шестнадцатая **РУБИЛЬНИКИ И ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ**

16-1. Общие сведения

Рубильник предназначен для ручного включения и отключения цепей с постоянным напряжением до 440 В и переменным 500 В.

Общий вид рубильника с центральной рукояткой изображен на рис. 16-1. Подвижный контакт — нож 1 вращается в шарнирной стойке 2. При вращении рукоятки по часовой стрелке между ножом и контактом неподвижной стойки 3 загорается дуга.

Гашение дуги постоянного тока при небольшом значении тока (до 75 А) происходит за счет механического удлинения дугидвигающимся ножом. Чем больше скорость движения контакта, тем больше скорость растяжения дуги и меньше время ее горения. При отключении больших токов решающим фактором являются электродинамические силы. Эта сила, действующая на единицу длины дуги, примерно обратно пропорциональна длине ножа. В связи с этим длина ножа может быть достаточно малой и выбирается такой, чтобы обеспечить гашение малых токов (менее 75 А) [Л. 3-3].

Рубильники должны обеспечивать надежное отсоединение установки от напряжения с тем, чтобы можно было безопасно производить ее ремонт. Поэтому расстояние между контактными стойками 3 берется не менее 0,05 м.

На процесс гашения дуги оказывают влияние также тепловые потоки воздуха, создаваемые дугой. Гашение дуги получается более успешным в том случае, когда растяжение дуги за счет конвективного движения воздуха совпадает с направлением действия электродинамических сил (рубильник устанавливается так, чтобы кривизна дуги была обращена вверх).

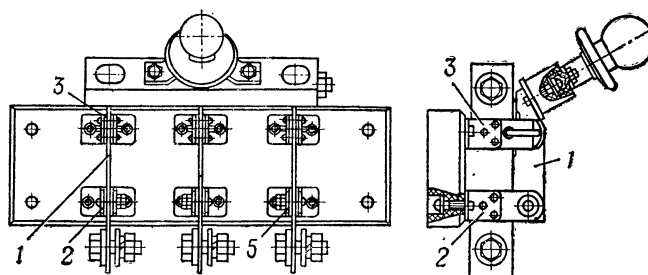


Рис. 16-1. Трехфазный рубильник с центральной рукояткой.

При отключении переменного тока дуга в рубильнике гасится за счет возникновения электрической прочности 200—220 В около каждого катода (§ 4-8). Применение для двухполюсной цепи двухполюсного рубильника позволяет легко гасить дугу с номинальным током при напряжении до 380 В. Однополюсный рубильник с одним разрывом надежно работает в цепи с напряжением 220 В.

Необходимо отметить, что рубильники и переключатели с центральной рукояткой (рис. 16-1) разрешается применять только для отключения цепи без тока. Отключение цепей с током разрешается в том случае, когда дуга не может воздействовать на руку (рукоятка привода находится сбоку или применяется рычажный привод, см. рис. 16-2).

Как правило, критический ток рубильника меньше его номинального тока продолжительного режима. Для рубильников и переключателей с боковой рукояткой или с рычажным приводом отношение отключаемого тока к номинальному составляет 0,2 при постоянном напряжении 220 В и 0,3 для переменного напряжения 380 В. При постоянном напряжении 440 В и переменном 500 В ука-

занные аппараты предназначены только для отключения обесточенных цепей.

Для увеличения отключающей способности рубильник снабжается дугогасительной камерой в виде дугогасительной решетки (см. § 10-3).

При этом отключающая способность рубильников увеличивается до $0,5I_H$ при постоянном напряжении

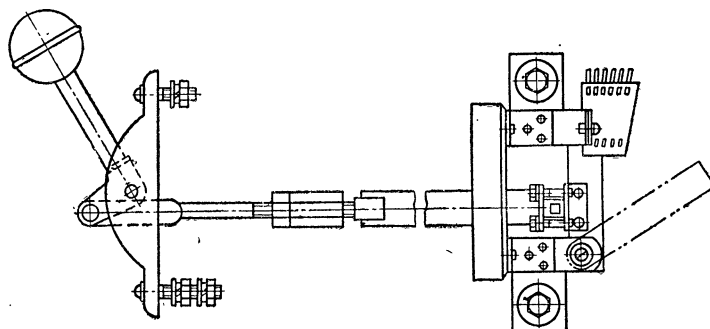


Рис. 16-2. Рубильник с рычажным приводом и дугогасительной камерой.

440 В и переменном 500 В, а в цепях с постоянным напряжением 220 В и переменным 380 В они способны отключать номинальный ток.

16-2. Конструкция рубильников

Рубильники выпускаются в одно-, двух- и трехполюсных исполнениях. На рис. 16-2 изображен трехполюсный рубильник с центральным рычажным приводом и дугогасительной камерой. Ножи всех трех полюсов соединены изоляционным валиком, на который действует тяга рычажного привода. Рукоятка привода монтируется на лицевой стенке шкафа распределительного устройства, а сам рубильник располагается на стальных рейках внутри шкафа. Такая конструкция обеспечивает полную безопасность оператора.

Качество рубильников и переключателей в значительной степени определяется работой контактного соединения между ножом и контактными стойками. В современных аппаратах преимущественное применение получил линейный контакт (§ 3-4), который позволяет получить при одинаковой силе трения в контакте гораздо меньшее переходное сопротивление, чем плоский. Контактное нажатие должно производиться не за счет упругих свойств контактных стоек, а с помощью стальных пружин.

В рубильнике рис. 16-1 нажатие в стойке 3 создается с помощью пружины в виде разрезанного кольца, концы которого действуют на

эластичные губки. Нажатие губок в шарнирной стойке 2 осуществляется пружинами в виде выпуклых шайб 5. При токе, большем 100А, устанавливается несколько параллельных контактных пар.

Переключатель в отличие от рубильника имеет две системы неподвижных контактов и три коммутационных положения. В среднем положении ножей цепи разомкнуты. Специальное устройство фиксирует ножи в этом положении.

16-3. Пакетные выключатели и переключатели

Пакетные выключатели и переключатели являются многоступенчатыми аппаратами, предназначенными для нечастых коммутаций в цепях с небольшой мощностью

(токи до 400 А, постоянное напряжение 220 В и переменное 380 В). Пакетные переключатели применяются как аппараты распределительных устройств и в слаботочных цепях автоматики. Они используются также для пуска двигателей, реверса, переключения схемы соединения обмоток двигателя со звезды на треугольник.

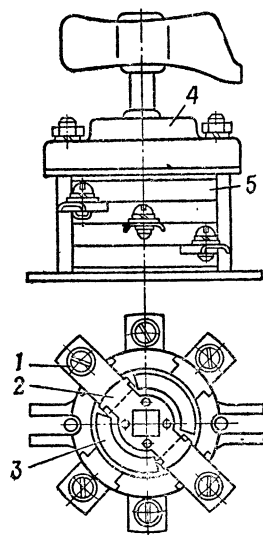


Рис. 16-3. Пакетный выключатель серии ПВМ.

Выключатель ПВМ (рис. 16-3) состоит из отдельных связанных вместе пакетов 5 и приводного механизма 4. Пакет образует один полюс выключателя. Каждый полюс имеет два разрыва. Неподвижные контакты 1 выполнены в виде массивных пластин из латуни. Подвижный контакт 2 насажен на квадратный изолированный вал выключателя и имеет вращательное движение. Нажатие контактов создается за счет упругих свойств губок подвижного контакта 2.

К подвижному контакту прикреплены две щетки 3 из фибровых пластин. Расстояние между щетками немного больше толщины неподвижного контакта,

что позволяет подвижному контакту свободно вращаться внутри пакета.

Движение подвижного контакта создается с помощью приводного механизма. При вращении рукоятки сначала заводится пружина, а затем эта пружина сообщает необходимую скорость контакту.

При расхождении контактов дуга загорается в двух разрывах, что обеспечивает надежное гашение дуги переменного тока за счет околоскатодной электрической прочности. Дуга гаснет при первом прохождении переменного тока через нуль.

Гашение дуги постоянного тока обеспечивается благодаря тому, что образующаяся дуга горит в пространстве между фибровыми щечками. Дуга, соприкасаясь со стенками из фибры, выделяет газ. Поскольку внутренняя полость пакета достаточно герметична, внутри пакета повышается давление. Это ведет к подъему вольт-амперной характеристики и успешному гашению дуги (§ 4-2). В двухполюсной схеме цепь должна обязательно отключаться двухполюсным выключателем.

Недостатками выключателя ПВМ являются малая износостойкость (до $20 \cdot 10^3$ переключений) и ненадежность механизма привода.

Более совершенным является кулачковый пакетный выключатель ПКВ (рис. 16-4). На валу 1 укреплен кулачок 2 (по одному на пакет). Каждая цепь имеет два разрыва, образуемые мостиком 3 и контактами 4. При вращении вала кулачок поворачивается и шток 5 попадает в углубление. При этом цепь замыкается. Нажатие контактов создается стальной пружиной 6. Для повышения износостойкости используют металлокерамические контакты. Вместо малонадежного привода ПВМ используется фиксатор положения, аналогичный конструкции фиксатора командоконтроллера (рис. 9-6). Наибольший ток серии ПКВ 160 А. Электрическая износостойкость от 1 до $2 \cdot 10^5$ коммутационных циклов.

Пакетные выключатели и переключатели обладают большими преимуществами по сравнению с рубильниками. Они имеют малые габариты, удобны в монтаже. Дуга гасится в замкнутом объеме, без выброса пламени и газов. Контактная система позволяет управлять одновременно большим количеством цепей. Эти выключатели коммутируют номинальные токи. Имеют высокую вибро- и ударостойкость.

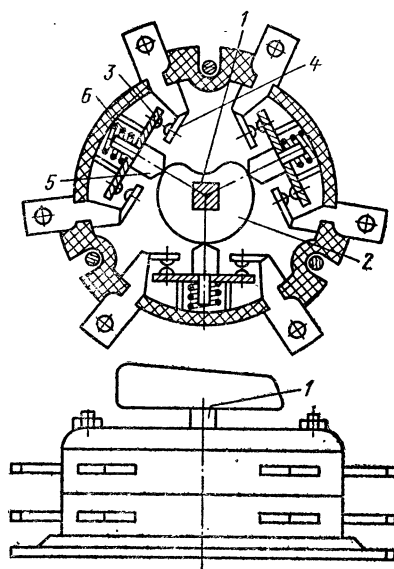


Рис. 16-4. Пакетный кулачковый выключатель серии ПКВ.

ПРЕДОХРАНИТЕЛИ

17-1. Общие сведения

Предохранители — это аппараты, защищающие установки от перегрузок и токов короткого замыкания.

Основными элементами предохранителя являются плавкая вставка, включаемая в рассечку защищаемой цепи, и дугогасительное устройство, гасящее дугу, возникающую после плавления вставки.

К предохранителям предъявляются следующие требования.

1. Время-токовая характеристика предохранителя должна проходить ниже характеристики защищаемого объекта, причем возможно ближе к ней (§ 17-2).

2. При коротком замыкании предохранители должны работать селективно (§ 17-5).

3. Характеристики предохранителя должны быть стабильными. Разброс параметров из-за производственных отклонений не должен нарушать защитные свойства предохранителя.

4. В связи с возросшей мощностью установок предохранители должны иметь высокую отключающую способность.

5. Замена сгоревшего предохранителя или плавкой вставки не должна требовать много времени.

17-2. Нагрев плавкой вставки при длительной нагрузке

Основной характеристикой предохранителя является зависимость времени плавления вставки от протекающего тока. Для совершенной защиты желательно, чтобы время-токовая характеристика предохранителя (кривая 1 на рис. 17-1) во всех точках шла немного ниже характеристики защищаемого объекта (кривая 2 на рис. 17-1). Однако реальная характеристика предохранителя (кривая 3) пересекает кривую 2. В области больших перегрузок (область Б) предохранитель защищает объект. В области А предохранитель объект не защищает.

При небольших перегрузках $(1,5 \div 2)I_n$ нагрев предохранителя протекает медленно. Большая часть тепла от-

дается окружающей среде. Сложные условия теплоотдачи затрудняют расчет плавящего тока [Л. 17-1].

Ток, при котором плавкая вставка сгорает при достижении ею установившейся температуры, называется пограничным током $I_{\text{погр}}$. Для того чтобы предохранитель не срабатывал при номинальном токе, необходимо соблюсти условие $I_{\text{погр}} > I_{\text{ном}}$. С другой стороны, для лучшей защиты пограничный ток должен быть возможно ближе к номинальному.

При токах, близких к пограничному, температура плавкой вставки должна приближаться к температуре плавления.

В связи с тем, что время плавления при пограничном токе велико (более 1 ч) и температура плавления материалов вставки составляет много сотен градусов Цельсия, все детали предохранителя нагреваются до высоких температур.

В связи с этим принимаются меры к снижению температуры плавления вставки, что наиболее просто достигается применением легкоплавких металлов, таких как свинец, цинк и сплавы.

Физические константы материалов, которые применяются для вставок, даны в табл. 17-1.

Таблица 17-1

Металл вставки	Удельное сопротивление ρ_0 , мкОм·м	Температура, °С		A' , $\text{А}^2 \cdot \text{с}/\text{мм}^4$	A'' , $\text{А}^2 \cdot \text{с}/\text{мм}^4$	$A' + A''$
		$\theta_{\text{д}}$	$\theta_{\text{пл}}$			
Медь	0,0153	250	1083	80 000	11 600	91 600
Серебро	0,0147	—	961	62 000	8000	70 000
Цинк	0,06	200	419	9000	3000	12 000
Свинец	0,21	150	327	1200	400	1600

Наинизшую температуру плавления имеет свинец. Но удельное сопротивление свинца в 12 раз выше, чем у меди. Для того чтобы при прохождении данного тока вставка нагрелась до допустимой температуры (150°C),

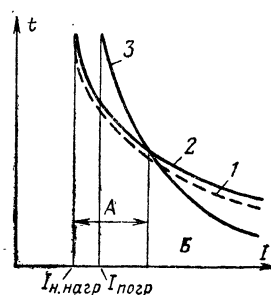


Рис. 17-1. Согласование характеристик предохранителя и защищаемого объекта.

ее сечение должно быть значительно больше, чем сечение вставки из меди.

При плавлении вставки пары металла ионизируются в возникающей дуге благодаря высокой температуре. Большой объем вставки увеличивает количество паров металла в дуге, затрудняет ее гашение, уменьшает предельный ток, отключаемый предохранителем.

Применение легкоплавких металлов не дает удовлетворительного решения. В настоящее время широкое распространение получили медные и серебряные плавкие вставки с металлургическим эффектом [Л. 17-3, 17-4].

На тонкую проволоку (диаметр менее 0,001 м) наносится шарик олова. При нагреве вставки сначала плавится олово, имеющее низкую температуру плавления (232° С). В месте контакта олова с медной проволокой начинается растворение меди и уменьшение сечения медной вставки. Это вызывает увеличение сопротивления и повышение потерь в этой точке. Процесс длится до тех пор, пока расплавится медная проволока в точке, где расположен оловянный шарик. Возникшая при этом дуга расплавляет проволоку на всей длине. Применение оловянного шарика снижает среднюю температуру вставки в момент плавления до 280° С.

Стабильность время-токовой характеристики в значительной степени зависит от окисления плавкой вставки.

Свинец и цинк образуют на воздухе пленку окисла, которая предохраняет вставку от изменения сечения.

Медная вставка при длительной работе с высокой температурой интенсивно окисляется. Пленка окисла при изменении температурного режима отслаивается и сечение вставки постепенно уменьшается. В результате плавкая вставка перегорает при номинальном токе, если ее температура при токе, близком к пограничному, выбрана высокой.

В табл. 17-1 приведены рекомендуемые температуры θ_d вставок при номинальном токе.

Из-за того что температура медной вставки при токе, близком к номинальному, выбирается значительно ниже температуры плавления, приходится завышать сечение вставки и тем самым увеличивать отношение $I_{погр}/I_{ном}$ примерно до 1,8, что ухудшает время-токовую характеристику предохранителя.

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

У легкоплавких материалов эксплуатационная температура ближе к температуре плавления. То же можно сказать про вставки, использующие металлургический эффект.

Применение легкоплавких металлов и металлургического эффекта позволяет снизить это отношение до 1,2—1,4.

Время-токовые характеристики со вставкой постоянного сечения из легкоплавкого металла довольно хорошо согласуются с характеристикой силового трансформатора и других подобных объектов. Это объясняется низкой температурой плавления, стойкостью против коррозии и малой теплопроводностью материала вставки.

Медная вставка из-за высокой теплопроводности, высокой температуры плавления и большого отношения $I_{\text{погр}}/I_{\text{ном}}$ в области малых перегрузок не защищает объекта (область А, рис. 17-1).

На время-токовую характеристику сильное влияние оказывают технологические отклонения (неоднородность вставки, качество сборки и др., см. § 17-5).

17-3. Нагрев плавкой вставки при коротком замыкании

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

Согласно § 2-6 время нагрева вставки до температуры плавления равно:

$$t_{\text{пл}} = A' \frac{q^2}{I_{\text{к}}^2} = A' / \delta_{\text{к}}^2, \quad (17-1)$$

где A' — постоянная, определяемая только свойствами материала и от размера вставки не зависящая;

q — поперечное сечение вставки;

$I_{\text{к}}$ — ток;

$\delta_{\text{к}}$ — плотность тока во вставке.

После того как температура плавкой вставки достигла температуры плавления, для перехода вставки из

твердого состояния в жидкое ей необходимо сообщить тепло, равное скрытой теплоте плавления.

По мере того как часть плавкой вставки из твердого состояния перейдет в жидкое, ее удельное сопротивление резко увеличится. Время перехода из твердого состояния в жидкое находится по формуле [Л. 17-1]

$$t_{\text{перех}} = \frac{\gamma L}{\rho_2 - \rho_1} \ln \frac{\rho_2}{\rho_1} \frac{q^2}{I_{\text{к}}^2} = A' \frac{q^2}{I_{\text{к}}^2}, \quad (17-2)$$

где ρ_1 — удельное сопротивление материала при температуре плавления;

ρ_2 — удельное сопротивление жидкого металла;

γ — плотность;

L — скрытая теплота плавления на единицу массы.

Значения постоянных A' и A'' для наиболее часто применяемых металлов даны в табл. 17-1.

В действительности процесс плавления идет более сложно. Как только появится жидкий участок вставки, электродинамические силы, сжимающие проводник (см. гл. 1), образуют суженные участки. В этих участках возрастает плотность тока и повышается температура. Уменьшение сечения вставки создает разрывающие усилия, аналогичные силам в контактах при коротких замыканиях (§ 1-6).

Таким образом, как правило, дуга загорается раньше, чем вставка полностью перейдет в жидкое состояние.

Основным параметром предохранителя при коротком замыкании является предельный ток отключения — ток, который он может отключить при возвращаемся напряжении, равном наибольшему рабочему напряжению.

Время дуги зависит от конструкции предохранителя. Полное время отключения цепи предохранителем равно:

$$t_p = t_{\text{пл}} + t_{\text{перех}} + t_{\text{дуги}}. \quad (17-3)$$

Для предохранителя со вставкой на воздухе это время можно подсчитать по формуле из [Л. 17-1]

$$t_p = \left(A' + \frac{A''}{n} \right) \frac{q^2}{I_{\text{к}}^2} k_0, \quad (17-4)$$

где коэффициент $n=3$ учитывает преждевременное разрушение вставки, а $K_0=1,2 \div 1,3$ учитывает длительность процесса гашения дуги.

В предохранителях с наполнителем разрушение вставки до полного ее плавления менее вероятно. Время работы предохранителя можно найти с помощью формулы

$$t_p = (A' + A'') \frac{q^2}{I_k^2} + t_g \approx (A' + A'') \frac{q^2}{I_k^2} k_d. \quad (17-5)$$

Коэффициент k_d учитывает длительность горения дуги и равен 1,7—2.

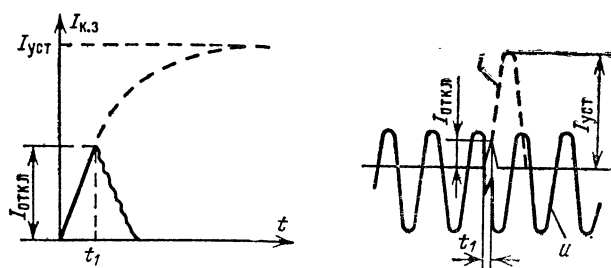


Рис. 17-2. Отключение цепи предохранителем с токоограничением.

При вставке переменного сечения ее плавление происходит в точках, имеющих наименьшее сечение. Процесс нагрева суженного перешейка протекает так быстро, что тепло почти не успевает отводиться на участки повышенного сечения. Наличие участков уменьшенного сечения позволяет резко снизить время с момента начала короткого замыкания до появления дуги. Процесс гашения начинается еще до момента, когда ток короткого замыкания достигнет установившегося или даже амплитудного значения. Применяемые средства дугогашения позволяют погасить дугу за тысячные доли секунды. Процесс отключения с токоограничением показан на рис. 17-2.

Таким образом, предохранитель может отключить поврежденную цепь с токоограничением. При этом облегчаются условия гашения дуги для самого предохранителя, так как отключается не установившийся ток короткого замыкания, а ток, определяемый временем плавления вставки.

С ростом номинального тока возрастает, естественно, и минимальное сечение вставки, которое должно пропустить этот ток. Увеличение этого сечения приводит к

возрастанию длительности плавления вставки и уменьшению эффекта токоограничения. Хороший отвод тепла от вставки при номинальном режиме позволяет выбрать уменьшенное сечение вставки и повысить эффект токоограничения.

17-4. Конструкция предохранителей низкого напряжения

а) Предохранители с гашением дуги в закрытом объеме. Предохранитель типа ПР-2 изображен на рис. 17-3, б. Плавкая вставка 3 изготавливается из цинка путем штамповки. Применение

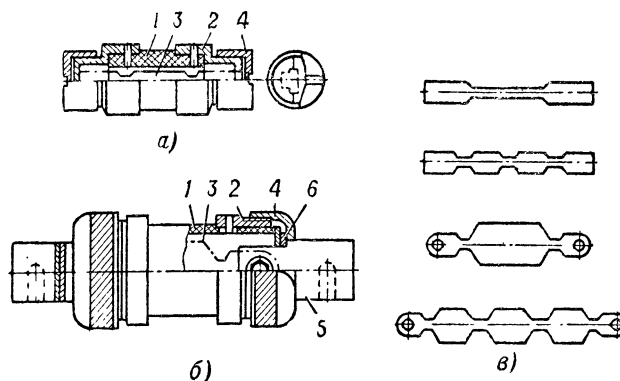


Рис. 17-3. Предохранитель типа ПР-2.

легкоплавкого материала — цинка, стойкого против коррозии, и выбранная форма вставки позволяют получить благоприятную защитную характеристику. Плавкая вставка 3 присоединяется к ножевидным контактам 5 с помощью болтов с шайбами.

Вставка располагается в герметичном трубчатом патроне, который состоит из фибрового цилиндра 1, латунной обоймы 2 и латунного колпачка 4. Предохранители на токи от 15 до 60 А имеют упрощенную конструкцию контактной системы (рис. 17-3, а).

Процесс гашения дуги происходит следующим образом. При отключении сгорают суженные сечения плавкой вставки и возникает дуга. Под действием высокой температуры дуги стенки патрона, выполненные из фибры, выделяют газ, в результате чего давление в патроне за доли полупериода поднимается до 4—8 МПа. За счет увеличения давления поднимается вольт-амперная характеристика дуги, что способствует ее быстрому гашению (§ 4-2).

Плавкая вставка может иметь от одного до четырех сужений (рис. 17-3, в) в зависимости от номинального напряжения. Суженные участки вставки способствуют быстрому ее плавлению при коротких замыканиях и создают эффект токоограничения.

При отключении переменного тока гашению помогает околоэлектродная прочность. Если положить, что гашение дуги происходит за

2 мс, то утолщенные части вставки за это время под действием силы тяжести переместятся всего на $0,02 \cdot 10^{-3}$ м, т. е. можно считать, что вставка, имеющая четыре суженных сечения, создает четыре разрыва на полюс. Это обеспечивает надежное гашение дуги при напряжении 500 В.

Согласно [Л. 3-3] давление внутри патрона пропорционально квадрату тока в момент плавления вставки и может достигать больших значений. Фибровая трубка поэтому должна обладать высокой механической прочностью. Для повышения прочности на концах фибрового цилиндра установлены латунные обоймы, укрепленные на цилиндре с помощью заклепок. Колпачки предохранителя 4 крепят к корпусу патрона 2, диски 6 жестко связанные с контактными ножами 5.

Предохранители работают бесшумно, практически без выброса пламени и газов. Это позволяет монтировать соседние полюсы на близком расстоянии.

Предохранители выпускаются с двумя размерами вдоль оси — короткие и длинные. Короткие предназначены для работы при переменном напряжении не выше 380 В. Они имеют меньшую отключающую способность, чем длинные, рассчитанные на работу в сети с напряжением до 500 В.

В зависимости от номинального тока меняется диаметр патрона. Всего выпускается шесть габаритов патронов, различающихся диаметром. В патроне каждого габарита могут устанавливаться вставки на различные номинальные токи. Так, в патроне на номинальный ток 15 А могут быть установлены вставки на ток 6, 10 и 15 А.

Испытательные токи для предохранителя типа ПР-2 приведены в табл. 17-2.

Т а б л и ц а 17-2

Испытательные токи плавких вставок

Номинальный ток вставки, А	Длительность приложения испытательного тока, ч	Кратность испытательного тока по отношению к номинальному	
		Нижнее значение	Верхнее значение
6 и 10	1	1,5	2,1
15, 20 и 25	1	1,4	1,75
От 35 до 350 включительно	1	1,3	1,6
От 430 до 1000 включительно	2	1,3	1,6

Различают нижнее и верхнее значения испытательного тока. Нижнее значение испытательного тока — это максимальный ток, который, протекая в течение 1 ч, не приводит к перегоранию предохранителя.

Верхнее значение испытательного тока — это минимальный ток, который, проходя в течение 1 ч, плавит вставку предохранителя.

С достаточной точностью можно принять пограничный ток равным среднему арифметическому значению испытательных токов.

Предохранители ПР-2 работают с токоограничением. Так, в цепи с действующим током короткого замыкания 50 000 А предохранитель

на ток 6 А произведет отключение при токе всего 400 А. Однако чем больше номинальный ток, тем меньше эффект токоограничения. При номинальном токе 600 А токоограничение отсутствует, так как дуга горит весь полупериод.

Подробные данные о временных характеристиках, предельном токе отключения и длительности горения дуги приведены в [Л. 3-7].

б) Предохранители с мелкозернистым наполнителем. Эти предохранители обладают более совершенными характеристиками, чем

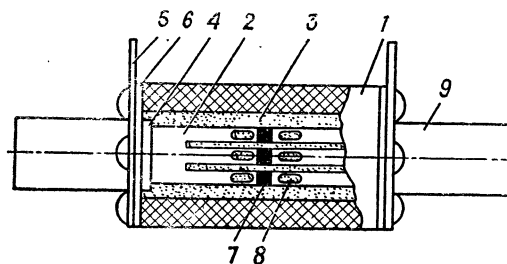


Рис. 17-4. Предохранитель типа ПН-2.

предохранители ПР-2. Разрез такого предохранителя типа ПН-2 показан на рис. 17-4.

Корпус предохранителя 1 изготавливается из прочного фарфора или стеатита. Внутри корпуса расположены ленточные плавкие вставки 2 и наполнитель — кварцевый песок 3. Снаружи корпус имеет форму квадрата. Плавкие вставки привариваются к диску 4, который крепится к пластинам 5, связанным с ножевым контактом 9. Пластины 5 закрепляются на корпусе с помощью винтов, которые ввинчиваются в отверстия с резьбой.

Плавкая вставка выполняется из медной ленты толщиной 0,1—0,2 мм. Для получения эффекта токоограничения вставка имеет суженные сечения 8. Разбивка плавкой вставки на несколько параллельных ветвей — ленточек (в данном случае их три) позволяет более полно использовать объем наполнителя. Применение тонкой ленты, эффективный теплоотвод от суженных участков позволяют выбрать небольшое минимальное сечение вставки для данного номинального тока, что обеспечивает высокую токоограничивающую способность. Соединение нескольких суженных участков последовательно способствует замедлению роста тока после плавления вставки, так как возрастает напряжение на дуге предохранителя.

Для снижения температуры плавления вставки на суженные участки наносятся оловянные шарики 7.

В качестве наполнителя используется кварцевый песок с содержанием SiO_2 не менее 98% и размерами зерен $(0,2—0,4) \cdot 10^{-3}$ м. Влажность песка должна быть не выше 3%. Перед засыпкой песок тщательно просушивается при температуре 120—180° С.

При коротком замыкании плавкая вставка сгорает и образуется дуга, которая горит в канале, образованном песчинками. Кварцевые песчинки имеют высокую теплопроводность и хорошо развитую охлаждающую поверхность.

Поскольку дуга горит в узкой щели, начиная с тока выше 100 А, она имеет возрастающую вольт-амперную характеристику. Градиент напряжения на дуге достигает таких высоких значений, как $(2-6) \times 10^4$ В/м. Это дает возможность гасить дугу за несколько миллисекунд при небольшой длине.

После срабатывания предохранителя плавкие вставки вместе с диском 5 удаляются и взамен устанавливаются новые, после чего патрон засыпается песком. Для герметизации патрона под пластины 3 кладется асбестовая прокладка 6, что предохраняет песок от увлажнения. При номинальном токе 40 А и ниже предохранитель имеет более простую конструкцию.

Предохранители ПН-2 выпускаются на номинальный ток до 630 А. Предельно отключаемый ток короткого замыкания, который может отключаться предохранителем, достигает 50 кА (действующее значение тока металлического короткого замыкания сети, в которой устанавливается предохранитель).

Малые габариты, незначительная затрата дефицитных материалов, высокая токоограничивающая способность являются достоинствами, этого предохранителя. Технические характеристики предохранителей ПН-2 приведены в [Л. 3-7].

В том случае, когда необходимо иметь малые габариты распределительного устройства, применяют резьбовые предохранители типа ПРС, изображенные на рис. 17-5. Один конец цепи подводится к зажиму 1, который связан с контактной гильзой 2, оканчивающейся резьбовым соединением, связанным с контактом съемной головки 3. Плавкая вставка 4 располагается в фарфоровом цилиндре 5, заполненном внутри кварцевым песком. На торцах цилиндра 5 укреплены контактные колпачки, к которым присоединена плавкая вставка 4. Второй конец цепи через зажим 7 соединяется с контактным винтом 8.

Предохранитель имеет указатель срабатывания. При сгорании плавкой вставки освобождается специальная пружина, которая выбрасывает глазок, расположенный у застекленного отверстия 6.

Перезарядка предохранителя производится путем замены цилиндра 5 (вместе со сгоревшей плавкой вставкой и сигнализирующим устройством) новым цилиндром.

Предохранители этого типа выпускаются на токи до 100 А. Они могут устанавливаться в цепях постоянного тока при напряжении до 440 В и переменного тока частотой 50 Гц при напряжении до 500 В, их предельная отключающая способность составляет 60 кА.

Эти предохранители более сложны в производстве, чем предохранители ПН-2, поэтому и более дороги. Их целесообразно применять

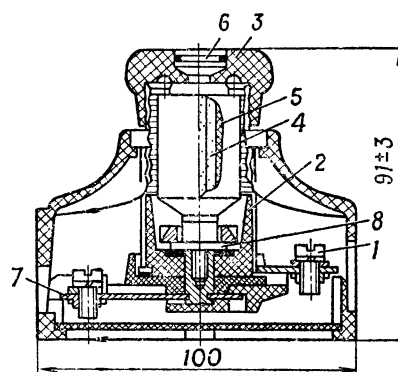


Рис. 17-5. Предохранитель типа ПРС.

в тех случаях, когда необходимы малые габариты и быстрота смены сгоревшей плавкой вставки. Характеристики предохранителей типа ПРС приведены в [Л. 3-7].

в) **Предохранители для защиты полупроводниковых приборов.** В настоящее время мощные полупроводниковые диоды и тиристоры, которые ради краткости будем называть приборами, находят широкое применение в выпрямительных установках и схемах автоматического управления. Существующие до последнего времени предохранители и автоматы из-за относительно большого времени срабатывания не могут защитить приборы при коротких замыканиях. Для выполнения поставленной задачи разработаны специальные быстродействующие предохранители.

При временах $t \leq 0,02$ с можно считать, что процесс нагрева прибора протекает по адиабатическому закону. Для удобства согласования характеристик прибора и предохранителя вводится понятие

$$\text{джоулева интеграла } G = \int_0^t i^2 dt.$$

Согласно [Л. 17-5] для приборов, нагретых номинальным током, допустимый ток в течение 0,02 с равен $3,6 I_n$.

Тогда

$$G_{н.п} = (3,6 I_n) \cdot 0,02 = 0,26 I_n^2.$$

Если прибор нагревается с холодного состояния, то допустимый ток равен $7 I_n$, а интеграл [Л. 3-7]

$$G_{хол.п} = (7 I_n)^2 \cdot 0,02 \approx I_n^2.$$

Для того чтобы предохранитель защитил прибор, необходимо, чтобы полный джоулев интеграл предохранителя был меньше джоулева интеграла прибора. Джоулев интеграл предохранителя состоит из джоулева интеграла нагрева до температуры плавления $G_{пл}$ вставки и джоулева интеграла гашения образовавшейся дуги $G_{гаш}$. С целью сокращения первой составляющей предохранитель должен работать с большим токоограничением. Для достижения этой цели плавкая вставка выполняется из серебра, имеет перешеек с минимальным сечением и хорошо охлаждается кварцевым наполнителем (предохранители ПНБ). В некоторых предохранителях ПБФ плавкая вставка зажата между дисками корунда (Al_2O_3), обладающего теплопроводностью в 7 раз большей, чем кварцевый наполнитель. Плотности тока в перешейке в номинальном режиме достигают 2000 А/мм².

Джоулев интеграл $G_{гаш}$ обычно учитывается коэффициентом $k_{общ}$:

$$G_{общ} = G_{пл} + G_{гаш} = G_{пл} \left(1 + \frac{G_{гаш}}{G_{пл}} \right) = G_{пл} k_{общ}.$$

В выполненных конструкциях $k_{общ} = 3 \div 10$ и пропорционален $\sqrt[4]{I_{к.з}}$ (при $I_{к.з} > 10 I_n$).

Быстродействующий предохранитель ПНБ-3 (разработан на базе предохранителя ПН-2) выпускается на переменное и постоянное напряжения до 660 В и номинальные токи 40—630 А. Предельная амплитуда тока короткого замыкания сети 150 кА. Максимальный фактический ток короткого замыкания не более 15 кА. Джоулев ин-

теграл плавления (с холодного состояния) для вставки 100 А равен $(0,2-2) \cdot 10^{-4} \text{ А}^2 \cdot \text{с}$. Полный джоулев интеграл $G_{\text{общ}} = (5-10) \times 10^{-4} \text{ А}^2 \cdot \text{с}$ (напряжение 660 В). Данные серии ПНБ-5 приведены в [Л. 3-7]. В настоящее время отечественной промышленностью выпускаются более совершенные предохранители серий ПП-31, ПП-41, ПП-51, ПП-61, ПП-71.

Следует отметить, что быстродействующие предохранители предназначены только для защиты от коротких замыканий. Защита от перегрузок должна выполняться другими аппаратами.

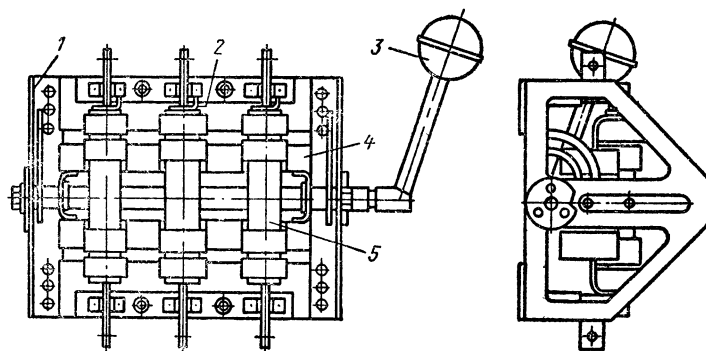


Рис. 17-6. Блок предохранитель — выключатель.

г) **Блоки предохранитель — выключатель.** Для сокращения размеров распредустройства выпускаются блоки предохранитель — выключатель (БПВ), обеспечивающие отключение номинальных токов и защиту цепей от перегрузок и коротких замыканий.

Общий вид БПВ представлен на рис. 17-6. В стальной раме 1 поступательно перемещается траверса 4, на которой укреплены предохранители 5. При вращении рукоятки 3 траверса с предохранителями перемещается и контакты аппарата размыкаются. Наличие двух разрывов на полюс обеспечивает отключение номинальных токов до 350 А при переменном напряжении до 550 В. Для отключения номинального постоянного тока 350 А при напряжении до 440 В разрывы снабжаются деионными решетками (§ 10-3).

Съем патрона с перегоревшей вставкой возможен только в отключенном положении БПВ, после освобождения защелки 2. Электрическая износостойкость аппарата 2500 коммутационных циклов, механическая — 5000 циклов.

17-5. Выбор предохранителей

а) **Выбор по условиям длительной эксплуатации и условиям пуска.** В процессе длительной эксплуатации температура нагрева предохранителя не должна превосходить допустимых для него значений. В этом случае обеспечивается стабильность характеристик предохрани-

теля. Для выполнения этого требования необходимо, чтобы патрон и плавкая вставка выбирались на номинальный ток, равный или несколько больший, чем номинальный ток установки.

Предохранитель не должен отключать установку при перегрузках, которые являются эксплуатационными. Так, при пуске асинхронного двигателя с короткозам-

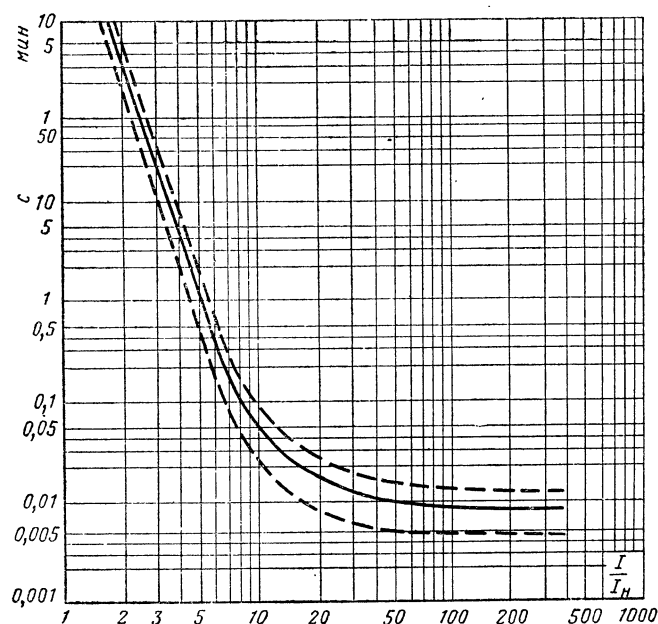


Рис. 17-7. Время-токовая характеристика предохранителя ПН-2.

кнутым ротором пик пускового тока может достигать $7I_n$ двигателя. По мере разгона двигателя пусковой ток падает до значения, равного номинальному току машины. Длительность пуска зависит от характера нагрузки. Для двигателей привода металлорежущих станков с относительно небольшой инерцией механизма время разгона составляет 1 с. Процесс разгона центрифуги происходит значительно медленней из-за большой инерции механизма, и длительность пуска может достигать 10 с и более.

Предохранитель должен не только выдерживать пусковые токи, но в нем не должно происходить старения

плавкой вставки под действием этих токов. Экспериментально установлено, что старение плавкой вставки не происходит, если через нее протекает в течение данного времени ток, равный половине плавящего тока. Согласно защитной характеристике, представленной на рис 17-7, вставка предохранителя ПН-2 при времени 1 с плавится при токе, равном $5I_n$. Если пуск длится 1 с, то средний пусковой ток за этот период должен быть не более 0,5 от тока плавления вставки за это же время. Таким образом, пусковой ток I_n связан с током вставки соотношением $I_n = 0,5 I_{пл} = 0,5 \cdot 5I_n$ и, следовательно,

$$I_n = 0,4 I_n,$$

т. е. номинальный ток вставки выбирается по пусковому току.

Для тяжелых условий пуска, когда двигатель медленно разворачивается (привод центрифуги), или в повторно-кратковременном режиме, когда пуски происходят с большой частотой, вставки выбирают с еще большим запасом: $I_n = (0,5 \div 0,6) I_n$. В случае, если предохранитель стоит на линии, питающей несколько двигателей, плавкую вставку рекомендуется выбирать по формуле

$$I_n = 0,4 (I_p + I_n),$$

где I_p — расчетный номинальный ток линии;
 I_n — пусковой ток одного двигателя.

Следует отметить, что плавкие вставки, выбранные таким образом, работают с большим запасом и в процессе пуска нагреваются до небольших температур (порядка 65°C при $\theta_0 = 25^\circ\text{C}$).

С другой стороны, выбор плавкой вставки по пусковому току ведет к тому, что при небольших перегрузках предохранитель практически не защищает цепь. Например, при тяжелых условиях пуска номинальный ток вставки может равняться $3I_n$ провода, так что при небольшой перегрузке изоляция провода может нагреться до температуры воспламенения.

Здесь необходимо отметить еще одно важное обстоятельство. При таком предохранителе длительность отключения при кратности $I_k/I_n < 15$ более 15 с. Вследствие того, что однофазный ток короткого замыкания значительно меньше трехфазного, предохранитель будет отключать однофазные короткие замыкания на землю с

большой выдержкой времени. При этом создается опасность поражения людей током. Поэтому установка плавких вставок с большим запасом может допускаться только в крайних случаях, когда воспламенение изоляции проводников не грозит пожаром (провода уложены в стальных трубах и имеют огнестойкую изоляцию).

При выборе плавкой вставки всегда необходимо брать вставку наименьшего сечения, не дающую лож-

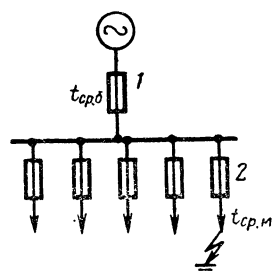


Рис. 17-8. К расчету селективности предохранителей.

ных отключений при эксплуатационных перегрузках и, с другой стороны, обеспечивающую безопасность работы обслуживающего персонала и пожаробезопасность.

б) **Выбор предохранителей по условию селективности отключения.** Предохранитель должен отключать поврежденную линию по возможности селективно. Между источником энергии и потребителем обычно устанавливается несколько предохранителей (рис. 17-8).

Предохранитель 1, пропускающий больший номинальный ток, имеет вставку большего сечения, чем предохранитель 2, установленный у потребителя. При коротком замыкании необходимо, чтобы повреждение отключалось предохранителем, расположенным у места повреждения. Все остальные предохранители, расположенные ближе к источнику, должны остаться в работе и не иметь какого-либо старения, изменяющего характеристику предохранителя. Такая согласованность работы предохранителя называется избирательностью или селективностью.

Для того чтобы обеспечить селективную работу предохранителей, полное время работы предохранителя 2 должно быть меньше времени нагрева предохранителя 1 до температуры плавления его вставки, т. е.

$$t_{пл1} \geq t_{р2}.$$

Воспользовавшись (17-1) и (17-5), можно получить для предохранителей закрытого типа

$$A' \frac{q_1^2}{I_k^2} > (A'_2 + A_2) \frac{q_2^2}{I_k^2} k_d.$$

После простейших преобразований получим условие селективности для предохранителей этого типа

$$\frac{q_1}{q_2} > \sqrt{\frac{A_2' + A_2''}{A_1'}} k_d.$$

Для закрытых предохранителей с мелкозернистым наполнителем и медной вставкой селективность соблюдается при условии, что $q_1/q_2 > 1,55$. Указанные соотношения, полученные в [Л. 17-1], справедливы и для случая токоограничивающих предохранителей, когда ток короткого замыкания проходит только долю полупериода.

Необходимо отметить, что расчет, рассмотренный нами, носит приближенный характер, так как необходимо учитывать конкретные характеристики данной конструкции предохранителей и отклонение реальных характеристик от номинальных из-за производственных допусков.

Для соблюдения условия селективности необходимо, чтобы наименьшее фактическое время срабатывания предохранителя 1 (на больший ток) было больше наибольшего времени срабатывания предохранителя 2 (на меньший номинальный ток):

$$t_{\text{ср.б}} > t_{\text{ср.м.}}$$

Реальное время срабатывания предохранителя из-за производственных допусков может отклоняться от номинального на 50% в обе стороны [Л. 17-7]. Тогда вышеприведенное неравенство можно записать в виде

$$0,5 t_{\text{ср.б}} > 1,5 t_{\text{ср.м.}},$$

где $t_{\text{ср.б}}$ — время срабатывания предохранителя на больший номинальный ток, соответствующее номинальной характеристике; $t_{\text{ср.м.}}$ — время срабатывания предохранителя на меньший номинальный ток, соответствующее номинальной характеристике. Множители 0,5 и 1,5 учитывают, что характеристика предохранителя 1 взята с отрицательным отклонением времени срабатывания, а характеристика предохранителя 2 — с положительным допуском. В результате получим необходимое условие селективности

$$t_{\text{ср.б}} > 3 t_{\text{ср.м.}} \quad (17-6)$$

т. е. для того, чтобы предохранители работали селективно, необходимо, чтобы время срабатывания предохранителя на больший ток было в 3 раза больше, чем у предохранителя на меньший ток.

Следует отметить, что неравенство (17-6) учитывает самый тяжелый случай, когда время работы предохранителя на больший номинальный ток имеет наименьшее значение, а у предохранителя на меньший номинальный ток — наибольшее значение. Такое соотношение следует рекомендовать только для особо ответственных установок. На основании неравенства (17-6) составлена табл. 17-3 [Л. 17-7]. В верхней горизонтальной графе дано отношение тока короткого замыкания $I_{к.з.}$ к номинальному току меньшей вставки $I_{н.м.}$. Для данной вставки с током $I_{н.м.}$ вставка на больший ток берется в зависимости от кратности тока. Так, при $I_{к.з.}/I_{н.м.}=10$ при токе $I_{н.м.}=30$ А вставка предохранителя на больший ток должна быть выбрана на 50 А.

Таблица 17-3

Номинальный ток большей плавкой вставки предохранителя ПН-2, требующийся для обеспечения селективности в особо ответственных случаях

Номинальный ток меньшей плавкой вставки предохранителя ПН-2, А	Номинальный ток большей вставки, А, при кратности тока короткого замыкания по отношению к номинальному току вставки меньшего сечения				
	10	20	50	100	150 и более
30	50	60	120	150	200
40	60	80	120	200	200
50	80	100	120	250	250
60	100	120	150	250	250
80	120	120	200	250	250
100	120	120—150	250	250	250
120	150	200	300	300	300
150	200	250	300	300	300
200	250	300	400	400	400
250	300	400	600	600	600
300	400	500	600	—	—
400	600	600	—	—	—

Для не очень ответственных случаев при выборе вставок можно ориентироваться на отклонение реальных характеристик предохранителей от номинальных $\pm 25\%$ [Л. 17-7].

17-6. Высоковольтные предохранители

а) **Назначение высоковольтных предохранителей и требования, предъявляемые к ним.** Процесс нагрева плавкой вставки в высоковольтных предохранителях протекает точно так же, как и в предохранителях низкого напряжения.

В отношении времени плавления к высоковольтным предохранителям предъявляется следующее общее требование: при перегрузке в 200% длительность плавления вставки должна быть менее 2 ч, а при перегрузке 130% время плавления вставки превышает 1 ч.

Высоковольтные предохранители часто применяются для защиты трансформаторов напряжения от коротких замыканий (§ 24-1). Нормальный ток, текущий через предохранитель, не превышает доли ампера. При повреждении трансформатора через предохранитель проходит ток короткого замыкания сети. В предохранителях, предназначенных для работы с трансформатором напряжения, время плавления вставки равно 1 мин при токе 1,25—2,5 А.

В связи с высоким значением восстанавливающегося напряжения процесс гашения дуги утяжеляется. Это накладывает отпечаток на размеры и конструкцию высоковольтных предохранителей. Наибольшее распространение получили предохранители с мелкозернистым наполнителем и стреляющего типа.

б) **Предохранители с мелкозернистым наполнителем.** Согласно данным ВЭИ длина плавкой вставки (м) определяется по формуле

$$l = 0,160 + 0,07U_n,$$

где U_n — номинальное напряжение предохранителя, кВ.

Для того чтобы обеспечить эффективное гашение дуги, плавкая вставка берется малого диаметра. Размещение длинной и тонкой спирали в корпусе небольшой длины связано с большими трудностями.

Разрезы двух типов предохранителей на напряжение 6—10 кВ приведены на рис. 17-9, а. Фарфоровый цилиндр 1 с обеих сторон армирован латунными колпаками 2, которые являются контактами предохранителя. Песок 7 в предохранитель засыпается через отверстие в колпаке, которое после зарядки предохранителя закрывается крышкой 3, припаянной к колпачку. В предохранителе на небольшой ток (до 7,5 А) плавкая вставка 5 наматывается на керамический ребристый каркас 4. Этот каркас позволяет увеличить длину плавкой вставки, увеличить эффект токоограничения и, следовательно, повысить мощность отключения. Однако при перегрузках, меньших $3I_n$, возможно образование канала из материала каркаса и расплавив-

шейся проволоки, по которому проходит ток. В результате наступает тепловое разрушение предохранителя. Поэтому предохранители с каркасом следует применять только для защиты от коротких замыканий.

В предохранителях на токи, большие, чем 7,5 А, плавкая вставка наматывается в виде спирали (рис. 17-9, б). Параллельные спирали не должны касаться друг друга. Применение параллельных вставок

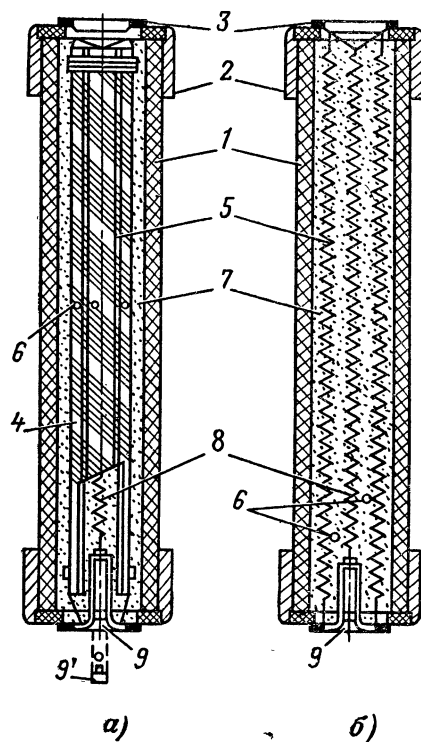


Рис. 17-9. Предохранитель типа ПК.

позволяет выполнить предохранитель на большие номинальные токи (до 100 А при $U_n = 3$ кВ). При напряжении 10 кВ максимальный ток патрона равен 50 А). При номинальном токе 200 А приходится ставить четыре параллельных патрона. Применение параллельных вставок позволяет использовать вставки из медной или серебряной проволоки малого диаметра и сохранить эффект узкой щели в процессе дугогашения.

Для снижения температуры предохранителя при небольших длительных перегрузках плавкие вставки имеют оловянные шарики 6.

Предохранитель имеет указатель срабатывания 9. На указатель 9 действует пружина, которая старается выбросить его из головки предохранителя. Этот указатель удерживается во втянутом состоянии специальной плавкой вставкой 8. После перегорания медных вставок 5 сгорает вставка 8. При этом указатель освобождается и выбрасывается в положение 9 (рис. 17-9, а).

Поскольку указатель выбрасывается из предохранителя с силой, определяемой пружиной, то этот указатель можно использовать для автоматического отключения выключателя нагрузки после отключения короткого замыкания предохранителем (§ 19-11).

Указатель 9 может быть использован также в предохранителях с автоматическим повторным включением АПВ. В этом случае срабатывание указателя в первом предохранителе ведет к включению параллельно первому предохранителю второго с целой плавкой вставкой.

При коротком замыкании плавкая вставка испаряется по всей длине и в цепь вводится длинная дуга, горящая в узкой щели и имеющая высокое сопротивление, особенно в начальной стадии, когда пары металла недостаточно ионизированы. Все это приводит к возникновению больших перенапряжений — до $4,5 U_n$.

Для ограничения перенапряжений применяются вставки переменного сечения. Вначале сгорает участок меньшего сечения, а затем большего. В результате длина дуги растет медленней [Л. 17-2].

Предохранители с мелкозернистым наполнителем работают с токоограничением, особенно при больших токах короткого замыкания. Хорошее охлаждение тонких плавких вставок позволяет взять минимальным потребное сечение и снизить ток плавления, а следовательно, и ток ограничения. С ростом номинального тока эффект токоограничения падает. Мощность описанных предохранителей отключения достигает $200 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ при напряжении до 10 кВ .

Для защиты трансформаторов напряжения применяются предохранители серии ПКТ. Эти предохранители имеют внутри керамический каркас для тонкой плавкой вставки. Так как номинальный ток таких вставок менее 1 А , то сечение вставок мало и токоограничивающий эффект этих предохранителей особо велик. Они изготавливаются на напряжение до 35 кВ . Мощность короткого замыкания сети, в которой могут быть установлены эти предохранители, равна $1000 \text{ МВ} \cdot \text{А}$. Некоторые типы предохранителей, например ПКТ-10, при напряжении 3 и 6 кВ могут работать в сети с бесконечной мощностью благодаря эффекту токоограничения. Предохранители серий ПК и ПКТ работают бесшумно, без выброса пламени и раскаленных газов.

Для нормальной работы предохранителей особо важное значение имеет герметизация. Если в предохранитель проникает влага, то он теряет способность гасить дугу. Поэтому при установке предохранителей надо обращать внимание на герметичность. Места пайки и цементирующей замазки, крепящей колпачки, должны быть хорошо окрашены специальной эмалью. Перезарядка предохранителя в условиях эксплуатации практически исключена.

Развитие предохранителей на напряжение выше 35 кВ упирается в сложность их изготовления и большие габариты.

Как правило, установки с напряжением 35 кВ и выше работают на открытом воздухе и подвержены воздействию атмосферы. В этих условиях трудно обеспечить надежную работу предохранителя ПК из-за увлажнения наполнителя. Характеристики кварцевых предохранителей высокого напряжения приведены в [Л. 3-2].

в) **Стреляющие предохранители (ПСН).** При напряжениях выше 35 кВ для открытых установок наибольшее применение получили стреляющие предохранители. Основной частью предохранителя, изображенного на рис. 17-10, является газогенерирующая трубка 1. Внутри трубки расположен гибкий проводник 2, который с одной стороны соединяется с плавкой вставкой 3, с другой — с контактным наконечником 4, на который действует рычаг, вращаемый пружиной (на рисунке не показан).

Вторым своим концом плавкая вставка присоединена к металлическому колпаку — контакту 5. Плавкая вставка состоит из двух параллельных проволок: стальной 3 и медной 6. Стальная воспринимает силу пружины, которая стремится вытащить гибкий проводник из трубки. Основная часть тока проходит по медной проволоке, имеющей меньшее активное сопротивление.

При нормальном режиме рычаг действует на наконечник 4 и держит стальную вставку в натянутом состоянии. В случае короткого замыкания сгорает сначала медная вставка, а потом стальная. Под действием пружины гибкий проводник выбрасывается из дугогасящей трубки.

Дуга, образуемая после плавления вставки, затягивается в канал трубки из газогенерирующего материала (фибра, винипласт). Под действием дуги стенки камеры интенсивно выделяют газ и внутри трубки быстро поднимается давление, благодаря чему ускоряется

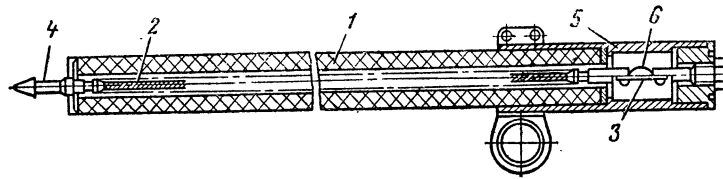


Рис. 17-10. Стреляющий предохранитель ПСН.

процесс выбрасывания гибкого проводника из канала. Возникающее продольное газовое дутье обеспечивает быстрое гашение дуги. Длительность горения падает с величиной тока. При больших токах дуга гаснет за 0,04 с. При малых токах (800—1000 А) время горения возрастает до 0,3 с.

Процесс отключения сопровождается сильным выбросом пламени, газов и мощным звуковым эффектом — выстрелом. В связи с этим стреляющие предохранители рекомендуется применять в открытых установках, где удаление предохранителей соседних фаз не вызывает больших трудностей. Предохранители типа ПСН строятся на напряжения 10 и 35 кВ. Наибольший ток отключения 15 кА.

В процессе гашения дуга сначала имеет небольшую длину, а затем длина ее увеличивается по мере выброса гибкого проводника. Это ограничивает скорость роста сопротивления дугового промежутка и снимает вопрос перенапряжений.

Плавкая вставка при прохождении длительного тока нагревается до высокой температуры. Для того чтобы исключить разложение и газообразование, она располагается в полости металлического колпачка 5 (рис. 17-10) вне генерирующей трубки 1.

Если предохранитель типа ПСН устанавливается для защиты трансформатора напряжения, то последовательно в цепь включается высокое ограничивающее сопротивление. Поскольку первичный ток трансформатора напряжения мал, то падение напряжения на этом сопротивлении ничтожно по сравнению с напряжением сети. При повреждении трансформатора ток ограничивается активным сопротивлением. Угол сдвига фаз между током и напряжением сети близок к нулю, что облегчает работу предохранителя.

г) **Выбор предохранителей.** При определении номинального тока вставки необходимо исходить из условия максимальной длительной перегрузки.

Очень часто обмотка высшего напряжения силового трансформатора присоединяется через предохранитель.

При подаче напряжения на трансформатор возникают пики намагничивающего тока, средняя величина которых достигает $10 I_n$, а длительность прохождения равна примерно 0,1 с. Выбранный по номинальному току предохранитель должен быть проверен на прохождение начального намагничивающего тока при времени 0,1 с.

Т а б л и ц а 17-4

**Выбор трехфазных предохранителей высокого напряжения
для защиты силовых трансформаторов**

Номинальная (трехфазная) мощность (кВ·А) защищаемого трансформатора при напряжении, кВ				Номинальный ток плавкой вставки предохранителя, А
3	6	10	35	
—	—	10	—	2
—	10	—	40	3
10	—	—	100	5
—	—	40	—	7,5
—	40	—	—	10
—	—	100	—	15
40	100	—	—	20
100	—	—	1000	40
—	—	1000	—	100
—	1000	—	—	150
1000	—	—	—	300

Примечание. Для трансформаторов, номинальный ток которых отличается от приведенных в таблице, следует выбирать ближайшую большую плавкую вставку предохранителя.

В заключение необходимо проверить селективность работы предохранителя с выключателями, установленными на стороне высокого и низкого напряжения.

При коротком замыкании в самом трансформаторе время отключения предохранителя должно быть меньше, чем выдержка времени на выключателе, установленном на стороне высокого напряжения, ближайшем к предохранителю. При коротком замыкании на стороне низкого напряжения предохранитель должен иметь время плавления большее, чем уставка на защитах выключателей на стороне низкого напряжения. Пример расчета дан в [Л. 1-8]. При выборе плавкой вставки удобно пользоваться табл. 17-4.

АВТОМАТИЧЕСКИЕ ВОЗДУШНЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ (АВТОМАТЫ)

18-1. Общие сведения

Автомат служит для отключения электрической цепи при ненормальных и аварийных режимах — перегрузках, коротких замыканиях, чрезмерном понижении напряжения питания, изменении направления мощности и т. п. Автоматом можно также пользоваться для редких включений и отключений номинальных токов нагрузки.

К автоматам предъявляются следующие требования.

1. Токоведущая цепь автомата должна пропускать номинальный ток в течение сколь угодно длительного времени. Режим продолжительного включения для автомата является нормальным. С другой стороны, токоведущая система автомата подвергается воздействию больших токов короткого замыкания как при замкнутом положении контактов, так и при включении на существующее короткое замыкание.

2. Автомат должен обеспечивать многократное отключение предельных токов короткого замыкания, которые могут достигать десятков и даже сотен килоампер. После отключения этих токов автомат должен быть пригоден для длительного пропускания номинального тока.

3. Для повышения электродинамической и термической стойкости энергоустановок, уменьшения разрушений, вызываемых токами короткого замыкания, автоматы должны иметь малое время отключения. С целью уменьшения габаритов распределительного устройства и повышения безопасности обслуживания необходимо сокращение зоны выхлопа нагретых и ионизированных газов в процессе гашения дуги.

Принципиальная схема автомата на ток более 200А приведена на рис. 18-1. Токоведущая цепь имеет основные (3) и дугогасительные (1) контакты. Включение автомата может производиться вручную (рукояткой 12) или электромагнитом 4. Звенья 6, 7 и упор 13 являются механизмом свободного расцепления (§ 18-3). Отключение автомата может производиться вручную (12) или от расцепителей 5, 8, 10, 11 (см. § 18-4). Скорость расхождения контактов обеспечивается пружиной 9. Гашение

дуго, образующейся при отключении, происходит в камере 2 (§ 18-2).

Основными параметрами автоматов являются: номинальный длительный ток, номинальное напряжение, предельный ток отключения, собственное и полное время отключения.

Под собственным временем автомата понимают время от момента наступления условия срабатывания до

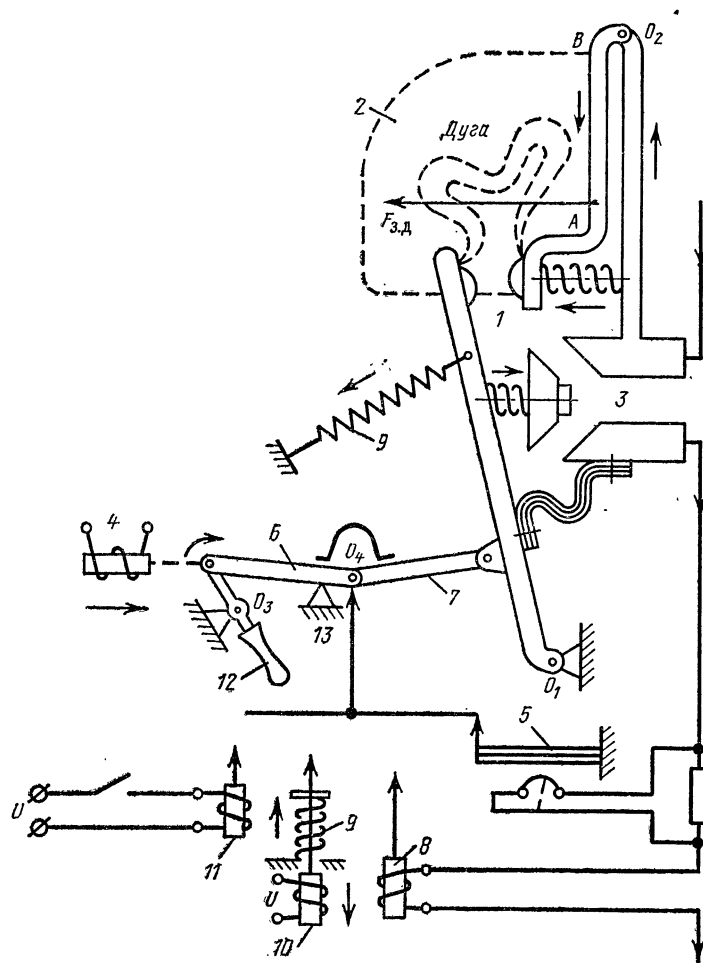


Рис. 18-1. Принципиальная схема автомата.

момента прекращения соприкосновения его контактов. После расхождения контактов возникающая электрическая дуга должна быть погашена за наименьшее время с перенапряжением, не представляющим опасности для остального оборудования.

На рис. 18-2, а даны кривые изменения тока и напряжения на контактах в процессе отключения для обыкновенного (небыстродействующего) автомата, а на рис. 18-2, б — для быстродействующего. От момента начала короткого замыкания ток растет по закону экспоненты до значения $I_{\text{ср}}$ (время t_0).

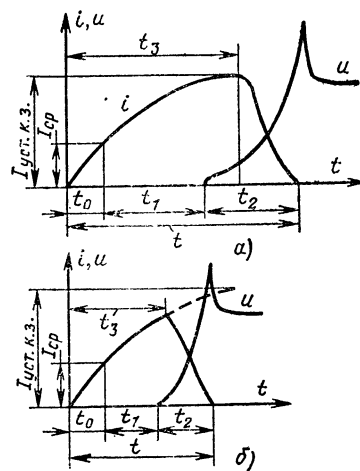


Рис. 18-2. Изменение тока цепи и напряжения на контактах в процессе отключения.

После этого проходит еще время t_1 до момента размыкания контактов. Это время тратится на расцепление защелки и выбор провала контактов. После расхождения контактов дуга гаснет за время t_2 . Время t_0 зависит от уставки по току срабатывания и скорости нарастания тока, которая определяется параметрами цепи короткого замыкания.

Время t_1 — собственное время автомата. Оно зависит от способа расцепления, конструкции контактов, массы подвижных частей и других факторов.

Если собственное время $t_1 \geq 0,01$ с, то автомат называется обыкновенным (небыстродействующим). В этом случае, как правило, к моменту размыкания ток в цепи достигает установившегося значения. Такой автомат не облегчает работу аппаратуры и оборудования при коротких замыканиях. Самому автомату также приходится отключать установившийся ток короткого замыкания.

В быстродействующих автоматах время t_1 сокращается до 0,002—0,008 с. К моменту расхождения контактов ток не достигает установившегося значения. Такой автомат, как правило, отключает ток значительно мень-

ший, чем установившийся ток короткого замыкания. Благодаря этому облегчается работа самого автомата, уменьшается термическая и динамическая нагрузка аппаратуры и оборудования. С увеличением скорости возрастания тока эффект токоограничения уменьшается, так как к моменту расхождения контактов ток достигает больших значений. Для получения токоограничения в настоящее время в этих автоматах применяются устройства, реагирующие не на ток, а на скорость его нарастания. В зависимости от вида воздействующей величины автоматы делятся на максимальные автоматы по току, минимальные автоматы по току, минимальные автоматы по напряжению, автоматы обратного тока, максимальные автоматы, работающие по производной тока, поляризованные максимальные автоматы (отключают цепь при нарастании тока в одном — прямом направлении) и неполяризованные, реагирующие на возрастание тока в любом направлении. Для построения селективно действующей защиты автоматы должны иметь регулировку тока срабатывания и времени срабатывания.

В некоторых случаях требуется комбинированная защита — максимальная по току и минимальная по напряжению. Автоматы, удовлетворяющие этим требованиям, называются универсальными.

Автоматы общепромышленного и бытового применения обычно имеют лишь максимально-токовую защиту, отрегулированную на заводе. В эксплуатации характеристики автомата не могут быть изменены. Для уменьшения возможности соприкосновения персонала с деталями, находящимися под напряжением, эти автоматы закрыты пластмассовым кожухом и практически не выбрасывают дугу из-под кожуха. Такие автоматы называются установочными. Во всяком автоматическом выключателе можно найти следующие основные узлы: токоведущую цепь, дугогасительную систему, привод автомата, механизм автомата, механизм свободного расцепления и элементы защиты — расцепители.

18-2. Токоведущая цепь и дугогасительная система автоматов

а) **Токоведущая цепь.** Основные требования к токоведущей цепи автоматов изложены выше (§ 18-1). Следует лишь добавить, что для получения малого собственно-

го времени масса подвижных частей токоведущей цепи должна быть минимально возможной.

Наиболее ответственной частью токоведущей цепи автоматов являются контакты. При номинальных токах до 200 А применяется одна пара контактов, которые для увеличения дугостойкости могут быть облицованы металлокерамикой. Большие номинальные токи требуют применения двухступенчатого контакта типа перекапывающегося моста или пары основных и дугогасительных контактов. На рис. 18-1 контактная система имеет основные 3 и дугогасительные контакты 1. Основные контакты облицовываются либо серебром, либо металлокерамикой (серебро, никель, графит). Дугогасительный неподвижный контакт покрывается металлокерамикой СВ-50 (серебро, вольфрам), подвижный СН-29ГЗ. Применяется металлокерамика других марок. Принцип работы таких контактов рассмотрен в § 3-4.

В автоматах на большие номинальные токи применяется включение нескольких параллельных пар основных контактов.

В быстродействующих автоматах с целью уменьшения собственного времени применяются исключительно торцевые контакты, имеющие малый провал. Контакты изготавливаются из меди и поверхности касания подвергаются серебрению. В связи с ростом номинального тока и относительно высоким сопротивлением контактов в настоящее время проводятся работы по искусственному охлаждению контактов с помощью жидкости [Л. 2-6 и 3-4]. Такое решение задачи позволяет сохранить малую массу и быстродействие автомата и увеличить длительный ток с 2500 до 10 000 А.

Устойчивость контактов при включении на короткое замыкание зависит от скорости нарастания давления в контактах. При амплитуде включаемого тока более 30—40 кА применяют автоматы моментного действия, у которых скорость движения контактов и нажатие в них не зависят от скорости перемещения включающей рукоятки.

В универсальных автоматах, работающих селективно, создается намеренная выдержка времени при протекании тока короткого замыкания.

Во избежание сваривания контактов аппарата обязательно применяется электродинамическая компенсация. Один из компенсаторов показан на рис. 18-1. При протекании тока в дугогасительном контуре на проводник

AB , несущий неподвижный дугогасительный контакт, действует электродинамическая сила $F_{э.д.}$, увеличивающая нажатие контактов.

В установочных и быстродействующих автоматах, у которых при коротком замыкании отключение происходит без выдержки времени, электродинамическая компенсация не применяется, так как она ведет к увеличению собственного времени автомата.

б) **Дугогасительная система.** Автомат должен обеспечивать гашение дуги при всех возможных режимах сети.

В автоматах нашли применение два исполнения дугогасительных устройств — полужакрытое и открытое.

В полужакрытом исполнении автомат закрыт кожухом, имеющим отверстия для выхода горячих газов. Объем кожуха делается достаточно большим, чтобы избежать появления внутри кожуха больших избыточных давлений. При полужакрытом исполнении зона выброса горячих и ионизированных газов составляет обычно несколько сантиметров от выхлопных щелей. Такое конструктивное решение применяется в автоматах, монтируемых рядом с другими аппаратами, в распределительных устройствах, в автоматах с ручным управлением. Предельный ток не превышает 50 кА.

При токах 100 кА и выше применяются камеры открытого исполнения с большой зоной выброса. Полужакрытое исполнение применяется, как правило, в установочных и универсальных автоматах, открытое — в быстродействующих и автоматах на большие предельные токи (100 кА и выше) или большие напряжения (выше 1000 В).

В аппаратах массового применения (установочных и универсальных) широкое применение получила деионная дугогасительная решетка из стальных пластин (§ 4-8 и 10-3). Поскольку автоматы должны работать как на переменном, так и на постоянном токе, число пластин выбирается из условия отключения цепи постоянного тока. На каждую пару пластин должно приходиться напряжение менее 25 В.

В цепях переменного тока с напряжением 660 В такие дугогасительные устройства обеспечивают гашение дуги с током до 50 кА. На постоянном токе эти устройства работают при напряжении до 440 В и отключают токи до

55 кА. В дугогасительных устройствах со стальными пластинами гашение происходит спокойно, с минимальным выбросом ионизированных и нагретых газов из дугогасительного устройства.

При больших токах применяются лабиринтно-щелевые камеры и камеры с прямой продольной щелью. Втягивание дуги в щель осуществляется магнитным дутьем с катушкой тока.

Продольно-щелевая камера может иметь несколько параллельных щелей неизменного сечения. Это уменьшает аэродинамическое сопротивление камеры и облегчает вхождение дуги с большим током в щели. Вначале дуга разбивается на ряд параллельных волокон. Но затем из всех параллельных ветвей остается лишь одна, в которой окончательно происходит гашение. Стенки камеры и перегородки изготавливаются из асбоцемента.

В лабиринтно-щелевой камере (рис. 10-5) постепенное вхождение дуги в зигзагообразную щель не создает высокого аэродинамического сопротивления при больших токах. Узкая щель повышает градиент напряжения в дуге, что сокращает необходимую длину дуги при гашении (§ 4-2). Зигзагообразная форма щели уменьшает габариты автомата.

В лабиринтно-щелевой камере осуществляется интенсивное охлаждение дуги стенками камеры. Ввиду того что дуга отдает большое количество тепла стенкам щели, материал камеры должен обладать высокой теплопроводностью и температурой плавления.

Для того чтобы не происходило разрушение камеры от высокой температуры, необходимо, чтобы дуга двигалась непрерывно с большой скоростью [Л. 7-2]. Это требует создания мощного магнитного поля на всем пути движения дуги в щели. При недостаточной скорости движения происходит разрушение дугогасительного устройства (§ 19-8).

В качестве материала для камеры применяется кордиерит. Газообразующие материалы типа фибры, органического стекла не применяются из-за повышения аэродинамического сопротивления.

В настоящее время с целью упрощения конструкции (отказ от мощных и сложных систем магнитного дутья) вновь возвращаются к идее деионной стальной решетки. Стальные пластины, имеющие паз для дугогасительных контактов, создают усилие, перемещающее дугу. В от-

личие от обычной решетки дуга соприкасается с изолированными стальными пластинами: гашение происходит так же, как в камере с поперечными изоляционными перегородками, но при отсутствии специальной магнитной системы,двигающей дугу.

18-3. Приводы и механизмы универсальных и установочных автоматов

а) **Приводы.** Привод должен сообщить контакту силу, необходимую для включения автомата в самом тяжелом случае — на существующее короткое замыкание.

Приводы можно разбить на две группы: ручные и электромеханические. Ручные приводы рекомендуется применять при номинальных токах до 200 А. При больших токах необходимо применять электромеханические приводы, обеспечивающие необходимую скорость нарастания давления в контактах. Электромагнитный привод нашел применение при токах до 600—1000 А.

Недостатками электромагнитного привода являются большие скорости движения и удары в механизме.

Обычно электромагнитный привод автомата питается от той же сети, к которой автомат подключает нагрузку. При повреждении в нагрузке автомат включается на существующее короткое замыкание. Напряжение на приводе в момент включения падает до нуля. Автомат может не включиться до конца. Более надежным является привод независимого действия, например пружинный.

Энергия, необходимая для включения, накапливается в заведенной пружине. После подачи команды на включение освобождается удерживающая защелка включающей пружины, автомат включается при любых условиях в сети. При ручном включении привод независимого действия можно получить, если использовать принцип прыгающего контакта — рис. 11-11.

В автоматах на токи 1500 А и выше желательно применение электродвигательного привода.

Электродвигатель соединен с автоматом через понижающую зубчатую передачу. Даже при потере напряжения кинетической энергии, накопленной в быстровращающемся роторе двигателя, бывает достаточно, чтобы закончить процесс включения. Большим достоинством этого привода является плавный ход механизма, отсутствие ударов. Мощность, потребляемая электродвига-

тельными приводами, больше, чем мощность, необходимая для взведения пружинного привода.

б) **Механизм передачи усилия от привода к контактам.** Механизм автомата выполняет следующие функции: передает движение от привода к контактам, удерживает контакты во включенном положении, производит освобождение контактов при отключении автомата, со-

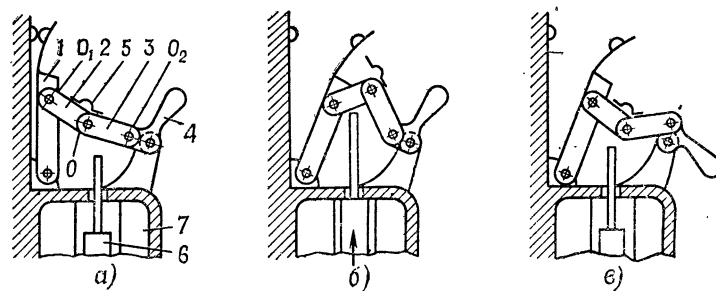


Рис. 18-3. Механизм простейшего автомата.

общает контактам скорость, необходимую для гашения дуги, фиксирует контакты в положении «отключено», подготавливает автомат для нового включения.

Ввиду специфики механизмов быстродействующих автоматов здесь рассматриваются только вопросы, касающиеся механизма установочных и универсальных автоматов.

На рис. 18-3, а приведена схема простейшего механизма, применяемого в автоматах с током до 1000 А.

При нормальном (неаварийном) включении рычаги 2 и 3 ведут себя как один жесткий рычаг, так как центр шарнира O , соединяющего эти звенья между собой, лежит ниже линии, соединяющей точки O_1 и O_2 . Упор 5 не дает возможности сложиться этим звеньям.

При включении на короткое замыкание якорь 6 электромагнита 7, обтекаемого током короткого замыкания, ломает рычаги, как это показано на рис. 18-3, б. Приводной рычаг 4 и контактный рычаг 1 оказываются несвязанными, расцепленными.

Под действием плоской контактной пружины и собственного веса контакты автомата размыкаются, происходит отключение автомата. Рукоятка привода может вращаться против часовой стрелки, правда, теперь уже

вхолостую. Для подготовки к новому включению необходимо повернуть включающую рукоятку 4 до отказа по часовой стрелке. При этом звенья 2 и 3 сложатся и снова будут представлять одно жесткое звено, как на рис. 18-3, в. Недостатком такого механизма является относительно большое усилие для расцепления, так как при этом необходимо деформировать контактную пружину. С ростом номинального тока растет нажатие контактных пружин, а следовательно, и усилие, необходимое для расцепления автомата. В связи с этим механизм свободного расцепления в виде ломающегося рычага применяется в автоматах на номинальный ток не выше 400—1000 А. При больших токах прибегают к другим типам механизмов свободного расцепления [Л. 18-1]. Необходимо отметить, что при отключении короткого замыкания скорость отключения может возрасти из-за действия электродинамических сил. В конечном положении происходит удар подвижных частей о неподвижную опору и отброс в направлении «включено». Отброс контактов может быть столь большим, что возможно новое замыкание цепи, в связи с чем устанавливаются демпферы отключения. Иногда подвижная часть в положении «отключено» сажается на специальную защелку. Расцепление этой защелки происходит при повороте приводной рукоятки в направлении «готов к включению».

18-4. Расцепители автоматов

Отключение автомата происходит под действием элементов защиты — расцепителей. Наиболее распространены максимальные расцепители. Для защиты оборудования от перегрузок необходимо, чтобы время-токовая характеристика расцепителя шла возможно ближе к характеристике защищаемого объекта.

В максимальных расцепителях широкое распространение получили электромагнитная система и тепловая с использованием биметаллической пластины. Электромагнитный расцепитель (поз. 8, рис. 18-1) прост по конструкции, имеет высокую термическую и электродинамическую стойкость, не боится вибраций. До момента воздействия на механизм свободного расцепления якорь расцепителя обычно имеет значительный свободный ход (5—10 мм). Расцепление происходит за счет удара, при котором основную роль играет кинетическая энергия, на-

копленная в якоре к моменту удара. Все это обеспечивает четкую работу автомата. Регулирование тока срабатывания может производиться за счет натяжения пружины или изменения числа витков обмотки, обтекаемой током нагрузки.

Для создания выдержек времени между электромагнитом и механизмом свободного расцепления ставят устройство задержки. Для селективно работающих автоматов нужна строгая согласованность во времени, которая достигается применением часового механизма. Выдержка времени такого устройства не зависит от тока, а следовательно, такое устройство от перегрузок не защищает.

Выдержки времени, зависящие от тока нагрузки, создаются разнообразными замедляющими устройствами, осуществляющими демпфирование за счет вязкости перетекающей жидкости или газа.

Более просто выдержка времени, зависящая от тока, получается с помощью тепловых расцепителей (поз. 5, рис. 18-1), аналогичных по конструкции тепловым реле (§ 11-4). Их время-токовая характеристика может быть достаточно хорошо согласована с защищаемым объектом. Однако эти расцепители имеют ряд недостатков, ограничивающих их применение.

а) Недостаточная термическая стойкость требует мгновенного отключения при больших токах. В этих случаях обычно применяется комбинация из электромагнитного и теплового расцепителя. Электромагнитный расцепитель работает при коротких замыканиях, тепловой — при перегрузках.

б) С ростом тока автомата растет усилие, необходимое для расцепления. Поэтому тепловой расцепитель применяется при токах до 200 А.

в) Выдержка времени теплового расцепителя зависит от температуры окружающей среды. Это не дает возможности полностью использовать оборудование.

г) Погрешность в токе срабатывания у тепловых расцепителей примерно в 2 раза больше, чем у электромагнитных.

д) Создание тепловых расцепителей на большие токи связано со значительными трудностями. Применение шунтов и трансформаторов тока увеличивает габариты автомата.

е) Из-за малой термической стойкости тепловые расцепители допускают малую длительность короткого за-

мыкания, что затрудняет получение необходимых ступеней селективности.

Для дистанционного отключения автомата устанавливается независимый электромагнитный расцепитель (поз. 11, рис. 18-1), который может быть выполнен как для питания постоянным током, так и для питания переменным током. Обмотка электромагнита рассчитывается на кратковременный режим работы.

Номинальное напряжение расцепителя не берется выше 220 В. Если источник питания имеет более высокое напряжение, то ставится добавочное сопротивление.

Минимальный расцепитель выполняется также электромагнитного типа (поз 10, рис. 18-1). Для того чтобы избежать нагрева катушки в отключенном положении, она питается через замыкающий блок-контакт. Этот контакт при включении замыкается раньше, чем главные контакты. Благодаря этому механизм подготавливается к работе в процессе самого включения. Напряжение отпадения электромагнита регулируется в пределах 35—70% номинального. При снижении напряжения ниже напряжения уставки пружина отрывает якорь от магнитной цепи и воздействует на механизм свободного расцепления. Ввиду того что электромагнит не может притянуть якорь при имеющемся большом начальном зазоре, в процессе включения механизма автомата либо подводит якорь к сердечнику, либо уменьшает натяжение пружины расцепителя. После окончания процесса включения восстанавливается натяжение пружины расцепителя.

Минимальный расцепитель может использоваться для дистанционного отключения, если последовательно с ним включить кнопку с размыкающим контактом. Если же минимальный расцепитель воздействует на механизм свободного расцепления через часовой механизм с выдержкой времени, то дистанционное отключение должно производиться независимым расцепителем.

18-5. Основные серии универсальных и установочных автоматов

а) **Серия автоматов А-3700.** Разрез автомата дан на рис. 18-4. Неподвижный контакт 7 имеет возможность небольшого перемещения и находится под действием контактной пружины. Подвижный контакт 6 укреплен на изоляционном рычаге, связанном с механизмом аппарата через тягу 16. Контакты имеют металлокерамические накладки 8.

Ток цепи проходит также через катушку максимального расцепителя 10 и трансформатор тока 3.

Выпускаются две модификации автоматов — токоограничивающие и селективные. В первых при больших токах короткого замыкания неподвижный контакт отбрасывается влево электродинамической силой в точке касания контактов и возникает дуга до начала движения подвижного контакта. Если ток цепи 100 кА, то через 1 мс за счет сопротивления дуги ток уменьшается до 20—50 кА. Нового касания контактов не происходит, так как расцепитель 10 освобождает механизм и начинается движение контакта 6.

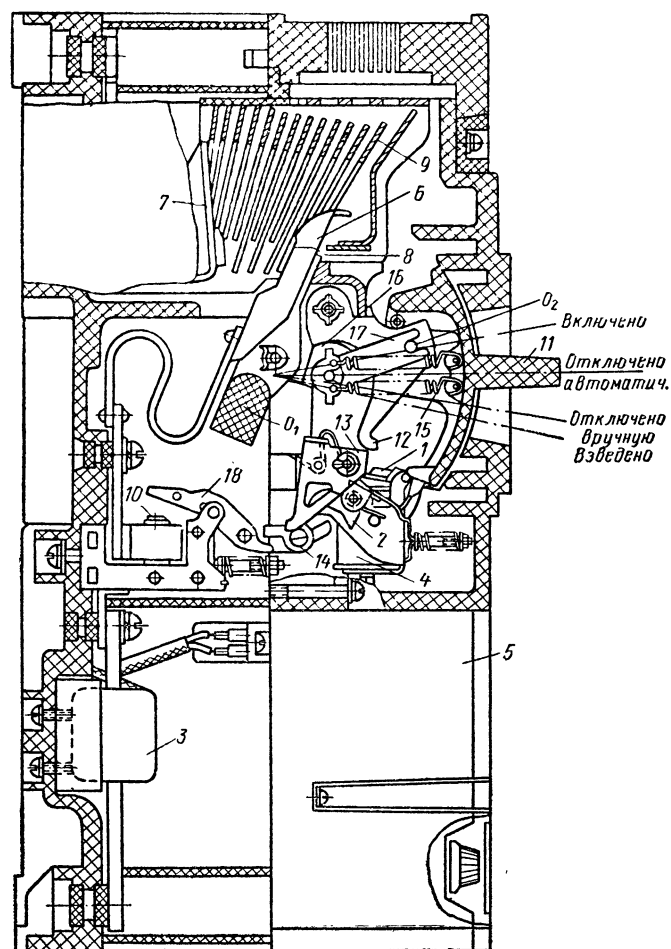


Рис. 18-4. Автомат серии А-3700.

Гашение дуги осуществляется деионной дугогасительной камерой 9 (§ 10-3). Полное время срабатывания токоограничивающего автомата 10—15 мс.

В селективных автоматах используется электродинамический компенсатор по рис. 18-1. Контакты не размыкаются до тех пор, пока не начнется движение рычага 16.

Для ручного включения рукоятка 11 сначала перемещается вниз. При этом рычаг 12 сцепляется с защелкой 13. Последняя фиксируется на полуюсью отключающей рейки 14. При движении рукоятки вверх независимо от скорости движения происходит замыкание контактов под действием пружин 15, перебрасывающих ломающиеся рычаги 16 и 17 вверх. Вращение рычага происходит вокруг оси O_2 , расположенной на рычаге 12. Такое включение называется моментным.

При отключении рукоятка 11 перемещается вниз до упора. Пружины 15 создают момент, отключающий контакты. В случае короткого замыкания якорь 18 расцепителя действует на отключающую рейку 14 и освобождает защелку 13, а следовательно, и рычаг 12. Происходит отключение. При перегрузках полупроводниковый блок защиты 5, питающийся от измерительного трансформатора тока 3, подает сигнал на независимый электромагнитный расцепитель 4. Якорь расцепителя 1 освобождает боек 2, воздействующий на отключающую рейку 14. Полупроводниковый блок защиты позволяет регулировать номинальный ток устройства и выдержку времени срабатывания в широких пределах. При перегрузках возврат обеспечивается, если после 75%-ной выдержки времени ток упадет до I_n . При коротких замыканиях возврат обеспечивается, если после 50, 170, 320 мс с начала короткого замыкания ток упадет до 70% уставки тока короткого замыкания.

В автоматах переменного тока питание схемы полупроводникового блока происходит от трансформатора тока 3. В автоматах постоянного тока в качестве датчика тока применяются магнитные элементы (гл. 13). Питание схемы блока производится от специального стабилизированного источника.

В процессе эксплуатации работа полупроводникового блока защиты может быть проверена без вывода автомата в ревизию.

Работоспособность полупроводникового блока сохраняется при колебании напряжения 85—110%.

Автомат может быть снабжен электромагнитным приводом для включения [Л. 3-7]. Выходной элемент привода воздействует на рукоятку 11 и обеспечивает включение и отключение аппарата. При монтаже привода автомат не разбирается и не демонтируется.

Номинальные токи серии автоматов 160—630 А. Номинальное переменное напряжение до 660 В, постоянное 440 В. Ожидаемый ток к. з. до 200 кА (амплитуда тока короткого замыкания цепи), износостойкость до 5000—10 000 коммутационных операций ВО (см. § 19-1) в зависимости от номинального тока аппарата. Подробные сведения приведены в [Л. 3-7].

б) **Серия автоматов «Электрон».** Для сетей с большим номинальным током (250—4000 А) разработана серия «Электрон». Контактная и дугогасительная системы автомата изображены на рис. 18-5. Автомат имеет основную (1, 2, 3) и дугогасительную (4, 5) контактные системы. Контактные поверхности облицованы металлокерамикой. Для повышения динамической стойкости используется компенсатор 8. При отключении поворачивается рычаг 9. Сначала перемещается мостик 1 и образуется зазор 6 мм, после чего размыкаются

контакты 4, 5. Образующаяся дуга затягивается в дугогасительную камеру, имеющую металлические пластинки 6. Для улучшения гашения стенки камеры сближаются, образуя сверху узкую щель. Для ограничения выброса пламени и ионизированных газов камера закрыта пламегасителем 7. Отключаемый ток автомата достигает 65 кА. Номинальное переменное напряжение 660 В и постоянное 440 В. Выходные зажимы автомата выполнены втычной конструкции, что поз-

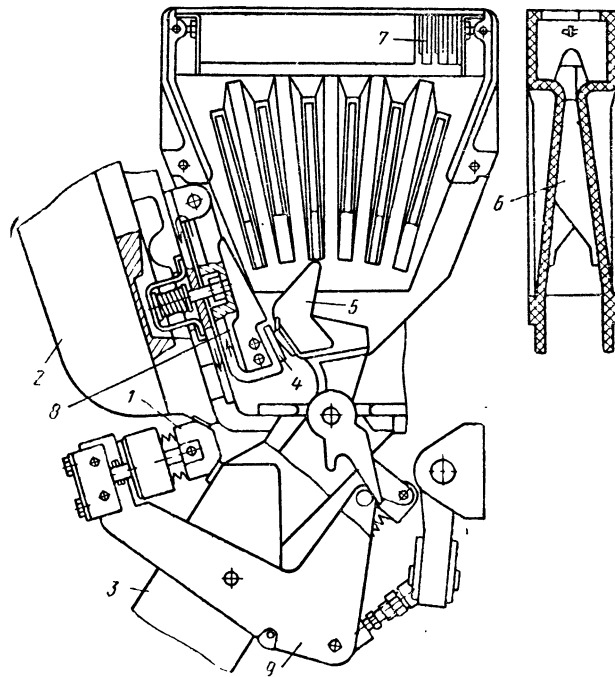


Рис. 18-5. Контактная и дугогасительные системы автомата серии «Электрон».

воляет легко вкатывать и выкатывать автомат по специальным рельсам для ремонта и ревизии. Дистанционное включение автомата производится электромагнитным (при $I_n=600$ А) или пружинным приводом (при $I_n=1000\div 4000$ А).

18-6. Быстродействующие автоматы

Как указывалось в § 18-1, быстродействие может быть получено за счет сокращения собственного времени и времени гашения дуги. Последнее ограничивается пере-

напряжениями. Чем быстрее происходит уменьшение тока, тем выше перенапряжения (§ 4-2). Поэтому возможности сокращения длительности горения дуги ограничены. В настоящее время она доведена до $(1,5—2) \cdot 10^{-2}$ с (на постоянном токе). Основное внимание уделяется уменьшению собственного времени автомата.

Для получения малого собственного времени контакты в быстродействующем автомате выполняются торцевого типа с малым провалом порядка 8—10 мм. Максимальное расстояние между контактами берется небольшим и составляет 18—22 мм при номинальном напряжении до 3000 В.

После расхождения контактов между ними возникает металлический мостик. Образование дуги и ограничение тока в цепи за счет введения в цепь сопротивления дуги начинается при расстоянии между контактами 1—1,5 мм. Для уменьшения оплавления контактов и ускорения разрыва металлического мостика в месте расположения контактов создается мощное магнитное поле.

С целью получения малого собственного времени необходимо максимально сократить время от момента достижения током значения $I_{ср}$ до момента расхождения контактов. В связи с этим в быстродействующих автоматах обычно не применяются защелочные механизмы и электромагнитные расцепители с якорем, имеющим значительный свободный ход. Стремятся либо непосредственно (жестко) связать якорь электромагнитного элемента с контактом, либо максимально упростить эти связи.

По способу разгона контактов при отключении быстродействующие автоматы разделяются на автоматы с пружинным, магнитно-пружинным, электромагнитным и электродинамическим отключением.

В зависимости от того, какие цепи защищают автоматы, они делятся на линейные, катодные и анодные. Из всех серий быстродействующих автоматов наиболее универсальной является серия ВАБ-28, которая выпускается на номинальные токи от 1500 до 6000 А и номинальные напряжения от 825 до 3300 В.

Электромагнитный механизм выключателей ВАБ-28, схематично изображенный на рис. 18-6, состоит из электромагнита 1 с удерживающей катушкой 2 и якоря 3. Последний может поворачиваться вокруг оси O_1 из положения «включено» в положение «отключено» до упора 4.

В положении «включено» якорь 3 удерживается силами электромагнитного притяжения, которые создаются постоянным током, обтекающим катушку 2. При этом отключающая пружина 5 и контактная пружина 6 растянуты. Ток защищаемой цепи проходит по шине А, катушке магнитного дутья 8, подвижному контакту 7 и шине Б.

Отключение катодного выключателя при обратном зажигании ртутных вентилях происходит следующим образом. Резкое падение тока в главной цепи, вызванное изменением знака тока, создает в сердечнике 11 уменьшающийся магнитный поток, который наводит э. д. с. в обмотке 12. Последняя присоединена к обмотке 13, витки которой проходят сквозь отверстия в магнитопроводе 1. Магнитный поток обмотки 13 насыщает участки магнитопровода, что приводит к резкому увеличению магнитного сопротивления на пути основного потока. При некотором значении потока обмотки 13 си-

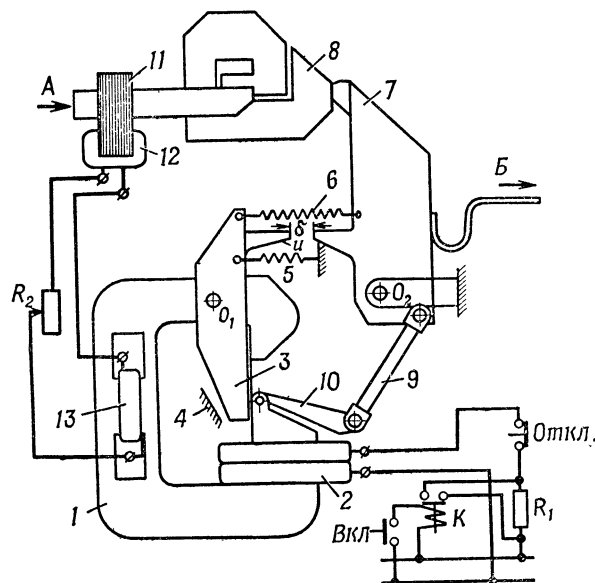


Рис. 18-6. Механизм автомата ВАБ-28.

ла притяжения якоря уменьшится настолько, что он начнет движение под действием пружин 5 и 6. Большая скорость при размыкании подвижного контакта достигается благодаря тому, что кинетическая энергия якоря 3, полученная им при разгоне, после выбора зазора δ ударом передается контакту 7.

В процессе включения якорь свободного расцепления 10 притягивается к скошенному полюсу электромагнита. Включение выключателя возможно, если в удерживающей обмотке 2 резко увеличить ток, что осуществляется контактором K , который шунтирует добавочный резистор R_1 , форсируя питание обмотки 2. При этом якорь 3 притянется, растянув пружины 5 и 6. Подвижный контакт 7, однако, не может сдвинуться с места, так как его удерживает тяга 9, соединенная с якорем свободного расцепления 10. Замыкание контактов произойдет только после снятия форсировки, когда уменьшится сила притяжения якоря свободного расцепления 10.

Отключение линейных выключателей производится за счет разрыва цепи удерживающей катушки, который осуществляется размыкающими контактами специального реле (индуктивный дифференциальный шунт) типа РДШ. Общий вид его дан на рис. 18-7. Токосоведущая шина 8 разделена на две параллельные ветви неравного сечения. Токи этих ветвей создают противоположно направленные м. д. с. в магнитопроводе 7. При возрастании тока распределение его по ветвям определяется не только активным, но и индуктивным сопротивлением ветвей. Последнее для нижней ветви меньшего сечения много больше, так как на этой ветви насажены пакеты листовой стали 9. Индуктивное сопротивление ветви меньшего сечения таково, что при своем резком возрастании ток практически полностью проходит по ветви большего сечения. Таким образом, поток в магнитопроводе 7 резко возрастает и якорь 6 притягивается к полюсу, размыкая контакты 1.

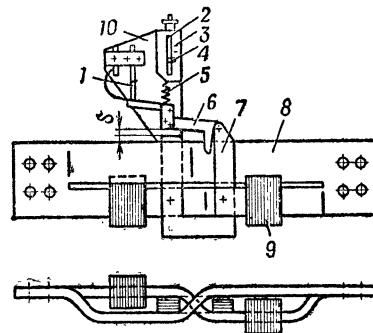


Рис. 18-7. Реле типа РДШ.

Чем больше скорость нарастания тока, тем быстрее срабатывает реле, поэтому оно срабатывает значительно раньше, чем ток достигнет величины статической уставки.

Изменяя натяжение пружины 5 винтом 2, можно регулировать ток статической уставки реле, которая указывается стрелкой 4 на шкале 3.

Контактная система выключателей ВАБ-28 вдвоенная: имеются основные и дугогасительные контакты.

Гашение дуги осуществляется в продольно-щелевой камере из асбестоцемента, имеющей три параллельные щели.

Кроме серии ВАБ-28, в СССР выпускается еще несколько серий быстродействующих автоматов, подробное описание которых можно отыскать в [Л. 18-2].

Глава девятнадцатая

ВЫКЛЮЧАТЕЛИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ВЫСОКОГО НАПЯЖЕНИЯ

19-1. Общие сведения

а) **Назначение, основные параметры.** Выключатель высокого напряжения предназначен для коммутации цепей переменного тока с напряжением 3 кВ и выше во всех режимах, возможных в эксплуатации: включение и отключение номинальных токов, токов короткого замыкания, токов холостого хода силовых трансформаторов и

емкостных токов конденсаторных батарей и длинных линий.

Основные параметры выключателей: номинальное напряжение, номинальный (длительный) ток, номинальный ток термической стойкости, номинальный ток электродинамической стойкости, номинальный ток отключения, номинальная мощность отключения, номинальный ток включения, собственное время включения и отключения выключателя, полное время включения и отключения.

Первые четыре параметра ничем не отличаются от аналогичных параметров других аппаратов, включенных последовательно в рабочую цепь (§ 1-8, 2-4, 2-6).

Наиболее тяжелым режимом для выключателя является отключение и включение токов короткого замыкания.

б) Процесс отключения. Номинальный ток и номинальная мощность отключения. Циклы работы. При отключении выключателя между его контактами загорается дуга. Токи короткого замыкания в современных цепях высокого напряжения достигают значения нескольких десятков и даже сотен килоампер.

Процесс гашения дуги в высоковольтных выключателях связан с большими трудностями из-за большой величины возвращающегося напряжения промышленной частоты и высокой скорости восстановления напряжения (§ 4-6).

Одним из основных параметров, характеризующих выключатель, является номинальный ток отключения — наибольший ток, который выключатель способен надежно отключить при возвращающемся напряжении между фазами, равном номинальному напряжению сети (при заданных условиях восстановления напряжения на контактах выключателя).

В большинстве случаев причина, вызывающая короткие замыкания, носит временный характер. Например, в результате перенапряжений произошло перекрытие изолятора на землю и возникло короткое замыкание. Возникающая дуга быстро растягивается электродинамическими силами. После отключения цепи выключателем происходит деионизация дугового промежутка и восстановление его электрической прочности за счет охлаждения столба дуги восходящими потоками воздуха и перемещения дуги в пространстве.

Так как фарфоровая изоляция при этом остается неповрежденной, то при новом включении удастся возобновить подачу энергии потребителю. Этот процесс называется автоматическим повторным включением (АПВ). Применение АПВ позволяет повысить надежность энергоснабжения.

Время с момента отключения до нового включения должно быть достаточно малым для того, чтобы обеспечить непрерывную работу установок потребителя.

С другой стороны, это время должно быть достаточным для деионизации пробитого промежутка. Время деионизации составляет примерно 0,1—0,5 с и зависит от напряжения системы.

Возможны случаи, когда к моменту повторного включения короткое замыкание в цепи не исчезает, тогда выключатель включается на существующее короткое замыкание, после чего следует вновь отключение короткого замыкания.

В ряде выключателей, например масляных, отключение второго короткого замыкания происходит в более тяжелых условиях, так как после первого отключения и включения выключателя на существующее короткое замыкание дугогасительное устройство может быть только частично заполнено маслом, что ухудшает процесс отключения второго короткого замыкания. Поэтому номинальный ток отключения связан также с циклом работы выключателя (без АПВ, с одно- или двукратным АПВ и т. д.).

Согласно ГОСТ 687-70 мощные выключатели с быстродействующим АПВ без ревизии должны отключать номинальный ток отключения в двух коммутационных циклах $O-t-BO$, следующих друг за другом с паузой не менее 15 мин. Цикл $O-t-BO$ означает, что выключатель сначала отключает короткое замыкание. Затем без выдержки времени происходит подача сигнала на включение аппарата. После замыкания цепи следует повторное отключение.

Для выключателей, не предназначенных для АПВ, ГОСТ 687-70 [Л. 19-1] рекомендует в качестве стандартного цикла $O-180-BO$. Цифра 180 говорит о том, что между отключением и последующим включением аппарата делается выдержка времени 180 с.

Действующее значение тока короткого замыкания не остается постоянным из-за изменения периодической и

апериодической составляющих. Типичная кривая тока приведена на рис. 19-1.

Начальное значение апериодической слагающей зависит от момента начала короткого замыкания и может изменяться от нуля до амплитуды периодической составляющей. Скорость спада определяется постоянной времени цепи. Чем больше мощность установки, тем меньше активное сопротивление цепи и больше постоянная времени.

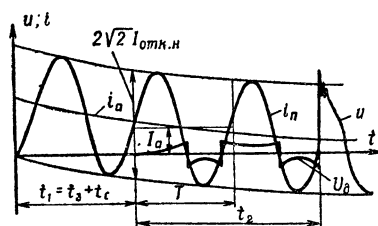


Рис. 19-1. Изменение тока короткого замыкания во времени.

Контакты выключателя расходятся спустя время t_1 после начала короткого замыкания. Это время представляется в виде суммы

$$t_1 = t_3 + t_c,$$

где t_3 — время действия релейной защиты;

t_c — собственное время выключателя (время с момента подачи напряжения на электромагнит отключения до начала расхождения контактов).

К моменту времени t_1 уменьшается как периодическая, так и апериодическая составляющие тока.

Согласно ГОСТ 687-70 под номинальным током отключения $I_{отк.н}$ понимается действующее значение периодической составляющей тока в момент расхождения контактов. Этот ток указывается на щитке выключателя.

Выключатель обязан отключить цепь и при наличии апериодической составляющей, которая может быть к моменту расхождения контактов, при условии, что начальное значение апериодической составляющей равно амплитуде периодической составляющей, а постоянная времени спада апериодической составляющей $T_a = 0,05$ с.

С апериодической составляющей необходимо считаться у быстродействующих выключателей, когда $t_1 < 0,1$ с и постоянная времени спада апериодической слагающей $T_a \geq 0,05$ с. Вопрос влияния апериодической составляющей на работу выключателя рассмотрен в [Л. 19-2].

Номинальная мощность отключения, МВ·А, трехфазного выключателя равна:

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

Понятие этой мощности условно. Когда по выключателю протекает ток $I_{\text{отк.н}}$, то напряжение на зажимах аппарата практически равно напряжению на дуге и составляет лишь несколько процентов от напряжения сети (исключением являются магнитные выключатели, у которых велико напряжение на дуге).

После того как дуга погасла, на контактах аппарата восстанавливается напряжение, но в это время в цепи ток равен нулю. Таким образом, $U_{\text{н}}$ и $I_{\text{отк.н}}$ действуют на выключатель в разное время. Однако $S_{\text{отк}}$ учитывает нагрузку выключателя двумя основными факторами — током отключения, когда дуга горит в выключателе и он подвергается большому тепловому и динамическим нагрузкам, и напряжением, восстанавливающимся на зажимах выключателя, которое стремится зажечь дугу вновь. По существу $S_{\text{отк}}$ есть мощность, близкая к мощности короткого замыкания сети, в которой установлен выключатель.

Сохранность энергетического оборудования, бесперебойное энергоснабжение, динамическая устойчивость параллельно работающих систем требуют, чтобы длительность коротких замыканий была возможно меньшей и ограничивалась временем 0,05—0,1 с. Поэтому все выключатели снабжаются дугогасительными устройствами, обеспечивающими гашение дуги в ограниченном объеме за время несколько сотых секунды.

Время отключения выключателя — это время от подачи команды на отключение до момента погасания дуги во всех полюсах. Оно состоит из собственного времени отключения (привода и выключателя) t_c и времени дуги.

в) **Процесс включения.** Номинальный ток включения. При включении выключателя на существующее короткое замыкание аппарат подвергается большому механическим, тепловым и электродинамическим нагрузкам (§ 19-4).

Способность выключателя с соответствующим ему приводом включится на существующее короткое замыкание характеризуется номинальным током включения.

Номинальный ток включения — это наибольший ударный ток короткого замыкания, на который выключатель способен включиться без сваривания контактов и других повреждений, препятствующих его дальнейшей нормальной работе. Этот ток определяется либо

амплитудой $i_{уд} = 1,8 \sqrt{2} I_{откл.}$ либо действующим значением ударного тока за период после начала короткого замыкания.

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

г) **Требования к выключателям.** Выключатель является самым ответственным аппаратом в высоковольтной системе, при авариях он всегда должен обеспечивать четкую работу. При отказе выключателя авария развивается, что ведет к тяжелым разрушениям и большим материальным потерям, связанным с недоотпуском электроэнергии, прекращением работы крупных предприятий.

В связи с этим основным требованием к выключателям является особо высокая надежность их работы во всех возможных эксплуатационных режимах. Отключение выключателем любых нагрузок не должно сопровождаться перенапряжениями, опасными для изоляции элементов установки.

В связи с тем, что режим короткого замыкания для системы является наиболее тяжелым, выключатель должен обеспечивать отключение цепи за минимально возможное время.

В связи с ростом мощности в единице оборудования (генераторах, трансформаторах) растет частота собственных колебаний цепи, а следовательно, и скорость восстановления напряжения.

Выключатель должен обеспечивать надежное отключение цепи при условиях восстановления напряжения, определяемых ГОСТ 687-70.

Вывод выключателя для ревизии и ремонта связан с большими трудностями, так как приходится либо переходить на другую схему расщеплительного устройства, либо просто отключать потребителей.

В связи с этим выключатель должен допускать возможно большее число отключений коротких замыканий без ревизии и ремонта. Современные выключатели могут отключать без ревизии до 10 коротких замыканий при номинальной мощности отключения.

Отключение выключателем короткого замыкания не должно сопровождаться выбросом из него пламени раскаленных газов, которые могут привести к перекрытию изоляции в распределительном устройстве.

д) **Классификация выключателей.** Классификация может проводиться по различным признакам: по методу гашения дуги, по виду изоляции токоведущих частей между собой и на землю, по принципам, заложенным в конструкцию дугогасительного устройства.

В масляных выключателях дуга, образующаяся между контактами, горит в трансформаторном масле. Под действием энергии, выделяющейся в дуге, масло разлагается и образующиеся газы и пары используются для ее гашения.

В зависимости от способа изоляции токоведущих частей аппарата различают баковые выключатели и маломасляные.

В первых изоляция токоведущих частей между собой и от земли осуществляется с помощью масла. Это масло располагается в стальном баке, соединенном с землей (рис. 19-2).

В маломасляном выключателе изоляция токоведущих частей от земли и между собой производится с помощью твердых диэлектриков и масла (§19-3).

В воздушном выключателе в качестве гасящей среды используется сжатый воздух, находящийся в баке под давлением 1—5 МПа.

При отключении сжатый воздух из бака подается в дугогасительное устройство. Дуга, образующаяся в камере, обдувается интенсивным потоком воздуха, выходящим в атмосферу.

Изоляция токоведущих частей между собой осуществляется с помощью твердых диэлектриков и воздуха (сжатого или при атмосферном давлении).

Принципы действия газового выключателя и воздушного мало различаются, но в качестве гасящей среды используется специальный газ (шестифтористая сера).

Электромагнитные выключатели по своему принципу сходны с контактором постоянного тока с лабиринтно-щелевой камерой (рис. 10-5). Гашение дуги происходит за счет увеличения сопротивления дуги вследствие ее интенсивного удлинения и охлаждения.

В вакуумных выключателях контакты расходятся под вакуумом (давление равно 10^{-4} Па). Возникающая при расхождении контактов дуга быстро гаснет благодаря интенсивной диффузии зарядов в вакууме.

19-2. Баковые масляные выключатели

Общая компоновка бакового выключателя представлена на рис. 19-2. В стальном баке 1 на маслonaполненных вводах 8 расположены дугогасительные устройства (камеры) 6. Траверса 4 переключает внешние контакты камер.

Горячие и ионизированные выхлопные газы, выходящие из камер, могут вызвать перекрытие с камер на бак. Для предотвращения этого явления имеется баковая изоляция 3.

Перемещение траверсы 4 происходит под действием штанги 5, движущейся по направляющим 7 под действием пружин механизма и пружин камер.

На выключателе установлены магнитопроводы 9 со вторичными обмотками трансформаторов тока (в данном случае их четыре). Первичной обмоткой трансформаторов являются токоведущие стержни вводов 8.

Для сохранения вязкости трансформаторного масла при низких температурах предусмотрен электрический подогрев масла устройством 2.

Вводы имеют изоляцию конденсаторного типа, что позволяет легко измерять напряжение на линии (§ 24-3).

Дугогасительное устройство выключателя показано на рис. 19-3. В прочном стеклоэпоксидном цилиндре 3 расположены неподвижные контакты 4 и 5. Неподвижные контакты 4 и 5 выполнены в виде многоламельного торцевого контакта. Промежуточный контакт 9 сделан в виде сквозной розетки. Для уменьшения износа контакты облицованы металлокерамикой. Камера имеет два разрыва. Первый образуется между контактом 4 и промежуточным контактом 7, второй — между контактом 5 и контактом 6. Дугогасительная решетка 8 имеет два следующих друг за другом дутьевых канала 1, 2. Во включенном положении эти каналы перекрыты телом подвижных контактов 7 и 6. Вся внутренняя полость камеры заполнена трансформаторным маслом. При отключении контакты движутся вниз под действием пружины камеры. В каждом разрыве образуется дуга. Под действием энергии дуги масло разлагается на водород, метан и другие газы. В течение сотой доли секунды давление возрастает до 5—8 МПа. После того как тело подвижного контакта откроет дутьевую щель 1, при прохождении тока через нуль за счет давления в камере

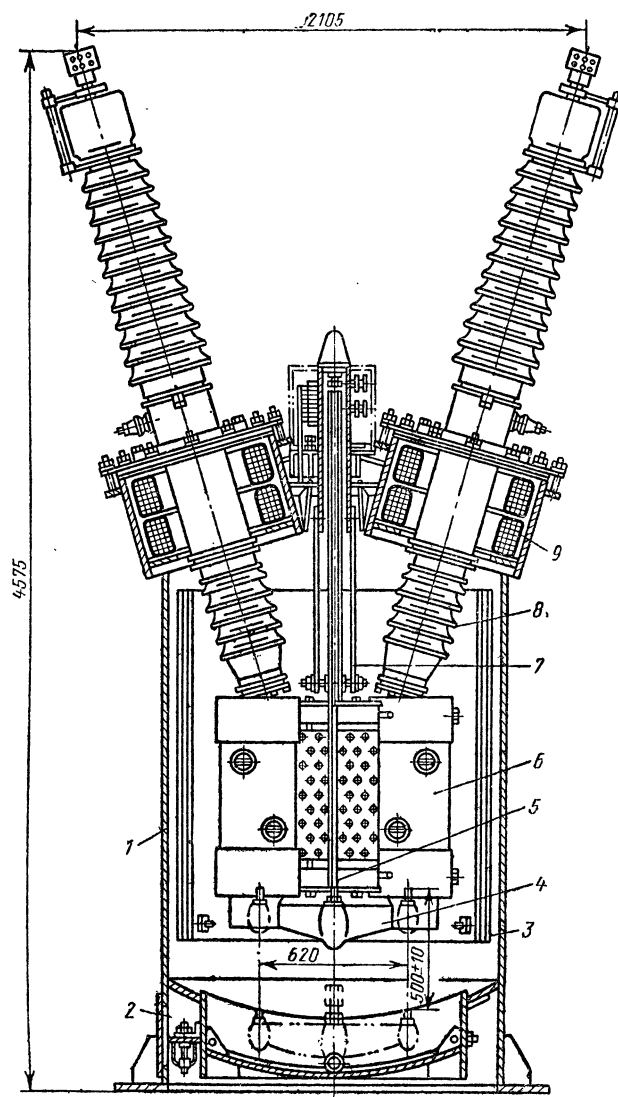


Рис. 19-2. Баковый масляный выключатель, $U_n=110$ кВ, $I_n=2000$ А,
 $I_{ном.отк}=38,2$ кА, $P_n=8000$ МВ·А.

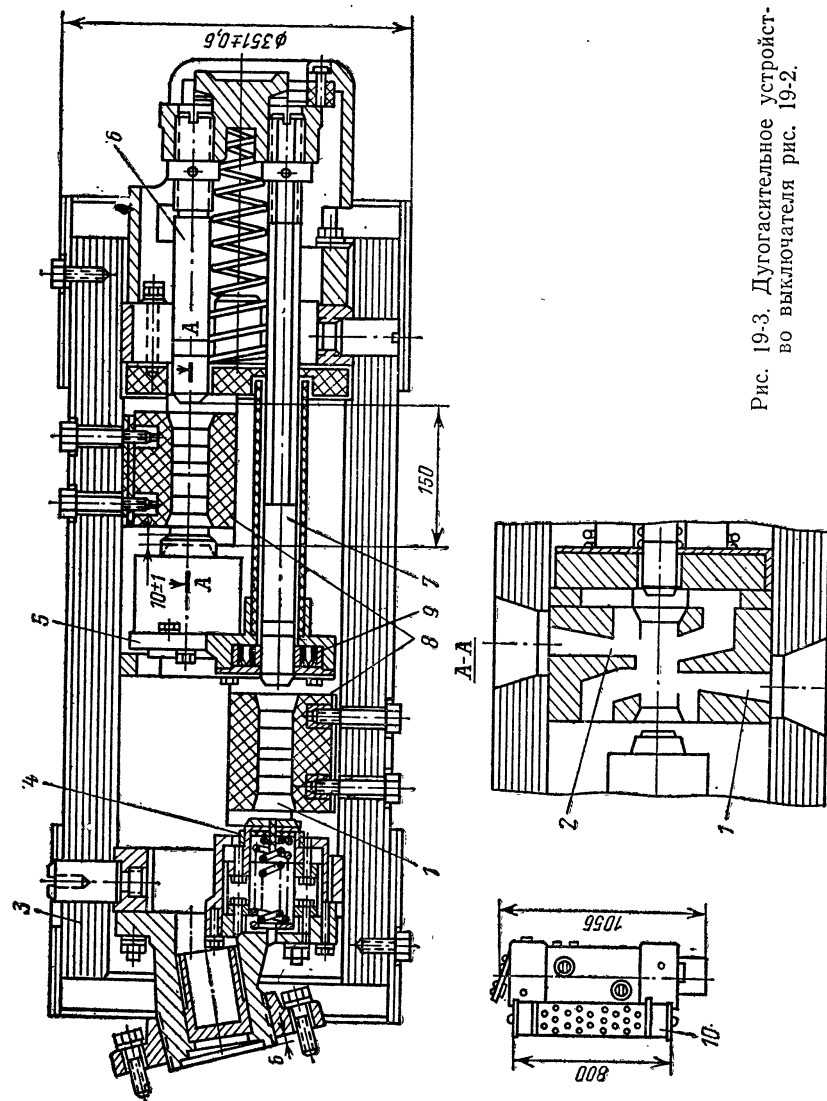


Рис. 19-3. Дугогасительное устройство выключателя рис. 19-2.

создается мощный поток газов и паров масла, охлаждающих и деионизирующих дугу. Следует отметить, что энергия, необходимая для гашения, выделяется самой дугой. Поэтому чем больше ток, тем больше давление в камере и интенсивнее гашение дуги. При токах, близких к номинальному току отключения, длительность дуги не более 0,02 с. Наибольшая длительность горения дуги наблюдается при небольших индуктивных токах (500—2000 А). Для обеспечения надежной работы камеры во всем возможном диапазоне токов предусмотрена вторая дутьевая щель 2. Выравнивание распределения напряжения между камерами и облегчение отключения емкостных токов обеспечивается шунтами 10 по 750 Ом каждый. Отключение тока шунта производится двумя разрывами образующимися между внешними контактами камер и траверсой. В настоящее время баковые выключатели выпускаются на напряжение 35—220 кВ. Наибольшая мощность отключения 25 000 МВ·А.

Обычно бак выключателя заполняется маслом не полностью, а примерно на $\frac{2}{3}$ объема. При отключении газ, выбрасываемый из камеры, заставляет слои масла, лежащие над камерами, двигаться с большой скоростью вверх. Воздух, находящийся над маслом, может свободно выходить в атмосферу.

Таким образом удастся ограничить давление в баке. После окончания отключения масло, двигаясь по инерции, ударяет в крышку выключателя. Этот удар может быть столь сильным, что деформируются лапы, крепящие бак выключателя к фундаменту. На эти нагрузки должен рассчитываться фундамент выключателя.

В случаях повреждения механизма выключателя или камер в выключателе образуется длительно горящая «стоячая» дуга, при этом давление в баке может подняться до опасной величины. Для того чтобы предотвратить взрыв бака, сверху расположены аварийные выхлопные трубы с калиброванными мембранами (на рис. 19-2 не показаны). При определенном давлении мембраны разрушаются и из выключателя выливается масло, благодаря чему давление в баке снижается до безопасных пределов. Взрыв бака является тяжелой аварией, так как масло, выливающееся из бака, может воспламениться и вызвать пожар в распределительном устройстве.

Баковый тип выключателя является старейшим. На протяжении многих десятков лет его конструкция улуч-

шалась в направлении уменьшения массы, объема, увеличения отключающей способности. Основными достоинствами этих выключателей являются высокая надежность аппарата, простота конструкции камер и механизма, высокая механическая прочность элементов (камер, бака, механизма, вводов), что позволяет использовать эти аппараты в самых тяжелых условиях эксплуатации (при низких температурах необходим подогрев масла для уменьшения его вязкости). Гасящая среда — масло всегда имеется в наличии. По данным отечественной статистики надежность баковых выключателей выше надежности воздушных и маломасляных выключателей. Большим достоинством является возможность встраивания трансформаторов тока и емкостных делителей напряжения.

Кроме того, простота конструкции не требует высокой квалификации обслуживающего персонала и сложного оборудования.

При напряжениях до 220 кВ баковый выключатель по своим параметрам не уступает воздушным выключателям.

К недостаткам выключателя следует отнести: большие размеры и массу, необходимость периодической очистки масла, что требует наличия масляного хозяйства; ремонт и ревизия выключателя с напряжением 110 кВ и выше являются весьма сложным и трудоемким делом.

Большим недостатком является взрыво- и пожароопасность выключателя.

19-3. Маломасляные выключатели

В маломасляном выключателе с целью уменьшения габаритов и массы изоляция в основном осуществляется твердыми материалами.

На рис. 19-4 представлен общий вид широко распространенного у нас в Союзе малообъемного выключателя ВМП-10 (выключатель масляный подвесного типа). Этот выключатель предназначен для работы при номинальном напряжении 10 кВ. Номинальный ток в зависимости от контактной системы изменяется от 600 до 1500 А.

Номинальный ток отключения выключателя равен 20 кА при напряжении 10 кВ (номинальная мощность 350 МВ·А). Полное время отключения порядка 0,12—0,13 с при номинальной мощности. В настоящее время

номинальный ток этой серии увеличен до 3200 А, а мощность отключения до 500 МВ·А.

Контактная система, дугогасительное устройство (ДУ) и устройство, превращающее вращательное движение рычагов в поступательное движение контактов, смонтированы в виде единого блока полюса 1. Этот блок с помощью опорных изоляторов 2 крепится к стальной раме

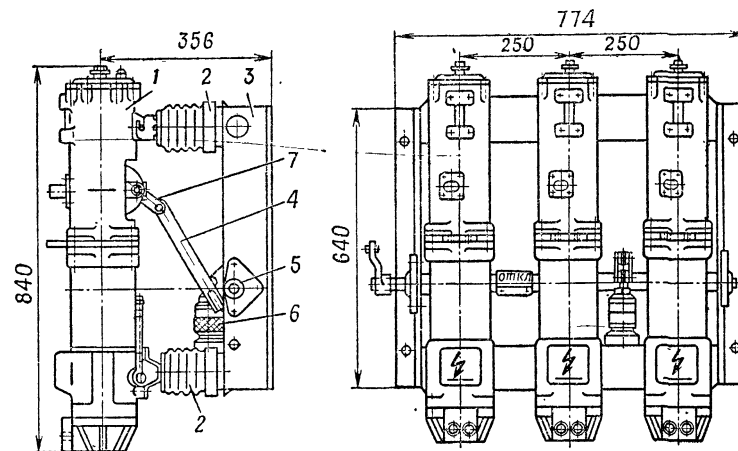


Рис. 19-4. Маломасляный выключатель ВМП-10, $U_n=10$ кВ, $I_n=600$ А, $I_{ном.отк}=20$ кА, $P_n=350$ МВ·А.

3. В этой раме установлены вал выключателя 5, отключающая пружина, пружинный буфер включения и масляный буфер отключения 6. Вал выключателя 5 связан с выходным рычагом механизма полюса 7 с помощью прочной изоляционной тяги 4.

При включении изоляционная тяга 4 поворачивает выходной рычаг полюса 7 против часовой стрелки и производит замыкание контактов. Отключающая пружина при этом растягивается, а пружинный буфер включения сжимается. Этот буфер развивает большую силу на небольшом ходе (соответствующем ходу подвижного контакта в розетке) и создает необходимую для гашения дуги скорость.

Разрез нижней части блока полюса выключателя представлен на рис. 19-5.

Для уменьшения обгорания концы ламелей розеточного контакта 1, подвергающиеся воздействию дуги, облицо-

ваны металлокерамикой (§ 3-3). Нижняя головка 2 имеет съемную крышку 3, на которой и укреплен розеточный контакт 1.

При ревизиях и ремонтах съемная крышка 3 вынимается вместе с розеточным контактом 1. Нижняя головка 2 связывается с верхней головкой стеклоэпоксидным цилиндром 4, который является цилиндром ДУ. Выключатель имеет ДУ газового дутья. Оно собирается из пла-

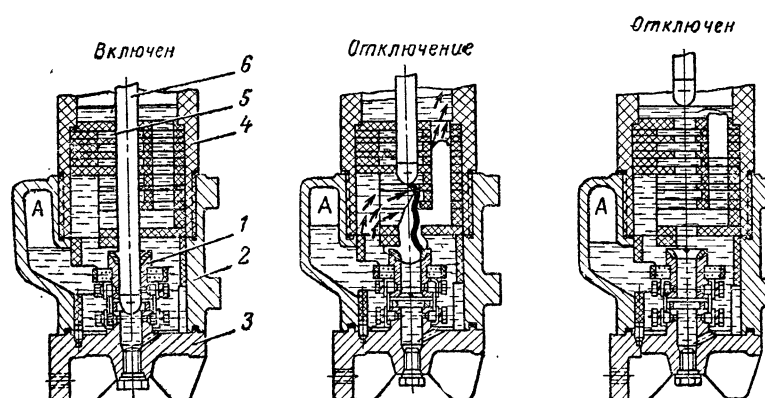


Рис. 19-5. Разрез нижней части полюса выключателя ВМП-10.

стин фибры, гетинакса и электрокартона. В этих пластинах вырезаны отверстия, которые образуют каналы и полости для гашения дуги. Камера имеет три канала — щели для гашения дуги (один из них виден на рис. 19-5). Вначале канал идет горизонтально, а затем вертикально. Все пластины ДУ стягиваются фибровыми или текстолитовыми шпильками.

Для ограничения давления при больших токах и создания необходимого давления вблизи нулевого значения тока камера имеет воздушный буфер А (рис. 19-5). Давление в ДУ достигает наибольшего значения вблизи максимального значения тока. Под действием этого давления масло сжимает воздух в буфере, при этом аккумулируется энергия. Около нуля тока мощность в дуге и давление резко уменьшаются. Энергия, накопленная в буфере, позволяет создать вблизи нуля тока такое давление, которое необходимо для гашения дуги.

При расхождении контактов между ними возникает электрическая дуга. Под действием дуги масло разлагается и образующиеся газы создают в камере давление. В тот момент, когда тело подвижного контакта 6 (свеча) откроет первую щель, возникает газовое дутье и при про-

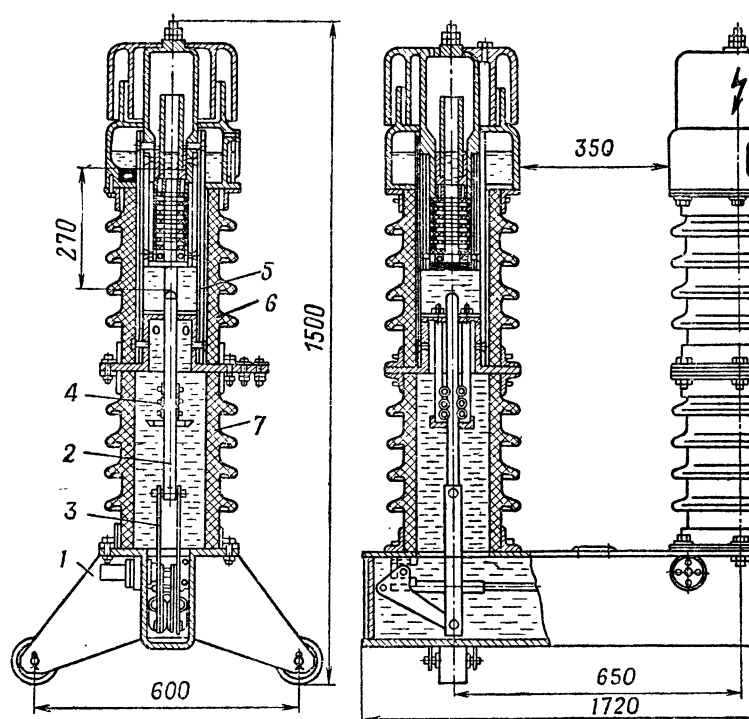


Рис. 19-6. Маломасляный выключатель ВМК-35, $U_n=35$ кВ, $I_n=1000$ А, $I_{ном.отк}=16,4$ кА, $P_n=1000$ МВ·А.

хождении тока через нуль возможно гашение дуги. Обдув дуги газами еще более усиливается после открытия свечей второго и третьего каналов. Обычно гашение дуги с большим током происходит после открытия первых двух щелей.

При отключении малых токов в камере развивается небольшое давление, и поэтому дуга не гаснет после открытия всех трех щелей, а затягивается в масляные карманы 5, расположенные в верхней части ДУ.

Газы, образующиеся в процессе гашения, выходят через зигзагообразный канал в верхней головке полюса. Для того чтобы избежать выброса масла из полюса, в его верхней части установлен специальный маслоотделитель.

Для выключателей 35 и 110 кВ и мощностью 1000 — 5000 МВ·А применяется выключатель колонкового типа (ВМК) с одним разрывом на полюс конструкции ВЭИ. Разрез полюса выключателя на напряжение 35 кВ дан на рис. 19-6.

На раме 1 в виде колонки смонтированы два полых фарфоровых изолятора 6 и 7, внутри которых размещена дугогасительная камера.

Подвижный контакт 2 выполнен в виде медного стержня (свечи). Электрическое соединение свечи с зажимом выключателя осуществляется роликовым токосъемом 4. С механизмом привода свеча связана через изоляционные тяги 3. Неподвижный контакт розеточного типа.

Дугогасительная камера представляет собой цилиндр, внутри которого располагаются на небольшом расстоянии гетинаксовые диски с отверстием для свечи. Между этими перегородками образуются масляные карманы.

При расхождении контактов между ними возникает дуга. Газы, образующиеся под воздействием дуги, прорываясь из одного кармана в другой, создают продольное дутье, в результате чего дуга гаснет.

Наличие перегородок способствует сохранению масла в камере и улучшает контакт масла с дугой, что позволяет получить интенсивное газообразование и охлаждение дуги. Чем больше номинальное напряжение выключателя, тем больше длина дуги, при которой она гаснет, тем больше должна быть длина камеры.

Для разгрузки фарфора от давления, которое может достигать 4—5 МПа, камера размещается внутри толстого изоляционного цилиндра 5.

При напряжении 220 кВ и выше целесообразно применение нескольких разрывов, соединенных последовательно. В настоящее время маломасляные выключатели с такой компоновкой строятся на напряжение до 500 кВ.

Маломасляные выключатели обладают следующими преимуществами:

1. Малая масса, небольшие размеры, малая масса масла.

2. Дугогасительное устройство всегда готово к работе. Нет зависимости от наличия сжатого воздуха, как это имеет место у воздушных выключателей.

3. Удобство эксплуатации. Осмотр и ремонт дугогасительных камер и контактов возможен без слива масла (ВМК-35, ВМК-110, ВМК-220).

4. Путем применения унифицированных узлов выключатель довольно легко можно выполнить на высокие и сверхвысокие напряжения.

Однако эти выключатели имеют и недостатки.

1. Они менее надежны в работе, чем баковые. Изоляционные детали — рубашки, опорная изоляция — подвергаются повышенным механическим нагрузкам. Мощность маломасляных выключателей по этой же причине пока ниже, чем у баковых.

2. Маломасляные выключатели, как правило, не допускают установки встроенных трансформаторов тока.

3. В эксплуатации при низких температурах, которые встречаются у нас в Союзе, трудно обеспечить подогрев масла для поддержания его вязкости.

Благодаря своим преимуществам маломасляные выключатели найдут самое широкое распространение в установках до 35 кВ.

При напряжениях 35—220 кВ и для больших мощностей отключения баковые выключатели более предпочтительны.

При напряжениях выше 330 кВ преимущества имеют маломасляные выключатели.

19-4. Приводы масляных выключателей

а) **Механизм выключателей.** Общие требования к механизму аппаратов, силы действующие при отключении и включении, рассмотрены в гл. 8. Остановимся на особенностях механизма масляных выключателей. Для того чтобы обеспечить нормальные условия работы дугогасительных устройств, подвижный контакт выключателя должен обладать определенной скоростью (1,5—10 м/с).

Как правило, контакты аппарата имеют поступательное движение, в то время как звенья, передающие усилия контактам от пружин или привода, имеют вращательное движение.

Механизм, который служит для преобразования вращательного движения в поступательное, называется **п р я м и л о м**.

Типичный механизм с **п р и б л и ж е н н ы м п р я м и л о м**, широко применяемый в баковых выключателях, показан на рис. 19-7.

Отключающая пружина обычно устанавливается на каждом по-

люсе и действует на тягу B_0C_0 , стремясь переместить ее слева направо.

Во включенном положении четырехзвенник $A_1C_2B_2A_2$ находится в положении, близком к мертвому.

Использование мертвого положения механизма облегчает работу привода при включении на короткое замыкание, когда в токоведущем контуре действуют электродинамические силы. Кроме того, облегчается регулировка выключателя, так как малому ходу контактов в конце включения соответствует большой ход приводной штанги B_0C_0 . Вопрос о механизме выключателя подробно рассмотрен в [Л. 8-1, 7-2].

б) Приводы масляных выключателей. Общие требования, предъявляемые к приводу, изложены в гл. 8.

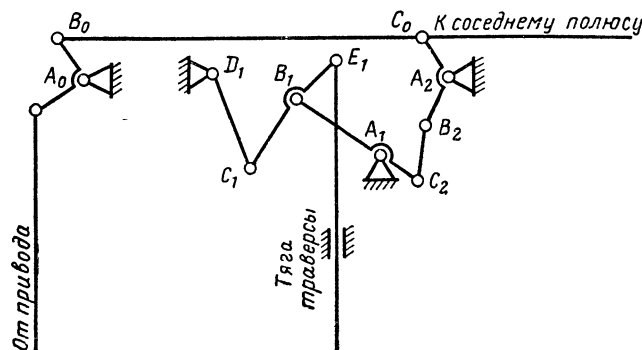


Рис. 19-7. Механизм бакового масляного выключателя.

Здесь остановимся на особенностях условий работы привода масляных выключателей на напряжение 110 кВ и выше. При включении на существующее короткое замыкание дуга загорается до смыкания контактов и существует до момента их соединения. При этом контактные поверхности могут быть частично расплавлены, что при их замыкании ведет к свариванию контактов. Кроме того, возникновение дуги в дугогасительном устройстве при включении вызывает разложение и испарение масла. Это может привести к отказу в гашении дуги в процессе последующего отключения. Возникновение дуги при включении создает давление газа внутри дугогасительного устройства, которое может тормозить движение контакта, снижает скорость на самом ответственном участке пути. Как показывают экспериментальные исследования, длительность горения дуги при включении не должна превышать 0,005 с.

Выбор привода и проверка его работоспособности должны проводиться для самых тяжелых условий эксплуатации. Так, для электромагнитных приводов в качестве расчетного берется случай включения на короткое замыкание при пониженном напряжении на катушке привода при максимальной температуре окружающей среды (сопротивление обмотки электромагнита наибольшее).

В настоящее время получили применение следующие приводы: ручной, электромагнитный, пружинный, пневматический, пневмогидравлический.

в) **Ручные приводы.** При ручном приводе включение производится за счет мускульной силы человека; уменьшение усилия, необходимого для включения, достигается применением рычажных систем. Эти приводы применяются только для включения маломощных выключателей 6—10 кВ.

Уменьшение обгорания контактов путем применения облицовки контактов металлокерамикой дает возможность облегчить включение выключателя ручным приводом на существующее короткое замыкание и увеличить ток включения [Л. 3-10].

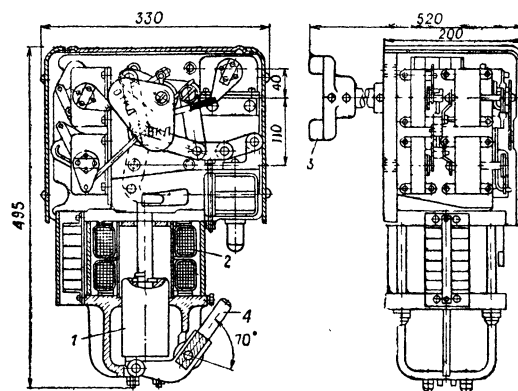


Рис. 19-8. Электромагнитный привод масляного выключателя.

Большим недостатком ручных приводов является невозможность дистанционного включения аппарата.

В связи с широкой автоматизацией подстанций ручные приводы находят все меньшее применение.

г) **Электромагнитные приводы.** На рис. 19-8 представлен электромагнитный привод ПС-10, предназначенный для включения и отключения выключателей, у которых максимальный статический момент на валу не превышает 400 Н·м.

Вал привода через муфту 3 и рычажную передачу соединяется с валом выключателя. Включение выключателя производится броневым электромагнитом постоянного тока с якорем 1 и катушкой 2.

При наладке выключателя и привода ручное включение производится с помощью рычага 4.

Применение броневого электромагнита позволяет получить большой ход якоря, большую силу тяги в конце хода и достаточные силы в начале хода.

На рис. 19-9 изображена серия положений механизма привода, позволяющих пояснить его работу. Вал привода 1 связан с валом выключателя. Звено 11 опирается на болт 8. Этот упор регулируется так, что звенья 10 и 11 находятся в положении, «заваленном» за мертвую точку. В результате центр O_1 является неподвижным, так как силы, действующие на этот центр, будут прижимать звено 11 к упору 8.

При подаче напряжения на включающий электромагнит шток 6 давит на ролик 5 и поворачивает рычаг 2 и звенья 3 и 7 в положения, указанные на рис. 19-9, б и в. При этом звено 12 и центр O_1 остаются неподвижными.

Во включенном положении (рис. 19-9, г) ось O_2 опирается на защелку 4. Почти весь момент, развиваемый пружинами выключателя, уравнивается реакцией защелки 4, действующей на ось O_2 . Лишь небольшое усилие передается на центр O_1 .

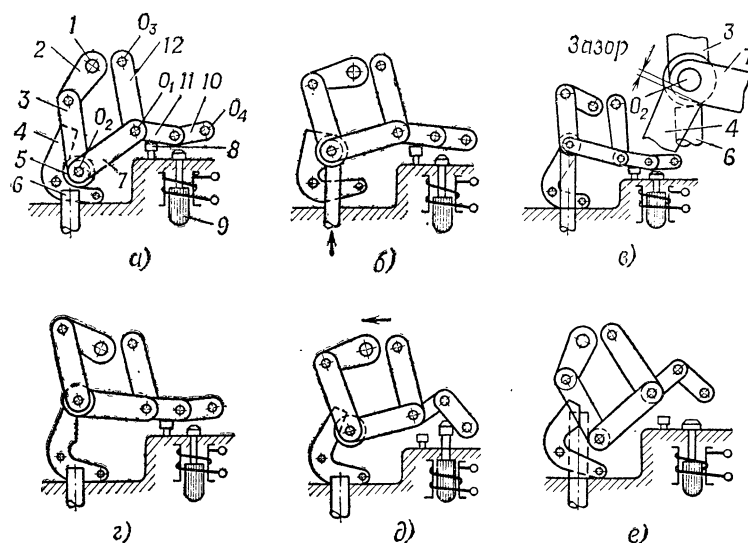


Рис. 19-9. Работа механизма свободного расцепления.

При подаче напряжения на электромагнит отключения 9 его шток выводит звенья 10 и 11 из положения, «заваленного» за мертвую точку, и центр O_1 становится подвижным — механизм получает вторую степень свободы. Под действием пружин выключателя ось O_2 соскальзывает с защелки 4 и происходит отключение выключателя (рис. 19-9, д). В конце отключения все рычаги с помощью специальных пружин возвращаются в положение, показанное на рис. 19-9, а.

Механизм позволяет произвести отключение выключателя не только при полностью включенном положении, но и при практически любом промежуточном положении при включении. Для уменьшения габаритов электромагнитов в обмотках берется высокая плотность тока (50 А/мм^2). В связи с этим электрическая схема управления должна автоматически отключать электромагниты в конце операций включения и отключения [Л.19-4].

При включении выключателя оператором на существующее короткое замыкание привод должен включить выключатель только 1 раз, так как следующие друг за другом включения не позволяют

ДУ выключателя подготовиться к отключению тока короткого замыкания. Поэтому предусматривается блокирование против многократного включения. В приводе ПС-10 применяется механическая блокировка.

Если после выключения остается поданным сигнал на включение, включающий электромагнит срабатывает. Но в этот момент времени механизм привода не сложился еще для включения: ролик 5 не опирается на шток 6. Поэтому электромагнит включается вхолостую. Этот процесс наглядно показан на рис. 19-9, е.

Привод обеспечивает нормальную работу при напряжении на включающем электромагните в пределах 80—110%, а для отключающего электромагнита — 65—120%.

Положительными качествами этих приводов являются: простота конструкции и эксплуатации, высокая надежность, соответствие характеристик привода и противодействующих сил выключателя. Недостатками этих приводов являются большое время включения мощных выключателей (до 1 с), большое потребление тока, необходимость наличия мощных аккумуляторных батарей для питания электромагнитов.

Вследствие указанных выше недостатков электромагнитные приводы следует рекомендовать для выключателей на небольшие мощности.

д) **Пружинные приводы.** В пружинном приводе энергия, необходимая для включения, запасается в мощной пружине, которая заводится либо от руки, либо с помощью двигателя малой мощности (менее 1 кВт).

Особенностью тяговой характеристики этого привода является уменьшение усилия, развиваемого пружинами к концу хода, вследствие уменьшения деформации включающих пружин привода. Для уменьшения этого недостатка пружина соединяется с грузом таким образом, что вначале избыточная энергия, освобождаемая пружинами, идет на разгон груза. К концу хода включения, когда скорость падает, энергия, накопленная в грузе, передается механизму выключателя. Кроме того, применяется специальная рычажная система.

Широкое распространение получил универсальный пружинно-грузовой привод ПП-61 конструкции Рижского завода (рис. 19-10).

Включающие пружины 1 растягиваются с помощью электродвигателя 3, который воздействует на пружины через редуктор 2 и

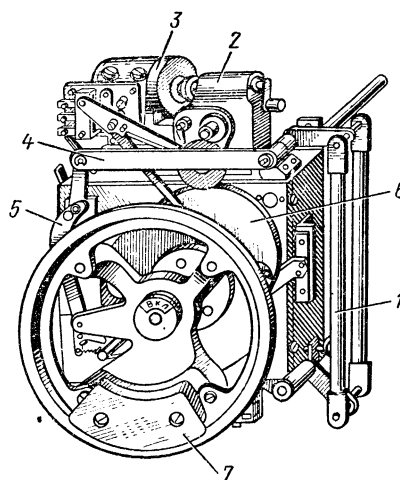


Рис. 19-10. Пружинный привод масляного выключателя.

зубчатую передачу 6. Пружины соединяются с валом привода через систему рычагов 4 и 5, которые позволяют получить необходимый момент, несмотря на то, что силы, развиваемые пружинами, к концу хода уменьшаются.

При взведении привода секторобразный груз 7 поворачивается на 180° и занимает верхнее положение. При включении груз со-

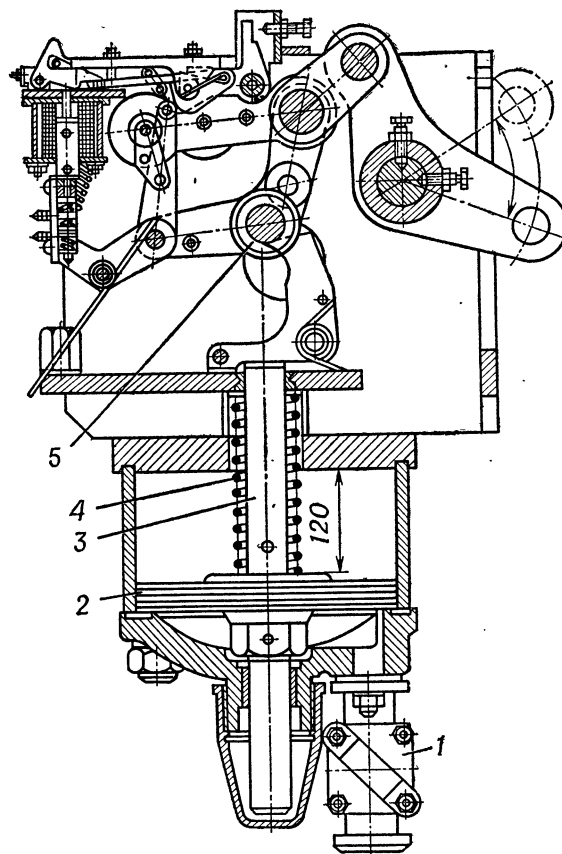


Рис. 19-11. Пневматический привод масляного выключателя.

здает дополнительный вращающий момент, который достигает наибольшего значения после поворота вала примерно на 90° .

Пружинные приводы позволяют осуществить цикл АПВ. После включения выключателя автоматически производится взведение включающих пружин и привод подготавливается ко включению. Время включения такого привода с соответствующим ему выключателем равно 0,2—0,35 с.

Привод снабжен электромагнитными элементами защиты, которые реагируют либо на ток, либо на напряжение. Эти элементы воздействуют на расцепляющее устройство механизма привода.

Пружинный привод не требует мощной аккумуляторной батареи и связанных с ней затрат, что является его преимуществом по сравнению с электромагнитным приводом. По сравнению с пневматическим и гидропневматическим пружинный привод более прост. Здесь отсутствуют резервуары со сжатым воздухом или газом, нет

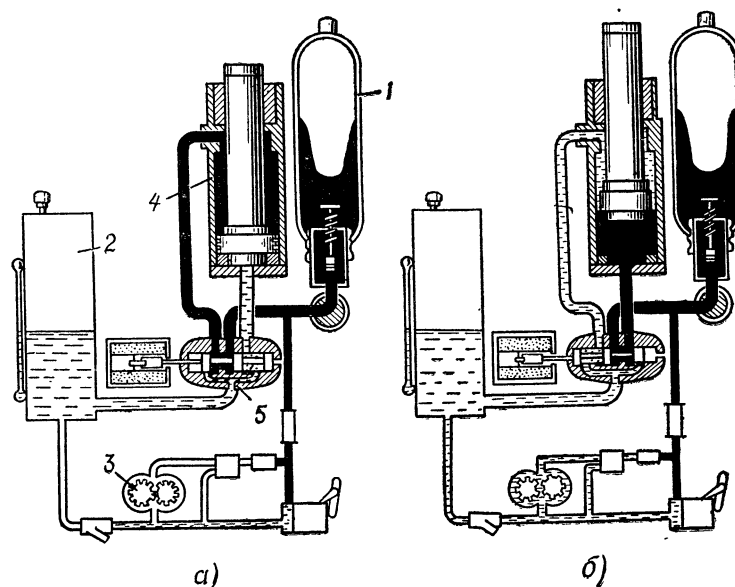


Рис. 19-12. Пневмогидравлический привод.

необходимости в компрессорах. Пружинный привод не нуждается в сложной пневматической и гидравлической системе управления.

Благодаря этим преимуществам следует ожидать широкого распространения пружинных приводов для включения маломасляных выключателей на напряжения вплоть до 500 кВ. Необходимая зависимость тягового усилия от хода контактов может быть получена применением кулачкового механизма и специальных маховиков, позволяющих более полно использовать энергию включающих пружин.

е) **Пневматические приводы.** На рис. 19-11 дан разрез привода, предназначенного для включения мощных баковых выключателей на напряжением 220 кВ.

При открытии клапана 1 сжатый воздух при давлении 0,8—1 МПа поступает к поршню 2. Шток поршня 3, воздействуя на ролик 5, производит включение выключателя. После включения полость под поршнем сообщается с атмосферой и он возвращается в начальное положение под действием пружин 4.

Пневмопривод широко применяется для маломасляных выключателей. Бак со сжатым воздухом и привод органически встраиваются в конструкцию самого выключателя. Питание баков осуществляется от централизованной компрессорной установки.

Пневматический привод имеет целый ряд преимуществ перед электромагнитным: высокое быстродействие (время включения 0,25 с для самых мощных выключателей), отсутствие мощных аккумуляторных батарей, для управления приводом требуются провода малого сечения и др. В настоящее время пневмоприводы начинают использоваться для включения разъединителей и других аппаратов. Для обеспечения надежной работы привода необходима очистка и сушка воздуха [Л.19-6].

ж) **Пневмогидравлический привод** [Л.19-5]. Схема привода представлена на рис. 19-12. Аккумулирование энергии, необходимой для включения, осуществляется за счет сжатия газа, находящегося под большим давлением. Для того чтобы устранить возможность утечки и растворения, газ заключен в эластичный баллон, который в свою очередь размещен в стальном сосуде 1. Обычно в пневмогидравлических приводах используется азот.

При работе насоса 3 масло нагнетается в сосуд 1 и баллон с азотом сжимается. Давление доводится до номинального значения 15 МПа, после чего насос 3 останавливается.

Управление приводом осуществляется с помощью золотникового клапана 5. При левом положении клапана (рис. 19-12, а) масло подается на верхнюю поверхность поршня. Нижняя поверхность поршня сообщается с маслом, находящимся под атмосферным давлением в резервуаре 2. При переходе золотника в правое положение (рис. 19-12, б) масло под давлением будет подано на нижнюю поверхность поршня, поршень переместится вверх, произойдет включение выключателя. Масло из верхней части цилиндра свободно перетекает в резервуар 2.

Привод применяется и в маломасляных выключателях. В этом случае главный цилиндр 4, связанный с контактным механизмом, находится под высоким потенциалом. Управление осуществляется с помощью двух маслопроводов, связывающих главный цилиндр с остальной частью привода. Такая система позволяет отказаться от рычажной передачи, значительно облегчить подвижную часть выключателя, а следовательно, уменьшить работу отключающих пружин.

Для нормальной работы пневмогидравлического привода необходимо, чтобы вязкость жидкости не менялась с температурой.

Пневмогидравлический привод обладает высоким быстродействием, большой надежностью, удобством в эксплуатации. По своим характеристикам он превосходит пневматический привод. Пневмогидравлический привод найдет применение для мощных выключателей с напряжением 110 кВ и выше.

19-5. Воздушные выключатели. Принцип действия

В воздушных выключателях энергия сжатого воздуха используется и как движущая сила, перемещающая контакты, и как дугогасящая среда.

Принцип действия дугогасительного устройства заключается в том, что дуга, образующаяся между контак-

тами, подвергается интенсивному охлаждению потоком сжатого воздуха, вытекающего в атмосферу. При прохождении тока через нуль температура дуги падает и сопротивление промежутка увеличивается. Одновременно происходит механическое разрушение дугового столба и вынос заряженных частиц из промежутка.

Различают камеры продольного дутья, у которых воздушный поток направлен вдоль дуги, и камеры поперечного дутья, у которых воздушный поток направлен поперек дугового столба.

В силу своих преимуществ наибольшее распространение получили камеры продольного дутья (рис. 19-13). Рассмотрим основные свойства дугогасительной камеры с таким дутьем.

При отключении сжатый воздух, воздействуя на поршень 3, отводит контакт 2 со средней скоростью примерно 2 м/с. Между контактами возникает дуга 4. Сжатый воздух поступает к дуге перпендикулярно, а затем меняет направление движения на 90° и выходит через сопло и внутренние полости контактов 1 и 2 в атмосферу. Это — камера с двусторонним дутьем.

Мощность, выделяемая в дуге, зависит от величины тока и напряжения на дуге, которое пропорционально ее длине (§ 4-2).

Энергия, выделяемая в дуге, нагревает воздух, который подводится к соплу. В зоне горения дуги создается противодавление. В результате скорость потока воздуха уменьшается, а при определенном значении тока она может стать равной нулю. Происходит закупорка сопла. По мере уменьшения тока начинает нарастать скорость воздуха. Исследования [Л.7-2] показали, что в рационально сконструированном сопле даже при максимуме тока скорость истечения воздуха не должна падать ниже 10 м/с.

Эффект закупорки в основном зависит от трех факторов: давления сжатого воздуха p_0 , сечения сопла

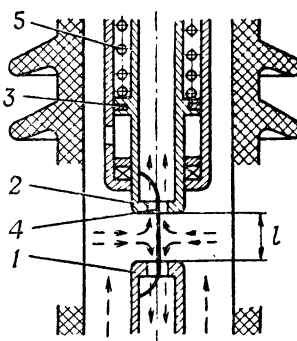


Рис. 19-13. Дугогасительная камера воздушного выключателя с продольным дутьем.

$F = \pi d^2/4$ и мощности дуги. С ростом давления p_0 и сечения сопла эффект закупорки уменьшается, а отключаемый ток увеличивается. Однако при большом сечении сопла возрастает расход воздуха и объем баков выключателя.

Большое влияние на отключаемый ток оказывает расстояние между контактами. Обозначим его через l . С ростом l , с одной стороны, растет длина (энергия) дуги, с другой — возрастает сечение $l\pi d$, через которое проходит воздух. Существует оптимальное расстояние $l_{\text{опт}}$, при котором ток отключения наибольший [Л. 19-6].

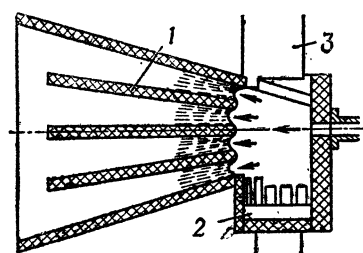


Рис. 19-14. Дугогасительная камера воздушного выключателя с поперечным дутьем.

Контакты выключателя должны расходиться на оптимальное расстояние. Время этого расходения не должно превышать 1,5—2 полупериода для уменьшения обгорания контактов и сокращения

длительности горения дуги. У многих выключателей после гашения дуги сжатый воздух в камеру не подается. Расстояние $l_{\text{опт}}$ как правило, недостаточно для того, чтобы выдержать напряжение на контактах при атмосферном давлении. Поэтому необходимо создавать дополнительный промежуток, который был бы в состоянии выдержать напряжение, приложенное к полюсу. Эту роль выполняет отделитель. Принципиальная схема выключателя с отделителем изображена на рис. 19-15 и 19-16. После гашения дуги в камере, когда ток короткого замыкания в цепи не проходит, отключается нож 2 отделителя (рис. 19-15). Контакты его расходятся на расстояние, достаточное, чтобы выдержать напряжение, приложенное к выключателю. После этого подача сжатого воздуха в камеру прекращается и контакты смыкаются под действием пружины 5. *Включение выключателя производится отделителем.* Для того чтобы сократить длительность горения дуги, возникающей при включении, скорость ножа должна быть высокой, что вызывает удары в механизме при остановке ножа в конце хода.

В выключателях для открытой установки отделитель является наиболее ненадежным элементом, особенно при обледенении контактов отделителя в зимнее время.

Эта компоновка применяется в выключателях для внутренней установки с напряжением не выше 20 кВ.

Для выключателей наружной установки применяют либо воздушнонаполненные камеры, либо воздушнонаполненные отделители.

С ростом отключаемого тока увеличивается ионизация дугового промежутка, становится сильнее эффект термодинамического торможения. При этом уменьшается скорость нарастания электрической прочности промежутка. В связи с этим в камерах продольного дуга величина отключаемого тока примерно обратно пропорциональна скорости восстановления напряжения [Л.19-6].

Для облегчения гашения дуги скорость восстановления напряжения можно снижать с помощью шунтирующего резистора. Выключатель должен иметь два разрыва. Первый разрыв отключает полный ток короткого замыкания при низкой скорости восстановления напряжения, второй отключает ток, ограниченный сопротивлением шунтирующего резистора (§ 4-7). Такое двухступенчатое гашение дуги (с применением шунта) позволяет создать воздушный выключатель, который может работать при высокой скорости восстановления напряжения. Этот метод широко применяется при напряжениях до 20 кВ.

При напряжении 110 кВ и выше двухступенчатое гашение дуги приводит к громоздкому решению, так как изоляция каждого разрыва должна быть выбрана соответственно классу напряжения. На это же напряжение должен рассчитываться шунтирующий резистор. В этом случае для облегчения гашения дуги уменьшают скорость восстановления напряжения на промежутке путем применения последовательно соединенных разрывов. При этом на каждом разрыве восстанавливается напряжение, равное $U_{\text{восст}}/n$, где n — число разрывов. Соответственно в n раз сократится и скорость восстановления напряжения на каждом разрыве.

Для выравнивания распределения напряжения по разрывам применяют активные и емкостные делители (§ 4-7). Расчет их дан в [Л. 4-10].

Описанная выше конструкция камеры продольного дуга нашла широкое применение благодаря своим пре-

имуществам: малому износу контактов, выносу паров металла электродов из дугового пространства, долговечности камеры. Выключатель с такими камерами легко развивается по напряжению путем последовательного соединения камер.

Недостатком камеры является чувствительность к высокой скорости восстановления напряжения.

При номинальном напряжении $U_n \leq 20$ кВ и большом токе отключения ($I_{откл} \geq 50$ кА) применяется камера поперечного дутья (рис. 19-14). Дуга, образующаяся после перемещения подвижного контакта 3 от неподвижного контакта 2, подвергается воздействию поперечного потока воздуха, который прижимает дугу к дугогасительным перегородкам 1, выполненным из фибры.

По мере перемещения подвижного контакта 3 в работу поочередно будет вводиться одна, две щели и т. д. Поперечный поток производит эффективное охлаждение и деионизацию дугового промежутка. Этому способствует также выделение газов фибровыми перегородками, которые охлаждают и деионизируют прилегающие участки дуги.

Процесс роста электрической прочности в камерах поперечного дутья идет значительно быстрее, чем в камерах продольного дутья.

Это позволяет создать выключатель на большой ток отключения (100 кА), работающий при высокой скорости восстановления напряжения без шунтирующего сопротивления.

Обычно камеры поперечного дутья применяются для мощных генераторных выключателей. Однако они имеют недостатки, ограничивающие область их применения: большие размеры, наличие вблизи дуги органической изоляции, трудность развития выключателя с такими камерами по напряжению.

Для надежной работы выключателей атмосферный воздух должен быть предварительно очищен от пыли, грязи и влаги, поскольку пыль и грязь оседает на поверхности управляющих клапанов и ухудшают их герметичность.

Влага, содержащаяся в воздухе, при понижении температуры может конденсироваться на стенках изоляторов и воздухопроводов. При этом ухудшается изоляция выключателя и возможно перекрытие по смоченной

поверхности. Скапливаясь в трубах при понижении температуры, влага превращается в снег и забивает трубопроводы.

Очистка от пыли и грязи производится специальным фильтром, который устанавливается на всасывающем патрубке компрессора.

Для осушения воздуха его подвергают сжатию до повышенного давления, охлаждению и расширению до рабочего давления выключателя. Окончательная сушка производится с помощью адсорбентов [Л. 19-7].

19-6. Конструкция воздушных выключателей

а) Выключатель с открытым отделителем. Принципиальная схема выключателя с отделителем в воздухе и шунтирующим резистором на напряжение 10 кВ представлена на рис. 19-15. Внешняя цепь присоединяется к выводам 1. Во включенном положении ток от верхнего вывода проходит к неподвижному контакту 5 и подвижному контакту 6. Далее по телу подвижного контакта 4 ток через токосъемные контакты 3 подается к неподвижному контакту 13 отделителя. После этого ток через нож отделителя 2 проходит к нижнему выводу.

Шунтирующий резистор 9 одним своим концом подключен к подвижному контакту, другим — к электроду 8.

При отключении специальный клапан подает сжатый воздух в сборник 11. Из сборника через полый фарфоровый изолятор воздух проходит в камеру. Одновременно воздух подается к поршню 12 привода отделителя.

Сжатый воздух действует на поршень 14 подвижного контакта и перемещает его вниз; при этом сжимается включающая пружина 15. После расхождения контактов 5 и 6 между ними возникает дуга, которая выдувается вверх через отверстие неподвижного контакта. В данном случае используется камера с односторонним продолжением дутьем.

В какой-то момент дуга, имеющая форму петли, коснется контакта 8 и часть ее, горящая между подвижным контактом 6 и электродом 8, оказывается шунтированной резистором.

После прохода тока через нуль дуга гаснет и на выключателе восстанавливается напряжение. Это напряжение пробивает промежуток между электродами 7 и 8. При этом резистор 9 шунтирует главный промежуток 6 и 8 и напряжение на нем восстанавливается по аperiodическому закону. Благодаря низкой скорости восстановления напряжения дуга между контактами 6 и 8 гаснет и через дуговой промежуток между электродами 7 и 8 течет ток шунта. На этот же промежуток воздействует поток сжатого воздуха. Так как ток ограничен шунтом и угол сдвига фаз между током и э. д. с. системы близок к нулю, то дуга гасится окончательно при первом же нуле тока.

Глушитель 10 уменьшает звуковой эффект, понижает температуру выбрасываемых газов, препятствует выбросу пламени из выключателя.

Одновременно с процессом гашения нарастает давление под поршнем привода отделителя. После гашения дуги в камере при-

ходит в движение нож 2 отделителя и создает необходимое изоляционное расстояние. После этого подача сжатого воздуха в сборник прекращается и подвижный контакт 6 возвращается в замкнутое состояние.

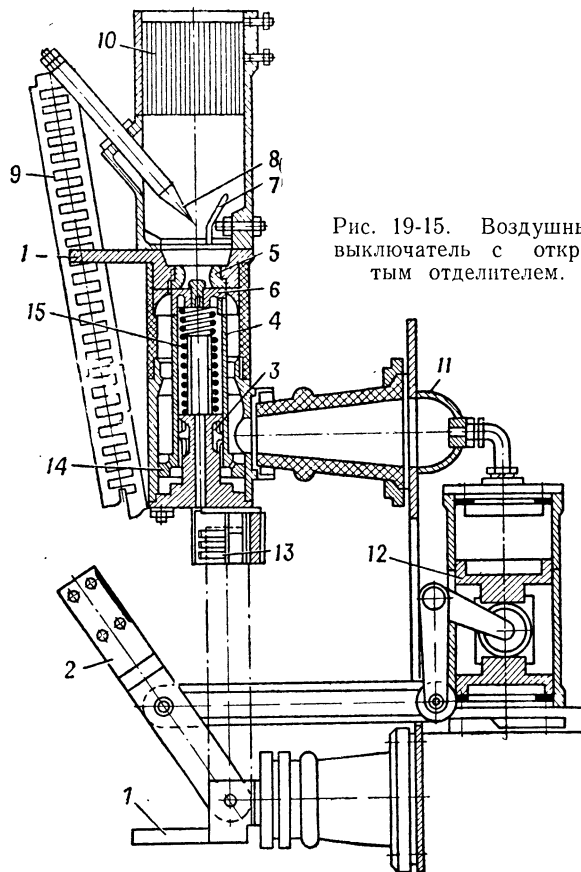


Рис. 19-15. Воздушный выключатель с открытым отделителем.

Включение выключателя производится путем подачи сжатого воздуха на нижнюю поверхность поршня 12.

б) **Выключатель с воздухом наполненным отделителем.** На рис. 19-16 показан общий вид полюса выключателя 330 кВ с длительным током 2000 А и номинальным током отключения 26,2 кА серии ВВН [Л.3-2].

В основании полюса расположены два бака 1 и 3. Дугогасительные камеры 4, снабженные шунтом 5, укреплены на полых изоляторах 2, которые являются воздухопроводом. Сжатый воздух в камеры подается клапаном 6. Каждый полюс имеет восемь дугогасительных

камер продольного дутья, включенных последовательно. Воздухонаполненный отделитель состоит из шести дугогасительных элементов 7, шунтированных конденсаторами 8.

Процесс отключения протекает следующим образом: вначале открывается клапан 6, камеры 4 разводят контакты и отключают ток короткого замыкания. Затем открывается клапан 9, расходятся контакты камер отделителя 7 и разрывается ток шунтов. Во все время

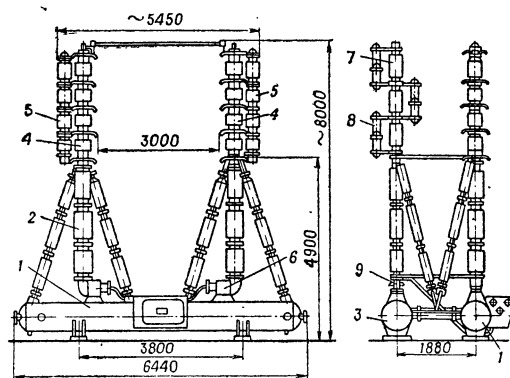


Рис. 19-16. Выключатель с воздушнонаполненным отделителем.

отключенного состояния выключателя отделитель находится под давлением 2 МПа. Эта конструкция более надежна, чем с открытым отделителем, так как отделитель защищен от действия окружающей среды. Крупным недостатком выключателя является длительное нахождение фарфора под давлением в отключенном положении выключателя. Опыт эксплуатации показал, что эта конструкция не обладает достаточной надежностью.

В современных конструкциях выключателей на напряжение 110 кВ и выше проявляется тенденция отказа от отделителей и перехода на газонаполненные камеры [Л. 19-8].

в) **Выключатели с камерами в баке со сжатым воздухом.** Наиболее совершенной является конструкция воздушного выключателя, у которого дугогасительная камера размещается непосредственно в баке со сжатым воздухом, находящимся под высоким потенциалом. На рис. 19-17, а показан полюс такого выключателя серии ВВБ на напряжение 110 кВ конструкции завода «Электроаппарат».

Бак со сжатым воздухом 3 располагается на опорном изоляторе 2, в котором проходят управляющие воздухопроводы, номинальное давление 2,6 МПа. Шкаф управления 1 расположен в основании выключателя. Дугогасительное устройство, расположенное внутри бака, соединяется с внешней цепью через проходные изоляторы 4. Равномерное распределение напряжения между двумя разрывами устройства обеспечивается с помощью конденсаторов 5. Электрическая схема коммутирующего устройства представлена на рис. 19-17, б, на этом рисунке позиция 6 — основные контакты, 7 — вспомогательные, 8 — шунтирующие резисторы. Шунтирующие резисторы 8 служат для снижения скорости восстановления напряже-

ния. Отключение тока шунтов производится контактами 7 после того, как погаснет дуга в основном разрыве 6.

Разрез дугогасительного устройства представлен на рис. 19-18. Неподвижный контакт 2 укреплен на конце токоведущего стержня изолятора 3. Подвижный контакт 4 укреплен на траверсе 5, которая в свою очередь связана с приводным штоком 6. Выступ 7 на

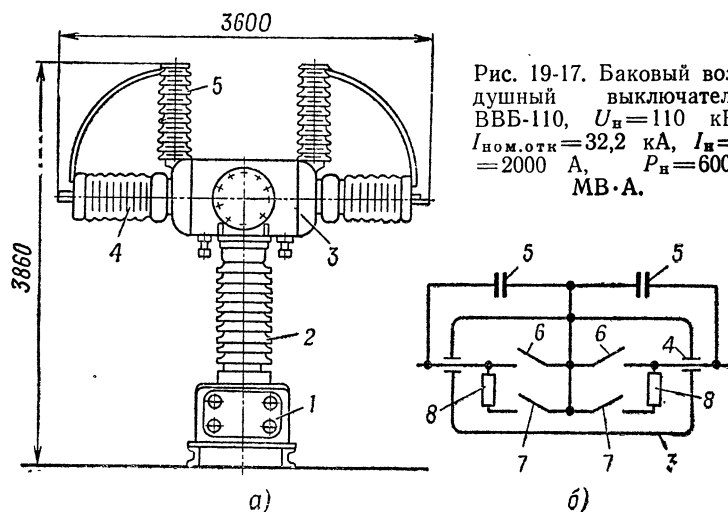


Рис. 19-17. Баковый воздушный выключатель ВВБ-110, $U_{\text{н}}=110$ кВ, $I_{\text{ном.отн}}=32,2$ кА, $I_{\text{н}}=2000$ А, $P_{\text{н}}=6000$ МВ·А.

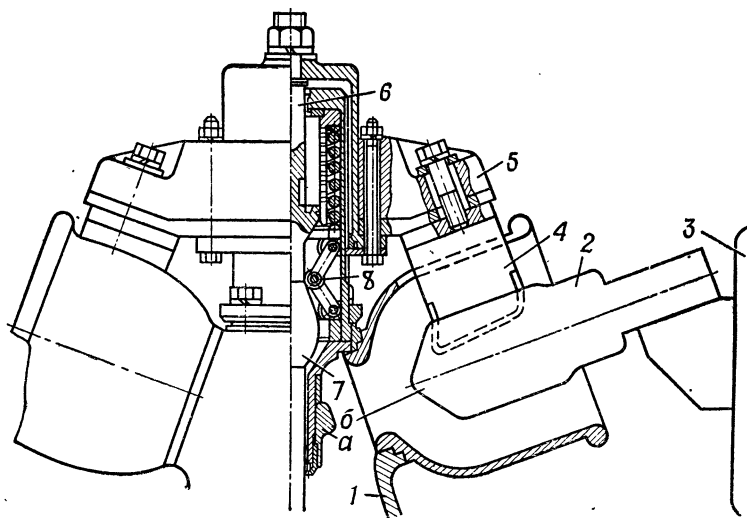


Рис. 19-18. Дугогасительное устройство выключателя рис. 19-17.

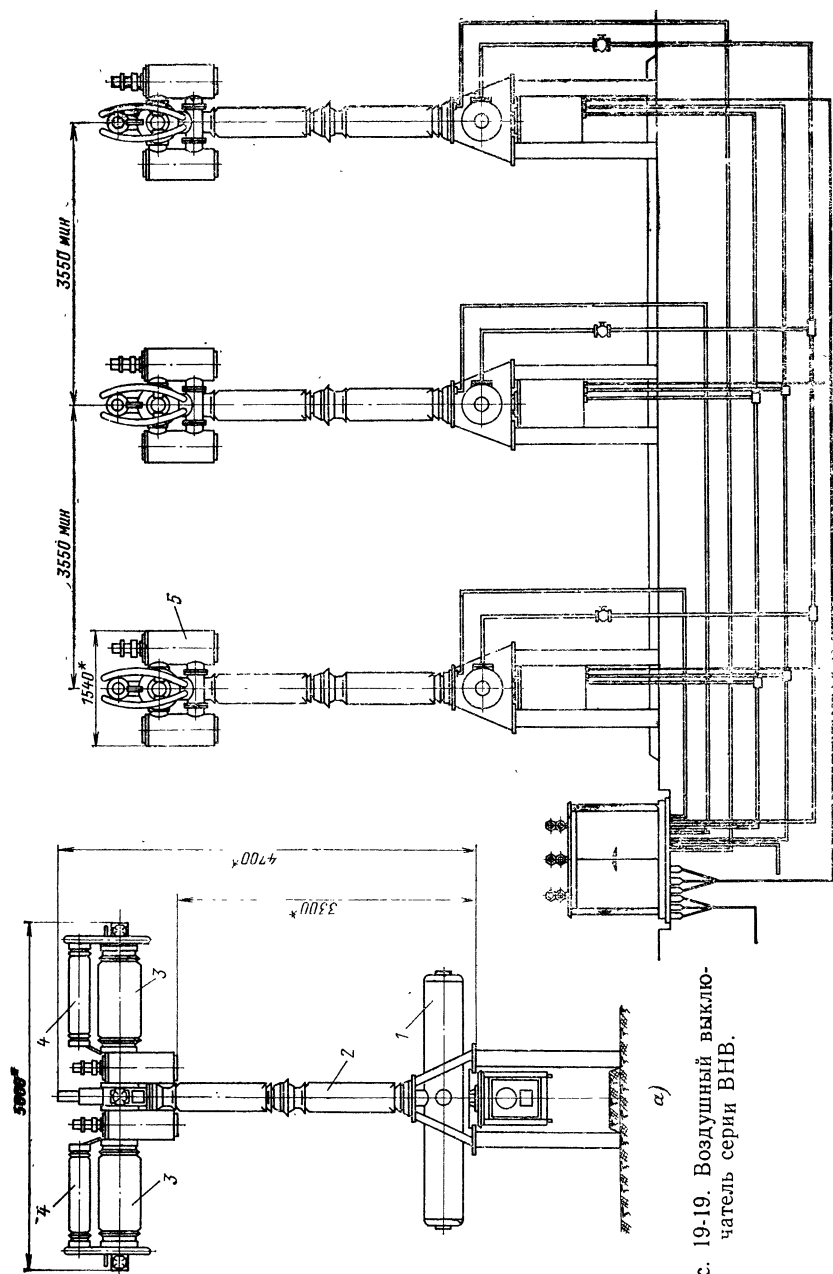


Рис. 19-19. Воздушный выключатель серии ВНВ.

штоке 6 служит для фиксирования механизма камеры во включенном положении (с помощью защелок 8).

Во включенном положении нижняя часть фланца 1 закрыта клапаном, который разобщает полость бака с атмосферой. При отключении подается воздух в привод, который толкает шток 6 вверх и одновременно открывается клапан, закрывающий фланец 1. Дуга, загораящаяся между контактами 2 и 4, потоком воздуха сдувается на точки а и б, где она подвергается интенсивному продольному дутью.

После отключения клапан закрывается и бак разобщается с атмосферой.

В рассмотренной конструкции под высоким давлением находится только стальной бак. Это дает возможность повышать давление до 3,5—4 МПа, что позволяет увеличивать отключаемый ток.

На базе элемента, изображенного на рис. 19-18, создана серия выключателей на напряжение до 750 кВ. Мощность выключателя достигает 45 000 МВ·А. По сравнению с существующими эта конструкция позволяет уменьшить массу и габариты на 20—30% и сократить расход воздуха на отключение в 3 раза. Подробные сведения о выключателе ВВБ приведены в [Л.19-8]. Эксплуатационный опыт показал, что выключатели серии ВВБ на напряжение 110—750 кВ обладают достаточно высокой надежностью. Недостатком этой серии выключателей является большая масса и громоздкость конструкции при напряжениях 500—750 кВ.

г) **Серия ВНВ.** ВЭИ совместно с заводом Уралэлектротяжмаш разработали новую серию воздушных выключателей ВНВ на напряжение 220—750 кВ и мощностью отключения до 82 000 МВ·А. Общий вид модуля на напряжение 250 кВ представлен на рис. 19-19, а, на рис. 19-19, б дано расположение трех полюсов выключателя (1 — бак со сжатым воздухом; 2 — опорный изолятор; 3 — основной дугогасительный разрыв; 4 — конденсатор для выравнивания напряжения по разрывам; 5 — шунтирующий резистор с дугогасящим устройством для отключения тока резистора). Выключатель на 500 кВ имеет два модуля, включенных последовательно, на 750 кВ — три модуля. Опорная изоляция усиливается соответственно классу напряжения.

Выключатель имеет следующие конструктивные особенности:

1. Дугогасительные устройства расположены внутри прочных стеклоэпоксидных труб, являющихся баком сжатого воздуха выключателя. Для защиты от воздействий атмосферы трубы размещаются в фарфоровой рубашке.

2. Номинальное давление увеличено до 4,0 МПа. Это наряду с другими мероприятиями позволило увеличить ток отключения до 63 кА при напряжении на разрыве 125 кВ.

3. Дугогасительное устройство модуля имеет два разрыва.

Контакты каждого разрыва имеют двухступенчатое движение. Вначале перемещается главный подвижный контакт и образующаяся дуга воздушным потоком перебрасывается на дугогасительный полый подвижный контакт, находящийся на оптимальном расстоянии от полого неподвижного контакта. Дуга подвергается интенсивному двустороннему продольному дутью. После гашения дуги дугогасительный контакт отходит на расстояние, необходимое с точки зрения испытательного напряжения. В крайнем положении этот контакт воздействует на выхлопной клапан (закрывает его). Камера гер-

метизируется и разведенные контакты находятся при давлении 4,0 МПа.

4. Привод контактов расположен на потенциале земли. Передача силы от привода к механизму контактов осуществляется через легкую изоляционную стеклопластиковую тягу.

5. При тяжелых условиях восстановления напряжения параллельно каждому разрыву включается низкоомный шунтирующий резистор (40 Ом). Из конструктивных соображений резистор разбит на две части (два контейнера). Ток резистора отключается двухступенчатой контактной системой, расположенной в одном из контейнеров.

Полное время отключения не более 0,04 с. Применяя индукционно-динамический привод контактов (рис. 19-27), это время может быть значительно сокращено.

19-7. Элегазовые выключатели

а) **Свойства элегаза.** С целью повышения эффективности гашения дуги в качестве дугогасящей среды начинает применяться шестифтористая сера (элегаз) [Л.7-2, 19-9]. По сравнению с воздухом этот газ обладает следующими преимуществами:

а) Электрическая прочность в 2,5 раза выше, чем у воздуха. При давлении 0,2 МПа прочность элегаза приближается к прочности трансформаторного масла.

б) Высокая удельная объемная теплоемкость (почти в 4 раза выше, чем у воздуха) позволяет увеличить нагрузку токоведущих частей, уменьшить массу меди в выключателе.

в) Дугогасящая способность камеры продольного дутья с элегазом в 5 раз выше, чем с воздухом.

г) Малая напряженность электрического поля в столбе дуги. Благодаря этому резко сокращается износ контактов. Уменьшается эффект термодинамической закупорки сопла. Это позволяет увеличить расстояние между контактами, повысить напряжение на каждом контактном промежутке, поднять допустимую скорость восстановления электрической прочности.

д) Элегаз является инертным газом, не вступающим в реакцию с кислородом, водородом, слабо разлагается дугой. Сам элегаз не токсичен, хотя некоторые продукты разложения опасны.

Недостатком элегаза является высокая температура сжижения. Так, например, при давлении 1,31 МПа он из газообразного состояния переходит в жидкое при температуре 0° С. Это заставляет либо прибегать к подогревающим устройствам, либо использовать газ при низком давлении. При давлении 0,35 МПа температура сжижения — 40° С. Для получения хороших результатов требуется газ с высокой чистотой (без примесей). Это усложняет и удорожает получение газа.

б) **Конструкции элегазовых выключателей.** Наиболее эффективно используется дугогасящая способность элегаза в том случае, когда струя газа с большой скоростью омывает горящую дугу.

В настоящее время применяются следующие конструктивные исполнения.

а) с автопневматическим дутьем. Принудительное дутье создается за счет энергии отключающих пружин;

б) с движением дуги в элегазе за счет взаимодействия дуги с магнитным полем;

в) гашение дуги осуществляется за счет интенсивного дутья, создаваемого при переходе газа из резервуара с высоким давлением в резервуар с низким давлением (система с двойным давлением).

Принципиальная схема дугогасительного устройства с автопневматическим принудительным дутьем показана на рис. 19-20. При отключении дуга возникает между неподвижным 1 и подвижным 2 контактами. Вместе с контактом 2 движутся сопло из изоляционного материала 3 (фторопласт), перегородка 5 и цилиндр 6. Поршень 4

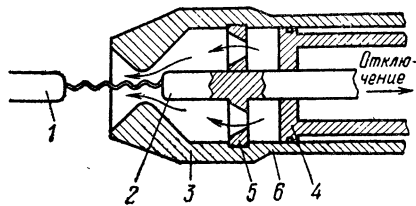


Рис. 19-20. Дугогасительное устройство элегазового выключателя с автопневматическим дутьем.

неподвижен. Элегаз сжимается, и его поток, проходя через сопло, продольно омывает дугу и обеспечивает условия для эффективного гашения. Дугогасительное устройство располагается в герметичном баке с давлением газа 0,20—0,28 МПа. При этом удается получить необходимую электрическую прочность внутренней изоляции. Описанное устройство [Л. 19-10] было испытано

и показало надежную работу при токе до 20 кА и напряжении 35 кВ. На базе этого устройства ВЭИ создан элегазовый выключатель для железных дорог напряжением 27,5 кВ, током отключения 15 кА и длительным током 1000 А (рис. 19-21). Небольшое давление элегаза исключает необходимость подогрева.

Отечественный и зарубежный опыт говорит о том, что автопневматическая схема может быть использована в выключателях напряжением до 220 кВ. Наибольшее напряжение на один разрыв не более 72 кВ. Особенно успешно эта схема применяется в выключателях нагрузки [Л.19-9]. Опытная эксплуатация выключателя ВЭИ дала хорошие результаты. Ведутся работы по улучшению параметров выключателя.

На рис. 19-22 показано дугогасительное устройство с магнитным дутьем. Устройство располагается в фарфоровом изоляторе 1, наполненном элегазом при давлении 0,40 МПа. При расхождении контактов 2 и 4 между ними возникает дуга, на которую действует радиальное магнитное поле, создаваемое постоянными магнитами 3. Сила взаимодействия дуги и поля направлена по касательной и движет дугу с достаточной скоростью. Такое устройство используется в выключателях нагрузки. В более мощных аппаратах магнитное поле создается катушкой, по которой протекает отключаемый ток. Наиболее эффективным является дугогасительное устройство с двойным давлением. На рис. 19-23, а представлена дугогасительная камера модуля выключателя фирмы «Вестингауз», США. На опорной изоляционной колонке укреплен металлический бак 2 с элегазом при давлении 0,30 МПа. Неподвижные контакты камер 10 укреплены на вводах 1. Напряжение по разрывам выравнивается с помощью конденсаторов 3. Элегаз под высоким давлением (1,50 МПа) находится в баке 4. Выходом газа из этого бака в камеру 6 управляет клапан 5. Для уменьшения перенапряжений при включении линии имеются резисторы 8 со своей контактной системой 7. Вращение подвижных

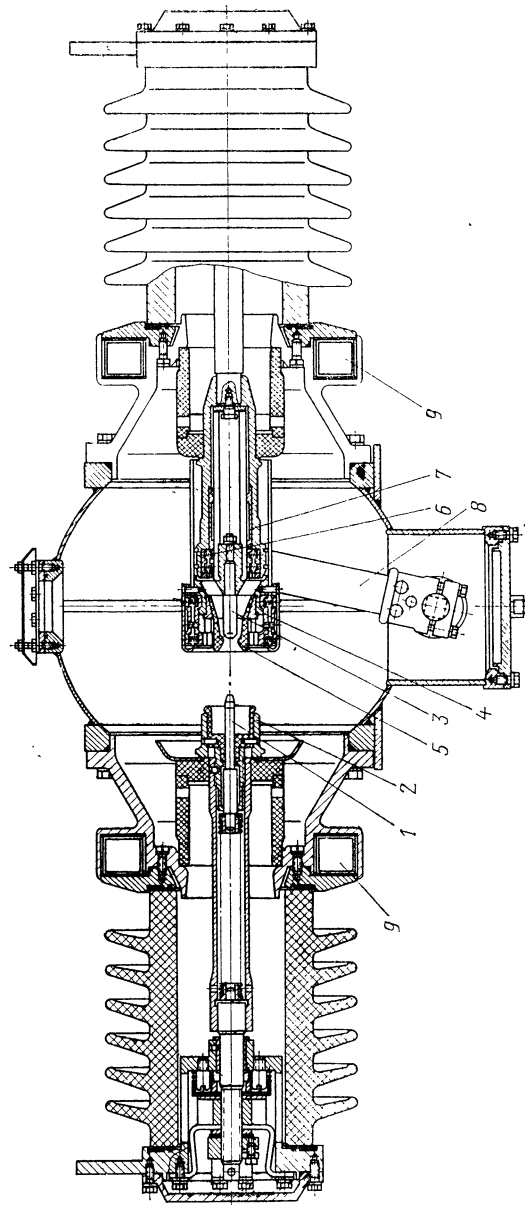


Рис. 19-21. Элегазовый выключатель ВЭИ для железных дорог.

1 — неподвижный дугогасительный контакт; 2 — неподвижный главный контакт; 3 — подвижный дугогасительный контакт; 4 — подвижный главный контакт; 5 — дугогасительное сопло из изоляционного материала; 6 — трансформатор тока; 7 — поршень; 8 — рычаг привода контактов; 9 — трансформатор тока.

контактов с камерами 6 осуществляется приводным механизмом 9. Разрез дугогасителя дан на рис. 19-23, б. Во включенном положении неподвижный трубчатый контакт 10 соединяется с пальцами 11 розеточного контакта 12. При отключении под действием механизма 9 дугогаситель 6 с розеточным контактом 11 начинает вращаться против часовой стрелки. Одновременно открывается клапан 5. После размыкания контактов 10 и 11 дуга потоком газа загоняется внутрь сопла 10 и 12, подвергается двустороннему продольному обдуву и быстро гаснет. Выключатель на напряжение 750 кВ имеет четыре последовательно включенных модуля. Ток отключения 37 кА, мощность отключения 54 000 МВ·А. Поскольку используется газ при давлении 1,50 МПа, выключатель имеет систему подогрева и компрессорную установку со схемой автоматики, которая после отключения перекачивает газ из бака низкого давления 2

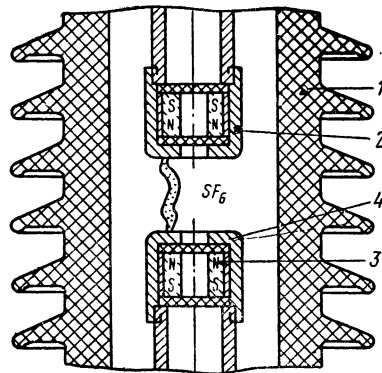


Рис. 19-22. Дугогасительное устройство с элегазом и магнитным дутьем.

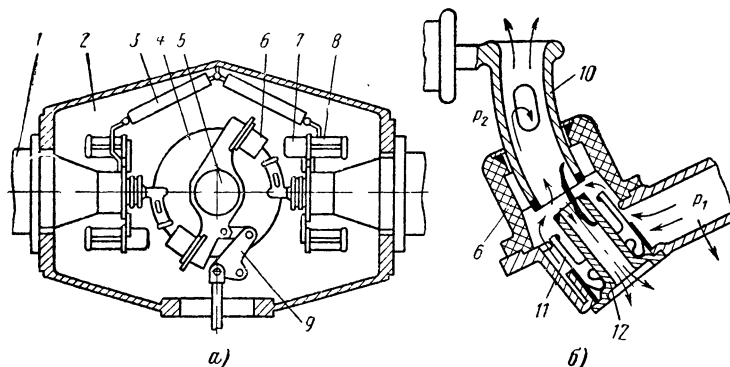


Рис. 19-23. Дугогасительная камера элегазового выключателя с двойным давлением.

в бак высокого давления 4. Интересно отметить, что указанные параметры выключателя получены при очень тяжелых условиях восстановления напряжения. Выключатель способен отключать без ревизии до 40 коротких замыканий с номинальным током отключения. Таких результатов не удалось добиться с воздушными выключателями.

Конструкция и расчет воздушных и элегазовых выключателей рассмотрены в [Л. 7-2, 19-6].

19-8. Электромагнитные выключатели

Масляные и воздушные выключатели имеют ряд свойственных им недостатков.

Масляные выключатели требуют ухода за маслом, взрыво- и пожароопасны. Маломасляные выключатели имеют значительно меньший объем масла, чем баковые, но обладают другим недостатком: количество операций ограничено, так как при частых отключениях

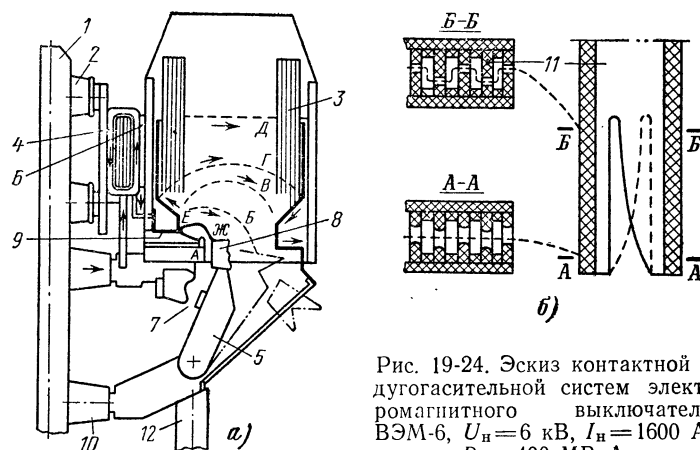


Рис. 19-24. Эскиз контактной и дугогасительной систем электромагнитного выключателя ВЭМ-6, $U_n=6$ кВ, $I_n=1600$ А, $P_n=400$ МВ·А

небольшое количество масла быстро загрязняется частицами углерода, образующимися при горении дуги. Для работы воздушного выключателя необходим источник сжатого воздуха.

Электромагнитный выключатель для своей работы не требует масла или сжатого воздуха и может совершать большое количество включений и отключений без ревизии.

Эскиз контактной и дугогасительной систем электромагнитного выключателя ВЭМ-6Э представлен на рис. 19-24, а и б. На стальной раме 1 с помощью изоляторов 2 укреплен дугогасительная камера 3 и катушка магнитного дутья 4 с полюсами 6. Подвижный контакт 5 вращается на опорном изоляторе 10 с помощью изоляционной тяги. Выключатель имеет основную 7 и дугогасительную 8 системы контактов. При размыкании дугогасительных контактов 8 между ними возникает дуга, которая под действием электродинамических сил контура и тепловых потоков перемещается вверх и занимает положение, обозначенное сплошной линией. При этом участок дуги АЕ шунтируется дугогасительной катушкой 4. Так как сопротивление катушки мало, то дуга на участке АЕ гаснет и катушка включается последовательно в цепь. Теперь дуга горит между рогом 9 и рогом подвижного контакта 8 (положение Б). Под действием магнитного поля, создаваемого катушкой 4, и полюсами 6 дуга затягивается в керамическую дугогасительную камеру 3. Действие магнитного поля на дугу рассмотрено в § 4-3.

Камера представляет собой набор тонких керамических пластин 11 с пазами. Пластины отстоят друг от друга на расстояние 2—3 мм. Керамический материал пластин (кордиерит) обладает высокой дугостойкостью и теплопроводностью, большой теплоемкостью, электрической и механической прочностью. Материал стенок не должен выделять паров и газов под действием дуги, так как последние тормозят движению дуги в щели. Надежность работы выключателя в значительной степени определяется тепловым режимом камеры. При малых скоростях движения дуги температура пластин резко возрастает, что может привести к их разрушению. При больших скоростях движения возрастают габариты камеры, так как в течение всего процесса гашения дуга не должна выйти за ее пределы. Скорость движения дуги выбирается такой, чтобы при номинальном токе отключения температура пластин камеры не выходила за допустимые пределы (2000°С). Эта скорость находится в пределах 100 м/с. Из-за нагрева керамики ее сопротивление падает, поэтому в магнитных выключателях могут протекать большие остаточные токи. Из-за этого явления магнитный выключатель чувствителен к повышению напряжения сети.

В масляном и воздушном выключателях напряжение на дуге при ее гашении невелико; сопротивление дуги практически мало сказывается на величине, форме кривой тока и угле сдвига фаз между током и напряжением сети (обычно этот угол близок к 90°). Процесс отключения в этих выключателях протекает так, как описано в § 4-5.

В магнитном выключателе дуга под действием магнитного поля загоняется в длинную узкую щель и при достаточной длине дуги и малой ширине щели напряжение на дуге соизмеримо с напряжением сети.

Напряжение на дуге электромагнитного выключателя согласно [Л.7-2] можно выразить формулой:

$$U_d = \frac{190}{\sqrt{\delta}} I_d,$$

где δ — расстояние между пластинами, м;
 I_d — длина дуги, м.

Для успешного гашения дуги необходимо, чтобы при прохождении тока через нуль соблюдалось неравенство:

$$U_d \geq U_v = E \sin \varphi,$$

где U_v — мгновенное значение восстанавливающегося напряжения.

Типичная осциллограмма процесса отключения таким выключателем дана на рис. 19-25. Значительное активное нелинейное сопротивление дуги ведет к искажению формы кривой тока. Ток резко уменьшается за счет активного сопротивления дуги. Так, на рис. 19-25 амплитуда тока уменьшилась со значения I_m до I_{m1} . Угол сдвига фаз φ между током и напряжением сети уменьшается с 90 до 15°. Это в свою очередь снижает и скорость восстановления напряжения на контактах и максимальный пик. Скорость нарастания напряжения в этих выключателях не превосходит 300 В/мс в любой точке сети. Таким образом, электромагнитный выключатель облегчает условия гашения дуги за счет уменьшения тока и скорости восстановления напряжения.

Следует отметить, что при токах порядка 100 А и менее электродинамическая сила, действующая на дугу, мала и дуга загоняется в щель с помощью поршневого устройства, которое приводится в действие от рычага 5, рис. 19-24 (система принудительного дутья, аналогичная рис. 19-20).

Электромагнитные выключатели хорошо работают при частых включениях, поэтому они нашли широкое применение в электропечных установках.

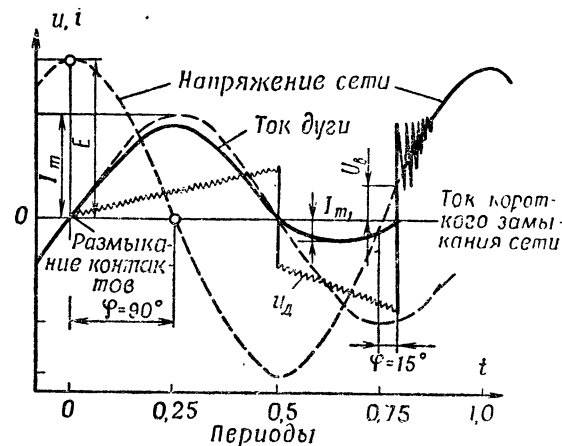


Рис. 19-25. Осциллограмма процесса отключения электромагнитного выключателя.

Выключатель ВЭМ допускает без ревизии 10 000 операций. Капитальный ремонт выключателя производится после 75 000 операций.

В настоящее время мощность этих выключателей при напряжении 15—17 кВ приближается к 1000 МВ·А. Вопрос расчета дугогасительных камер магнитных выключателей рассмотрен в работе Г. А. Кукекова [Л.7-2].

19-9. Вакуумные выключатели

В вакуумных выключателях контакты расходятся в воздушной среде с давлением 10^{-4} Па. При таком низком давлении плотность газа чрезвычайно мала. Длина свободного пробега молекулы достигает 50 м, а длина свободного пробега электрона — 300 м. В таких условиях возникновение электрического пробоя между электродами затруднено. Электрическая прочность промежутка величиной 1 мм в вакууме при давлении 10^{-4} Па достигает 100 кВ [Л.19-11].

Разрез вакуумной дугогасительной камеры КВД-21 конструкции ВЭИ дан на рис. 19-26. В керамическом цилиндре 1 с ребристой поверхностью размещены торцевые контакты 2 и 3 с вольфрамовыми наконечниками 4. Контакт 3 неподвижен, контакт 2 может пере-

мещаться благодаря сильфону 5. Нажатие контактов обеспечивается за счет атмосферного давления, действующего на сильфон. Сила нажатия контактов около 120 Н. Ход подвижного контакта 3—5 мм, скорость в момент замыкания 0,2—2 м/с. Длительный ток 320 А, номинальный ток отключения 2000 А, номинальное напряжение 20 кВ, механическая износостойкость 100 000 операций, при отключении тока 900 А — 40 000 операций. На базе камеры КВД-21 серийно изготавливаются несколькими заводами выключатели нагрузки.

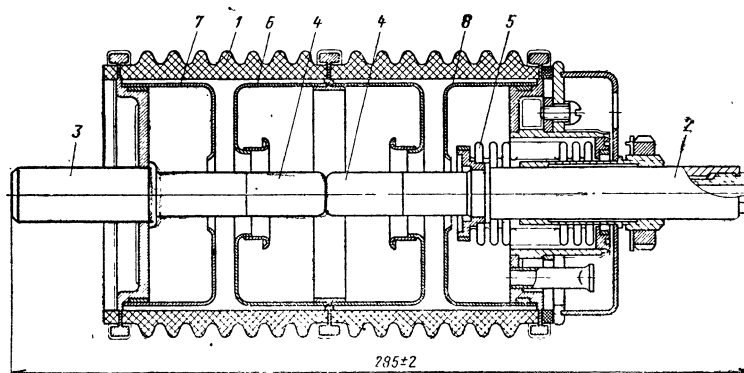


Рис. 19-26. Вакуумная дугогасительная камера КВД-21.

Рассмотрим процесс возникновения и гашения дуги в цепи постоянного тока. Известно, что при замкнутых контактах ток проходит через небольшие площадки касания (§ 3-1). При расхождении контактов эта площадка уменьшается до нуля. В этой точке сопротивление резко увеличивается, что ведет к выделению большого количества тепла и плавлению металла электродов. Образуется жидкий металлический мостик, который под действием высокой температуры нагревается и испаряется. Загорается так называемая вакуумная дуга, которая фактически горит в среде паров металла электродов. Образующиеся под действием высокой температуры ионы движутся к электродам, создавая вблизи них соответствующие объемные заряды (§ 4-1).

Поток электронов направляется к аноду и производит его бомбардировку. Освобождающиеся из анода положительные ионы движутся к катоду и разрушают его.

Следует отметить, что высокие значения напряженности электрического поля (при малых расстояниях между электродами) являются также причиной возникновения дуги в вакууме благодаря автоэлектронной эмиссии.

Малая плотность газа в колбе обуславливает очень высокую скорость диффузии зарядов из-за большой разницы плотностей частиц в разряде и вакууме. Быстрая диффузия частиц, высокая электрическая прочность вакуума позволяет эффективно гасить дугу в вакуумном выключателе.

Для того чтобы уменьшить количество зарядов в возникающей дуге, в качестве материала для электродов берется вольфрам, имею-

щий высокую температуру плавления и большую работу выхода электронов. Кроме того, контакты из вольфрама устойчивы против сваривания [Л. 19-11].

Для работы вакуумного выключателя имеет большое значение дегазация контактов, так как газы, адсорбированные контактами, при разогреве электродов выделяются и ухудшают вакуум выключателя. С целью удаления газовых включений из контактов их нагревают в течение нескольких часов до красного каления.

При работе выключателя распыленные материалы контактов осаждаются на поверхности изоляционного цилиндра, что создает возможность перекрытия изоляции аппарата. Для защиты цилиндра от паров металла электроды защищаются специальными металлическими экранами 6. Для увеличения электрической прочности внутри камеры установлены еще два экрана 7 и 8. При отсутствии экранов электрон, разгоняясь в электрическом поле по длинному пути, приобретает высокую энергию и при столкновении с молекулой может вызывать ее ионизацию. Благодаря экранам 6, 7 и 8 электрическое поле разбито на два небольших участка (между электродами 6 и 7 и между электродами 6 и 8). Возможность перекрытия внутри камеры резко снижается.

При переменном токе после прохождения тока через нуль вследствие диффузии происходит быстрое рассасывание зарядов и через 10 мкс между контактами восстанавливается электрическая прочность вакуума.

Большим достоинством вакуумных выключателей является быстрое нарастание электрической прочности промежутка после перехода тока через нуль. Поэтому вакуумные выключатели начинают широко применяться для отключения конденсаторных батарей.

Для вакуумной дуги характерен обрыв (срез) тока при подходе к нулевому значению. Дело в том, что при уменьшении тока в дуге падает давление паров металла, дуга становится неустойчивой и гаснет. При этом могут возникать такие перенапряжения, которые выводят из строя отключаемое оборудование. Ток среза зависит как от параметров отключаемой цепи, так и от свойств материала контактов. Вольфрам очень устойчив против сваривания, имеет высокую температуру плавления и износостойкость. С другой стороны, он дает высокие значения тока среза и перенапряжения, так как имеет низкое давление паров металла. Медные контакты дают в 2,5 раза более низкие значения перенапряжений, но этот материал очень склонен к свариванию и износу. В настоящее время созданы материалы контактов, обладающие высокой износостойкостью и низкими значениями перенапряжений. Как правило, часть контактной поверхности выполнена из дугостойкого металла (молибден), часть — из материала с высоким давлением паров (сурьма).

Контактная система вакуумного выключателя работает в тяжелых условиях. Наличие вакуума, окружающего контакты, ухудшает охлаждение, которое происходит в основном за счет теплопроводности тела контактов и лучеиспускания. За счет совершенствования конструкции камеры и применения новых контактных материалов ток отключения вакуумных камер доведен до 40 кА при напряжении 15 кВ. Следует, однако, отметить, что создание вакуумных выключателей на токи отключения более 20 кА связано с большими трудностями.

Обычно камеры выпускаются на напряжение не более 20—35 кВ. При более высоких напряжениях необходимо последовательно со-

единять большое число камер. Имеющийся опыт по эксплуатации и разработке вакуумных коммутационных устройств говорит о том, что основным преимуществом вакуумных выключателей является большое число допустимых операций. Механическая износостойкость в настоящее время достигает $10 \cdot 10^6$ операций, электрическая износостойкость $2 \cdot 10^6$.

Таким образом, вакуумные выключатели найдут широкое применение как высоковольтные контакторы.

Широкие перспективы открываются перед вакуумными выключателями в области отключения больших токов высокой частоты.

19-10. Синхронизированные выключатели

В выключателях, установленных в настоящее время в эксплуатации, момент начала расхождения контактов может быть любым по отношению к кривой тока. Скорости движения контактов воздушного выключателя выбраны таким образом, что расстояние между контактами, необходимое для надежного гашения дуги, набирается за время 10—15 мс.

Энергия, выделяемая в дуговом промежутке выключателя, определяется уравнением

$$A_d = \int_0^t u_d i dt.$$

Возрастание мощности отключения выключателей ведет к увеличению отключаемого тока и энергии, выделяемой в дуговом промежутке, это вызывает необходимость увеличения диаметра сопла и рабочего давления. Увеличиваются объем баков выключателя, его габариты и масса. Кроме того, с ростом энергии A_d увеличивается износ контактов. Даже применение металлокерамических контактов не решает вопроса о допустимости большого числа отключений. Значительного облегчения процесса отключения можно достигнуть, если ограничить энергию, выделяемую в дуге. Это достигается синхронизацией момента начала расхождения контактов с моментом прохождения тока через нуль и высокой скоростью движения контактов. Структурная схема одного из вариантов выключателя представлена на рис. 19-27, а. Трансформатор тока TT питает синхронизатор 1, который выдает запускающий импульс за 1,5—2 мс до момента нуля тока. К моменту прохождения тока через нуль расстояние между контактами должно быть достаточным для надежного гашения дуги. При этом энергия уменьшается в 10—50 раз. Следует отметить, что не только сокращается время горения дуги до 1,5—2 мс, но и уменьшается максимальное значение тока в дуге до $0,5 I_m$. Все это создает благоприятные условия для гашения дуги при первом переходе тока через нуль.

Разрешающий сигнал на отключение подается от блока релейной защиты 2. Если имеются оба сигнала в блоке совпадения 3, последний выдает сигнал в систему оптической передачи 4, 5, 6. Фотовспышка выдает фотосигнал, который по волоконному светопроводу 5 принимается фотоприемником 6. В качестве элемента 6 используются либо фотодиоды, либо фототиристоры.

Сигнал приемника 6 используется для управления индукционно-динамическим приводом 7, 8, который здесь используется для получения необходимой скорости движения контакта 9.

Принцип действия привода заключается в следующем. От источника питания через изолирующий каскадный трансформатор 11 и диод заряжается конденсаторная батарея 10 (С-100—300 мкФ, напряжение батареи 3—5 кВ). При поджиге трехэлектродного разрядника конденсатор 10 разряжается на катушку 7, расположенную вблизи диска 8, жестко связанного с подвижным контактом 9. Разряд имеет колебательный характер (частота 1—5 кГц). Под действием магнитного поля обмотки в диске наводятся токи, направленные

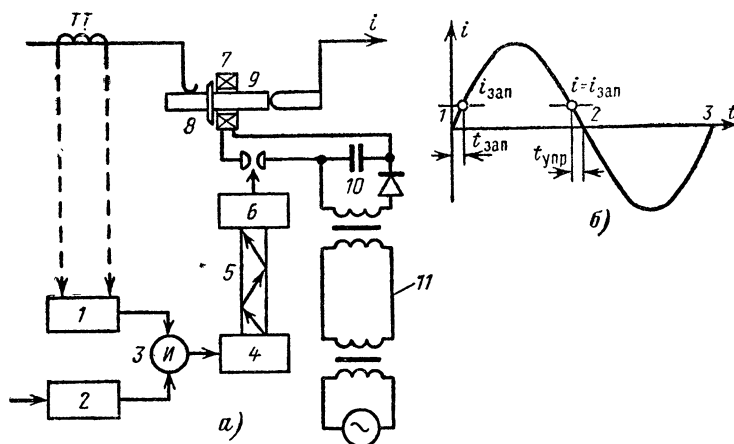


Рис. 19-27. Структурная схема синхронизированного выключателя.

ные противоположно току в катушке. Так как токи в катушке и диске направлены встречно, то на диск действует отталкивающая сила величиной

$$F = -i_{\text{кат}} i_{\text{диска}} \frac{dM}{dh},$$

где M —взаимная индуктивность между катушкой и диском;
 h —ход контакта.

Приведем некоторые приближенные расчеты. Для надежного гашения дуги необходимо, чтобы подвижный контакт переместился на расстояние 30—40 мм за время 1,5—2 мс. Примем, что движение контакта равноускоренное и масса подвижного контакта $m=3$ кг.

Ускорение контакта

$$a = \frac{2h_{\text{к}}}{t^2} = \frac{2 \cdot 0,04}{1,5^2 \cdot 10^{-6}} = 3,76 \cdot 10^4 \text{ м/с}^2.$$

Скорость к концу хода

$$v = at = 3,76 \cdot 10^4 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} = 56,5 \text{ м/с}.$$

Сила, необходимая для разгона,

$$F = ma = 3 \cdot 3,76 \cdot 10^4 = 11,3 \cdot 10^4 \text{ Н.}$$

Для получения высокого быстродействия диск привода непосредственно связан с подвижным контактом. Время передачи импульса от синхронизатора до трехэлектродного разрядника составляет десятки микросекунд, так что полное время отключения самого выключателя не превышает 1,5—2 мс. Влияние параметров привода на время срабатывания рассмотрено в [Л. 19-3].

В настоящее время предложено большое число схем синхронизаторов [Л. 19-21]. Рассмотрим принцип действия схемы с запоминанием тока. Назовем время подачи синхронизирующего сигнала временем упреждения $t_{упр}$. После начала короткого замыкания производится измерение величины тока и времени его наступления — рис. 19-27, б. В момент времени $t = t_{упр} = t_{зап}$ величина тока $i_{зап}$ запоминается. Затем текущее значение тока i сравнивается с током $i_{зап}$. В момент времени, когда величина тока $i = i_{зап}$, до нулевого значения тока останется время, равное времени упреждения. Если отсутствует аperiodическая составляющая тока, то рассмотренный метод дает достаточную точность. При наличии аperiodической составляющей тока короткого замыкания появляется методическая погрешность, поскольку нет полной симметрии тока относительно оси, проходящей через амплитудное значение.

Согласно данным [Л. 19-12] полное время отключения выключателя вместе с защитой лежит в пределах 0,02 с. Первые образцы синхронизированных выключателей на напряжение до 500 кВ установлены в энергосистемах Японии и показали хорошие результаты. Синхронизированные выключатели имеют преимущества:

1. Сокращается длительность горения дуги. Значительно уменьшаются износ контактов и эксплуатационные расходы.

2. Облегчается процесс гашения дуги, так как уменьшается энергия, выделяемая ею, и сводится к минимуму явление закупорки сопла. В результате появляется возможность увеличения мощности отключения при том же расходе воздуха.

3. Увеличивается скорость восстановления электрической прочности промежутка. Это позволит работать выключателю при высоких скоростях восстановления напряжения без шунтирующих резисторов [Л. 19-13].

4. Отключение коротких замыканий за время $t \leq 0,02$ с повышает динамическую устойчивость энергосистем. При воздействии дуги больших токов на изоляторы они остаются без повреждений, если длительность воздействия не превышает 0,02 с.

В настоящее время у нас в стране развернуты работы по созданию синхронизированных выключателей в ВЭИ, МЭИ и ЛПИ.

19-11. Выключатели нагрузки

Стоимость современного распределительного устройства с выключателями получается довольно высокой. Дорого стоит сам выключатель с приводом. Кроме того, для управления выключателем нужны трансформаторы тока, релейная защита.

В том случае, когда длительный ток установки невелик, выключатель с релейной защитой можно заменить двумя простыми аппаратами — выключателем нагрузки и предохранителем.

Для отключения номинальных токов нагрузки используется выключатель, имеющий дугогасительное устройство небольшой мощности (выключатель нагрузки), а короткое замыкание отключается высоковольтным предохранителем. Мощность современных высоковольтных предохранителей приближается к мощности такого выключателя.

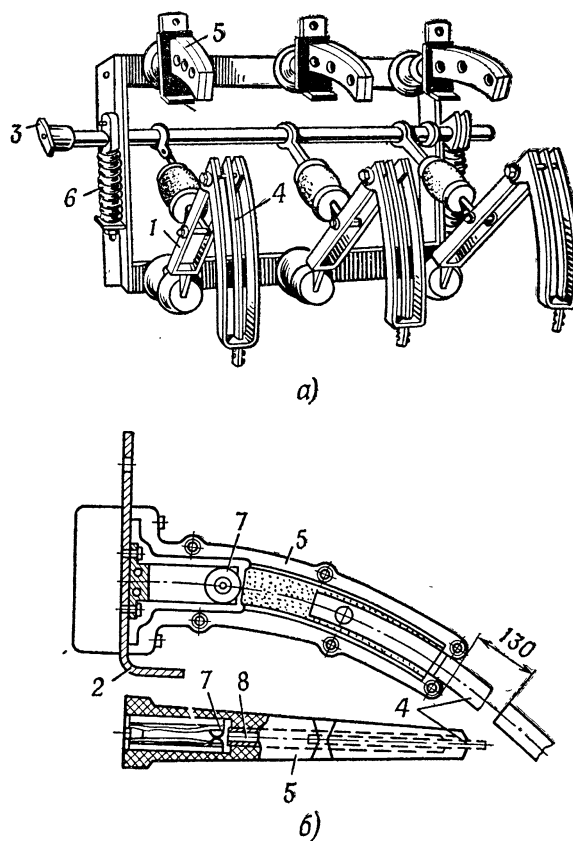


Рис. 19-28. Выключатель нагрузки.

чателя, как ВМП-10. В выключателях нагрузки для гашения дуги применяются: камеры с автогазовым дутьем, с пневматическим дутьем, камеры с элегазовым дутьем и вакуумными элементами.

В камерах с автогазовым дутьем гашение дуги осуществляется газами, которые выделяются под действием высокой температуры дуги стенками камеры из газогенерирующего материала (органического стекла, винилпласта и др.).

Пневматический выключатель нагрузки представляет собой миниатюрный воздушный выключатель, у которого сжатый воздух, необходимый для гашения, создается за счет энергии отключающей пружины.

Выключатель нагрузки с элегазовым дутьем использует либо пневматическую схему, либо схему с магнитным гашением дуги [Л. 19-9]. В СССР разработаны аппараты на напряжение до 110 кВ [Л. 19-9].

В выключателе нагрузки с вакуумным элементом дуга рвется устройством, рассмотренным нами в § 19-9.

В Советском Союзе в настоящее время серийно выпускаются выключатели нагрузки с автогазовым дутьем. Одновременно ведутся работы по созданию выключателей нагрузки, использующих все остальные описанные принципы, которые позволяют увеличить отключаемый ток до 600—1000 А при напряжениях 10 кВ и выше.

Общий вид автогазового выключателя нагрузки типа ВН-16 представлен на рис. 19-28, а. Выключатель имеет номинальное напряжение 10 кВ и отключаемый ток 200 А. Все три полюса размещаются на одной сварной раме. На нижнем опорном изоляторе полюса расположены вывод полюса и шарнир подвижного контакта 1. На верхнем изоляторе укреплены неподвижный главный контакт 2, дугогасительная камера 5 и второй вывод полюса. Подвижный контакт 1 выполнен сдвоенным. В середине укреплен дугогасительный контакт 4 в виде изогнутой тонкой медной шины. По бокам идут две стальные пластины, образующие главный подвижный контакт.

Подвижные контакты приводятся в движение валом выключателя 3, который соединен с контактами фарфоровой тягой. Отключение выключателя происходит под действием пружин 6, которые заводятся при включении аппарата.

Дугогасительная камера аппарата изображена на рис. 19-28, б. Неподвижный дугогасительный контакт точечного типа 7 соединен с главным неподвижным контактом 2. Корпус 5 выполнен из пластмассы и состоит из двух половин, стянутых стальными винтами. Внутри корпуса размещены два вкладыша 8 из газогенерирующего материала — органического стекла.

Для управления выключателем применяют ручной рычажный привод, имеющий встроенный электромагнит, который обеспечивает дистанционное отключение аппарата. Если необходимо иметь дистанционное включение, то может быть использован электромагнитный привод.

Во включенном положении выключателя ток проходит через контур главных и дугогасительных контактов.

Во время отключения сначала без дуги размыкаются основные контакты и весь ток перебрасывается в дугогасительный контур. После расхождения дугогасительных контактов между вкладышами загорается дуга. Малая толщина контакта, а следовательно, узкая щель, в которой он перемещается, обеспечивает хороший контакт дуги со стенками вкладышей. Благодаря высокой температуре дуги вкладыши интенсивно выделяют газ, который стремится выйти из камеры через зазор между подвижным контактом и вкладышами. При этом возникает продольный обдув дуги, в результате чего она гаснет. Зона выброса газов из камеры 200—500 мм. Контакт 4 выходит из камеры тогда, когда дуга погаснет.

В отключенном положении дугогасительный контакт отходит от камеры на расстояние, достаточное, чтобы выдержать испытатель-

ное напряжение, положенное для разъединителя на этот класс напряжения.

Последовательно с выключателем нагрузки включают мощные предохранители типа ПК (§ 17-6), которые защищают установку от коротких замыканий.

Выключатель может снабжаться дополнительным устройством, которое автоматически отключает его после срабатывания предохранителей. Это устройство приводится в действие указателем срабатывания предохранителя (§ 17-6).

Замена перегоревших предохранителей производится в установленном порядке. Наличие большого видимого разрыва в выключателе нагрузки дает возможность отказаться от специального разъединителя.

Без замены вкладышей выключатель нагрузки может отключить номинальный ток 200 А при напряжении 10 кВ 75 раз.

19-12. Выбор выключателей

При выборе и проверке выключателя его номинальные параметры сравниваются с параметрами сети в той точке, в которой он устанавливается. При этом надо выбирать такие наиболее тяжелые условия работы, которые возможны в эксплуатации.

Номинальное напряжение выключателя $U_{н.в}$ должно быть равно или больше номинального напряжения установки $U_{н.у}$.

Номинальный длительный ток выключателя $I_{н.в}$ должен быть больше максимального тока установки $I_{н.у}$.

Номинальный ток отключения выключателя $I_{отк.н}$ должен быть больше максимального расчетного тока короткого замыкания к моменту расхождения контактов $I_{к.з}$.

При определении расчетного тока короткого замыкания необходимо рассмотреть все возможные варианты схем короткого замыкания и выбрать наиболее тяжелый, но вероятный режим. Как правило, наиболее тяжелые условия создаются при отключении трехфазного короткого замыкания без заземления. Расчет апериодической слагающей ведется из условия, что короткое замыкание произошло в момент, когда напряжение в одной из фаз равно нулю. Номинальная мощность, которую должен иметь выключатель, равна:

$$S_{отк.н} = U_n I_{отк.н} \sqrt{3}.$$

Расчетное время размыкания берется равным минимально возможному в эксплуатации. Порядок расчета токов короткого замыкания с примерами изложен в [Л. 1-8].

Наряду с величиной номинального тока отключения необходимо учитывать циклы (последовательность операций), при которых выключатель работает. Номинальный ток отключения выключателей без АПВ гарантируется при цикле О—180—ВО—180—ВО. Для выключателей, работающих в циклах многократного быстрого действия АПВ, возможно уменьшение номинального тока отключения, особенно при втором или третьем АПВ.

Термическая стойкость аппарата должна быть проверена из условия протекания через выключатель тока короткого замыкания в течение максимального времени, которое получается при взятых временах срабатывания защиты и времени отключения других выключателей.

Номинальный ток электродинамической стойкости выключателя должен быть больше наибольшего значения ударного тока, который может быть в установке. Обычно сравнивают мгновенные значения пика тока.

Выпускаемые промышленностью выключатели испытываются при скоростях восстановления напряжения, которые являются типовыми. Однако в некоторых случаях необходимо проводить расчет скорости восстановления напряжения в проектируемых сетях и сравнивать с условиями, которые имели место при испытаниях аппарата. Особенно тяжелые условия с этой точки зрения имеют место при коротких замыканиях на зажимах мощных генераторов, трансформаторов и при удаленных к. з. Иногда требуется установка специальных шунтирующих резисторов для снижения скорости восстановления напряжения. Для мощных системных выключателей, от работы которых зависит устойчивость параллельно работающих сетей, важным параметром является время отключения и время повторного включения. Иногда эти параметры диктуют выбор типа выключателя и его привода.

Глава двадцатая

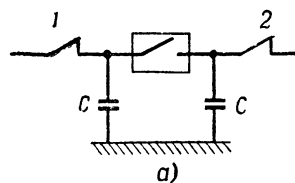
РАЗЪЕДИНИТЕЛИ, ОТДЕЛИТЕЛИ И КОРОТКОЗАМЫКАТЕЛИ

20-1. Общие сведения

Разъединители служат для включения и отключения высокого напряжения либо при токах, значительно меньших номинальных, либо в случаях, когда отключа-

ется номинальный ток, но напряжение на контактах аппарата недостаточно для образования дуги.

В первом случае разъединители применяются, как правило, для вывода высоковольтного оборудования в ревизию и ремонт (рис. 20-1, а). Согласно правилам техники безопасности оборудование, выводимое в ремонт, должно быть отключено. Между выводами отключенного аппарата и цепью, оставшейся в работе, должен быть создан видимый воздушный промежуток, гарантирующий безопасные условия работы обслуживающего персонала.



Для безаварийной работы, прежде чем оперировать разъединителем, ток в цепи отключается выключателем. Однако и в этом случае разъединителям 1 и 2 приходится отключать небольшие емкостные токи, создаваемые опорной изоляцией отключаемого аппарата и присоединенными к нему проводниками (рис. 20-1, а).

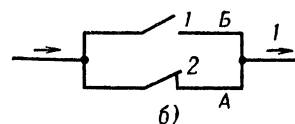


Рис. 20-1. Схемы включения разъединителя.

Для удешевления и упрощения схем коммутации используются разъединители для отключения небольших токов (токов холостого хода трансформаторов, зарядных токов воздушных и кабельных линий). Мощность трансформаторов и длина линий, которые могут отключаться разъединителями, приведены в [Л.20-1].

В настоящее время ведутся работы по увеличению отключаемого тока путем установки простых дугогасящих средств, например баллона со сжатым воздухом и сопла, создающего воздушную струю на дугу, образующуюся при отключении разъединителя.

В ряде случаев, для того чтобы перевести нагрузку с одной ветви (А) на другую (Б), можно воспользоваться двумя разъединителями (рис. 20-1, б). Для этого при замкнутом разъединителе 2 включают разъединитель 1 и ток делится пропорционально проводимости ветвей. После этого разъединитель 2 отключают. Дуга на его контактах не возникает, так как напряжение на них равно падению напряжения на ветви 1, а оно мало, ибо сопротивление ветви ничтожно.

К разъединителям предъявляются следующие требования:

1. Контактная система должна надежно пропускать номинальный ток сколь угодно длительное время. В особо тяжелых условиях работают разъединители наружных установок, подвергающиеся воздействию воды, пыли, гололеда. Контактная система должна иметь необходимую динамическую и термическую стойкость.

2. Разъединитель и механизм его привода должны надежно удерживаться во включенном положении при протекании тока короткого замыкания. В отключенном положении подвижный контакт должен быть надежно фиксирован, так как самопроизвольное включение может привести к очень тяжелым авариям и человеческим жертвам.

3. В связи с особой ролью разъединителя как аппарата безопасности промежуток между разошедшимися контактами должен иметь повышенные разрядные напряжения.

4. Механизм разъединителя желательно заблокировать с выключателем. Операции с разъединителем должны быть возможны только в случае, когда выключатель отключен.

20-2. Конструкция разъединителей и приводов к ним

Для внутренних установок, не подверженных воздействию атмосферы и выполняемых на напряжение, как правило, не выше 20 кВ, наиболее широкое распространение получили рубящие разъединители с движением подвижного контакта — ножа в вертикальной плоскости.

На рис. 20-2 показан трехполюсный разъединитель типа РВ на напряжение 10 кВ и ток 400 А.

Для получения электродинамической стойкости контактов необходимо создавать соответствующие контактные давления. С ростом тока возрастают нажатие контактов и усилие, необходимое для включения.

Ввиду широкого распространения ручных приводов стремятся контактные давления брать возможно малыми. С этой целью применяют сдвоенные ножи и электромагнитный замок (рис. 20-3).

Подвижный контакт 2 выполнен в виде параллельных шин. При коротком замыкании электродинамическая сила прижимает полосы 2 к стойкам неподвижного контакта 1. При номинальном токе контактное нажатие F создается пружинами 3, которые воздействуют на подвижный контакт через стальные пластины 4.

Магнитный поток, замыкаясь вокруг ножей 2, проходит и через стальные пластины 4. В системе возникают силы такого направле-

ния, чтобы возросла энергия магнитного поля. При сближении пластин 4 они будут попадать в зону более сильного магнитного поля. Электромагнитная энергия при этом возрастает. Таким образом создается сила F , притягивающая стальные пластины друг к другу, при этом возрастает сила нажатия контактов.

Использование электродинамических сил в токоведущих частях широко применяется для повышения электродинамической стойкости контактов разъединителей.

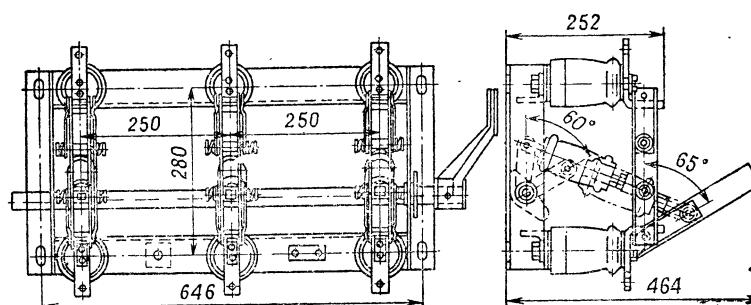


Рис. 20-2. Разъединитель для внутренних установок, $U_n = 10$ кВ.

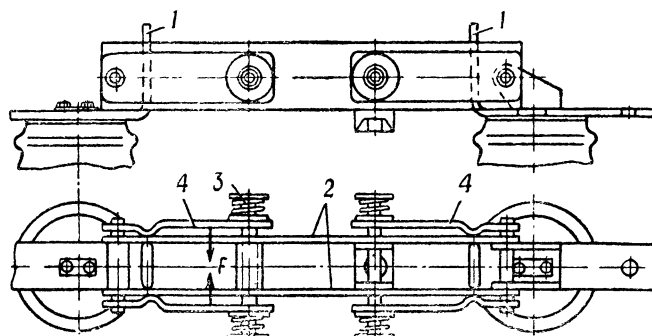


Рис. 20-3. Контактная система разъединителя рис. 20-2.

Для включения и отключения разъединителей типа РВ применяются рычажные системы с ручным или моторным приводом. Схема ручного рычажного привода изображена на рис. 20-4. Вал разъединителя имеет угол поворота 90° . Рычаг привода имеет угол поворота 150° . Включенное положение показано контурными линиями. Для того чтобы избежать отключения под действием электродинамических сил, во включенном положении механизм находится в положении, близком к мертвому (шатун 1 и короткий рычаг 2 шарнира O_1 располагаются почти на прямой). Кроме того, включающий рычаг 3 фиксируется в положениях «отключено» и «включено» с помощью специальных стопоров.

При токах более 3000 А включающий рычаг заменяется червячной передачей, что позволяет увеличить силу, действующую на ножи.

Для дистанционного управления разъединителями широко применяются моторные приводы. В них используются универсальные двигатели, которые могут питаться постоянным и переменным током. Ось двигателя связывается с выходным рычагом привода через систему червячной передачи.

Наиболее перспективным следует признать пневматический привод разъединителей (рис. 20-5).

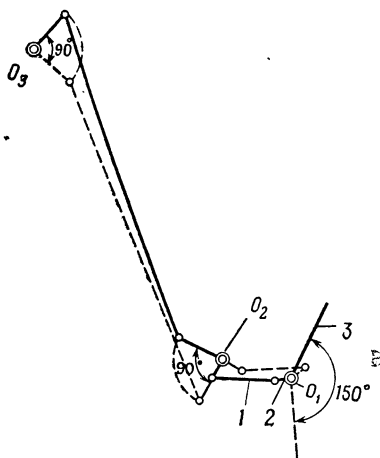


Рис. 20-4. Рычажный привод разъединителя.

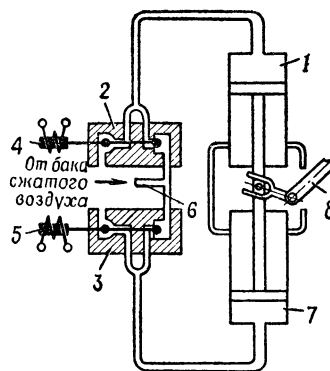


Рис. 20-5. Пневматический привод разъединителя.

Поршневой механизм (цилиндры, поршни) 1, блок пневматических клапанов управления 2 и 3 и электромагниты управления 4 и 5 устанавливаются непосредственно на раме разъединителя. К разъединителю подводятся трубопровод со сжатым воздухом 6 и цепи для управления электромагнитами. Отпадает необходимость в громоздких рычажных передачах, загромождающих распределительное устройство. Пневмопривод позволяет получить плавный ход контактов, что очень важно для разъединителей.

Поршневой механизм проектируется так, что он находится в «мертвом» положении и при включенном и при отключенном разъединителе.

При подаче напряжения на обмотку электромагнита 4 срабатывает клапан включения 2. Цилиндр включения 1 разобщается с атмосферой, и в него подается сжатый воздух обычно под давлением 0,5—1 МПа. В это время цилиндр отключения 7 через клапан отключения 3 связан с атмосферным воздухом и не создает тормозного усилия при движении поршня вниз. Под действием сжатого воздуха, действующего на поршень включения, рычаг, связанный с валом разъединителя 8, поворачивается против часовой стрелки. Контакты

разъединителя замыкаются. Аналогично протекает процесс отключения.

Для наружной установки получили распространение разъединители рубящего РЛКЗ и поворотного типа РЛНД. На рис. 20-6 показан разъединитель первого типа на напряжение 220 кВ.

На стальном основании 1 укреплены изоляторы 2, на которых смонтированы выводы разъединителя. На правом укреплен неподвижный пальцевый контакт 8, дугогасительный рог 9 и неподвижный

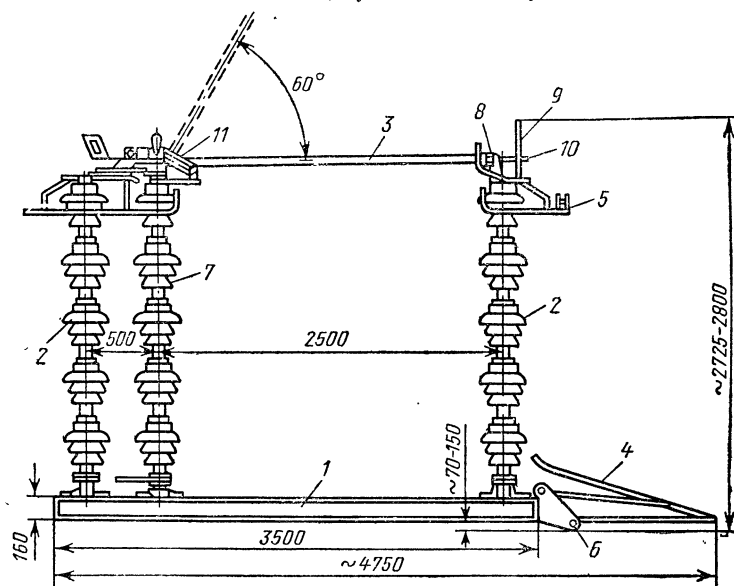


Рис. 20-6. Разъединитель наружной установки рубящего типа с заземляющим ножом, $U_n=220$ кВ.

контакт 5 заземляющего устройства. Нож трубчатого сечения 3 на конце имеет лопатку, которая является подвижным контактом. Кроме того, на конце ножа укреплен рог 10.

Рога неподвижного и подвижного контактов играют роль дугогасительных контактов и одновременно способствуют более быстрому удлинению дуги и ее гашению.

При вращении изолятора 7 движется поводок 11, соединяющий верхнюю головку изолятора с ножом 3. Если разъединитель включается, то сначала нож перемещается в вертикальной плоскости и лопатка подвижного контакта, расположенная вертикально, свободно входит между пальцами неподвижного контакта. В конце процесса включения нож поворачивается вокруг оси, лопатка становится в горизонтальное положение и, раздвигая пальцы неподвижного контакта, создает надежный контакт.

При отключении сначала нож поворачивается вокруг оси, после чего поднимается в вертикальной плоскости. Такой механизм облег-

чает работу разъединителя в условиях гололеда, так как вращение ножа вокруг своей оси позволяет легко скалывать лед.

Как говорилось ранее, для безопасного ремонта и ревизии отключенные участки цепи должны надежно заземляться. Эту операцию осуществляет нож заземления 4. Вал 6 привода заземляющего ножа механически заблокирован с приводом вращающегося изоля-

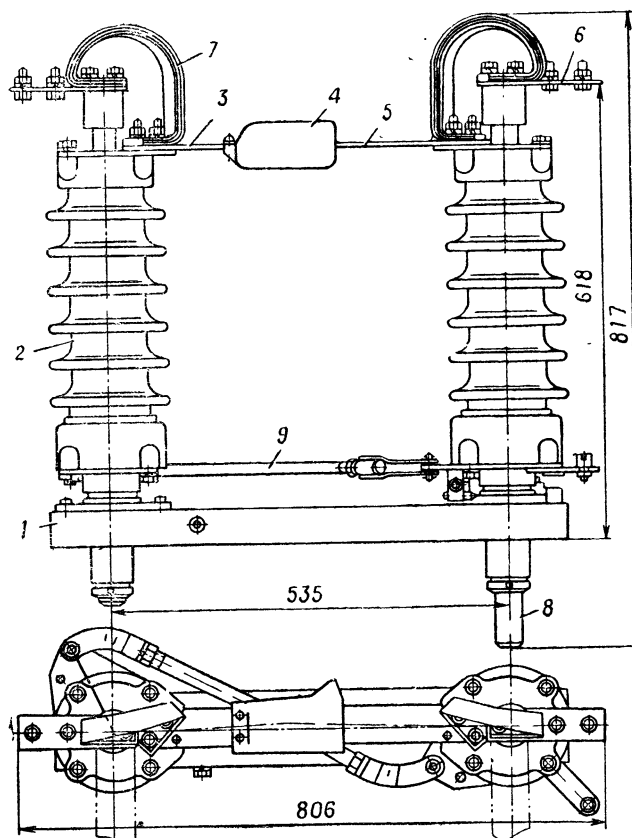


Рис. 20-7. Колонковый разъединитель, $U_{\text{н}}=35$ кВ.

тора 7. Заземляющий нож может быть включен только тогда, когда поднят нож 3 разъединителя.

В настоящее время разработаны более простые и меньшие по габариту и массе двухколонковые разъединители РЛНД с вращением ножей в горизонтальной плоскости (рис. 20-7). На стальной раме 1 установлены опорные изоляторы 2, которые могут вращаться вокруг своей оси в подшипниках. Удлиненный вал правого изоля-

тора 8 служит для управления разъединителем. Оба изолятора соединены между собой тягой 9. При вращении правого изолятора поворачивается и левый изолятор. К верхним головкам изоляторов укреплены ножи 3 и 5. Нож 3 на своем конце несет пальцевый контакт, нож 5 при включении входит в пальцевый контакт. Для защиты контактов от прямого попадания влаги и снега установлен кожух 4. Синхронное вращение изоляторов облегчает ломание льда при отключении. Зажимы 6, присоединяемые в схему, могут свободно поворачиваться относительно вала изоляторов. Передача тока к ножам осуществляется гибкими связями 7.

В настоящее время разъединители этого типа применяются при напряжениях 35—750 кВ.

20-3. Блокировка разъединителей и выключателей

Отключение разъединителя при прохождении через него номинального тока ведет к тяжелой аварии, иногда с поражением людей. Образующаяся дуга очень подвижна, быстро удлиняется, что ведет к переключению полюсов и возникновению короткого замыкания.

Если при отключении замечено образование между контактами дуги, необходимо быстро включить разъединитель. Дуга быстро погаснет, так как контакты смыкаются.

Во избежание ошибочных операций с разъединителями они блокируются с выключателями. Существует несколько систем блокировки: механическая, механическая замковая и электромагнитная замковая.

В первом случае фиксатор разъединителя можно открывать и рычаг привода разъединителя оказывается свободным только тогда, когда механизм выключателя оказывается в отключенном положении. Эта система обладает рядом недостатков. Очень трудно связать механизм выключателя со многими приводами разъединителей. В каждом отдельном случае приходится конструировать свой блокирующий механизм применительно к конструкции распределителя. В силу этого подобная система применяется редко.

При механической замковой блокировке на выключателе и связанном с ним разъединителе установлены специальные замки. Эти замки могут быть открыты только специальным ключом. Ключ находится в замке, установленном на выключателе. Его можно вынуть из замка выключателя только в том случае, когда выключатель отключен, а следовательно, через разъединитель ток не протекает. После этого ключ вставляют в замок

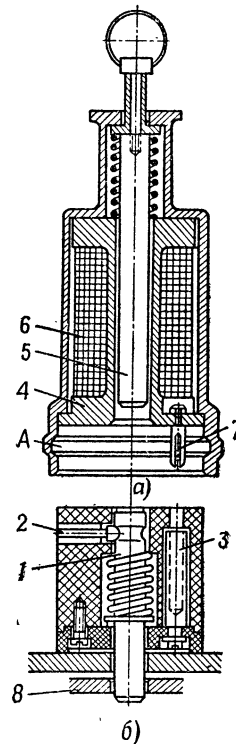


Рис. 20-8. Электромагнитный замок блокировки с ключом.

на приводе разъединителя и освобождают механизм. Разъединитель может включаться и выключаться только в том случае, когда ключ находится в его замке. Операция с другими разъединителями в этот момент невозможна. Таким образом, здесь отсутствует механическая связь приводов выключателя и разъединителей.

Еще более совершенной является электромагнитная замковая блокировка (рис. 20-8). Для операции с разъединителем ключ на рис. 20-8, *а* вставляется в замок рис. 20-8, *б*. Ключом является электромагнит 4. Концы катушки 6 выведены на штепсели 7. Если выключатель, связанный с данным разъединителем, отключен, то его размыкающие блок-контакты подают напряжение на гнезда 3, а следовательно, на катушку 6. Сердечник 5 намагничивается. При нажатии на него он соприкасается с запирающим плунжером 1. Если теперь сердечник 5 потянуть вверх, то он потянет за собой плунжер 1 и деталь механизма привода разъединителя 8 будет освобождена. Штифты 2 при этом входят в паз А ключа и не дают возможности снять ключ с замка. Для блокировки всех разъединителей достаточно иметь один ключ на все распределительное устройство. Более подробно этот вопрос рассмотрен в [Л. 20-2].

Выбор разъединителей производится по следующим основным параметрам: номинальному току, номинальному напряжению, току термической и электродинамической стойкости.

20-4. Отделители и короткозамыкатели

а) Назначение и принцип действия. В настоящее время начинают широко применяться высоковольтные подстанции без выключателей на питающей линии. Это

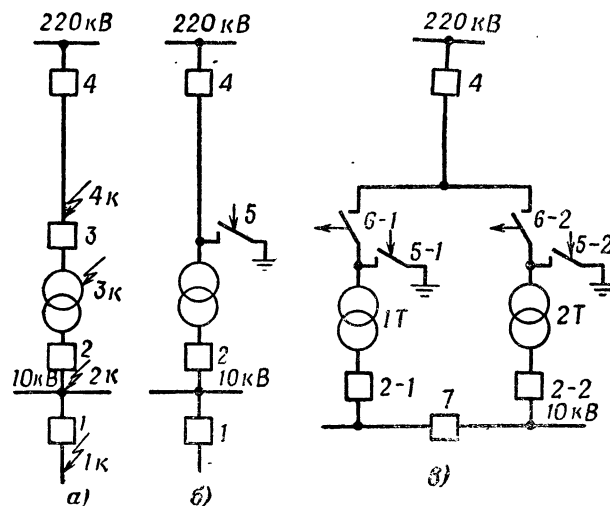


Рис. 20-9. Схема коммутации с выключателем в конце линии и с отделителями и короткозамыкателями.

дает возможность сильно удешевить и упростить установки, осуществить более глубокий ввод высокого напряжения и вместе с тем сохранить высокую надежность.

Типичные схемы питания изображены на рис. 20-9. В схеме рис. 20-9, *а* на питающей линии установлен выключатель 3, который отключает трансформатор при коротком замыкании в нем или при других аномальных режимах. В схеме рис. 20-9, *б* этого выключателя нет, на питающей линии установлен короткозамыкатель 5. Выключатель 4 в начале линии остается.

Короткозамыкатель — это аппарат, который быстро создает в сети короткое замыкание после подачи сигнала релейной защитой. Допустим, вследствие ухудшения состояния изоляции трансформатора сработало газовое реле. Это реле подает сигнал замыкателю, и он включается. Под действием тока короткого замыкания отключается выключатель 4. Замена выключателя с приводом простым аппаратом — короткозамыкателем позволяет упростить и удешевить установку, не ухудшая ее надежности. Согласно [Л. 20-4] применение отделителей и короткозамыкателей позволяет в 10—20 раз удешевить стоимость подстанции и практически сохранить ту же надежность.

На рис. 20-9, *в* приведена схема в случае питания от одной линии двух трансформаторных групп 1Т и 2Т. На этой схеме, кроме быстродействующих замыкателей 5-1 и 5-2, введены отделители 6-1 и 6-2, которые при нормальной работе схемы замкнуты.

Отделитель — это разъединитель, который быстро отключает обесточенную цепь после подачи команды на специальный привод разъединителя. Если в обычном разъединителе скорость отключения мала, то в отделителе процесс отключения длится 0,5—1 с.

Допустим, произошло повреждение в трансформаторе 1Т. Релейная защита включает короткозамыкатель 5-1. Под действием тока короткого замыкания отключается выключатель 4 и обе группы 1Т и 2Т обесточиваются. От релейной защиты 1Т отключается также выключатель 2-1. С малой выдержкой от схемы автоматики отключается отделитель 6-1 и затем снова включается выключатель 4. Таким образом, группа 2Т остается в работе. Если до аварии выключатель 7 был отключен, то после включения выключателя 4 может быть включен выключатель 7. При этом будет восстановлено питание

потребителей на шинах 10 кВ первой трансформаторной группы.

Таким образом, в этой схеме удастся не ставить выключатели на стороне 220 кВ трансформаторов 1Т и 2Т.

Однако для надежной работы установки необходима четкая последовательность в работе замыкателя, выключателя и отделителя. Иначе возможны такие тяжелые аварийные случаи, как отключение тока короткого замыкания отделителями и др.

б) Конструкции замыкателей и отделителей. На рис. 20-10 представлен короткозамыкатель 220 кВ с приводом. На основании 1 смонтирована колонка изоляторов 2, вверху которой расположен неподвижный контакт замыкателя. Подвижный контакт 3 полупантографного типа через изоляционную тягу 5 соединен с пружинным приводом 7 (рис. 20-10).

В отключенном состоянии пружины привода заведены и короткозамыкатель готов к включению. Включение производится при подаче напряжения на электромагнит привода 7, освобождающий включающую пружину.

Подвижный контакт 3 соединяется с землей через трансформаторы тока 6, которые используются для схемы автоматики (основание 1 и связанный с ним контакт 3 изолированы от земли изоляторами 4).

В системах с глухозаземленной нейтралью достаточно установить замыкатель только на один полюс системы.

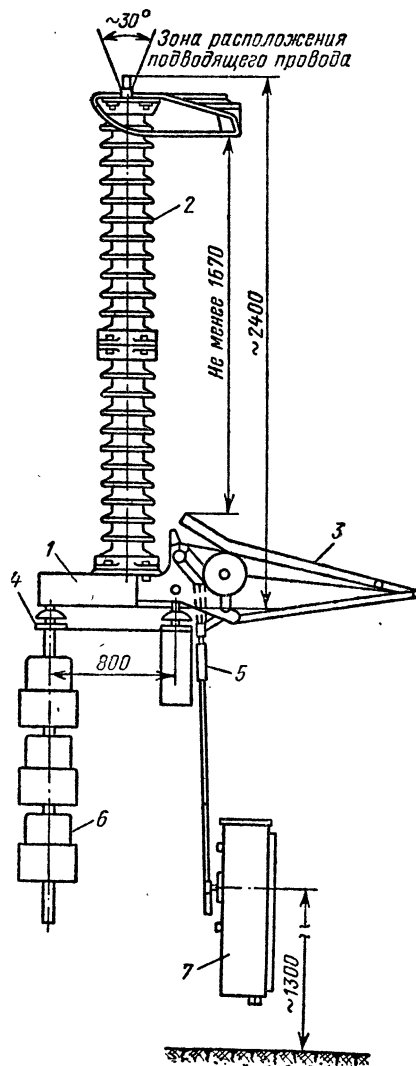


Рис. 20-10. Короткозамыкатель, $U_n = 220$ кВ.

В системах с изолированной нейтралью устанавливаются два замыкателя, которые при включении создают двухфазное короткое замыкание.

В основу конструкции отделителя положен двухколонковый разъединитель (рис. 20-7). На тяге 9 размещается отключающая пружина, которая заведена во включенном положении отделителя. Отделитель удерживается во включенном состоянии защелкой, расположенной в пружинном приводе. Этот привод включает отде-

литель. При подаче напряжения на расцепляющий электромагнит этого привода механизм отделителя освобождается и он отключается под действием своих пружин.

Параметры отечественных короткозамыкателей и отделителей приведены в [Л. 20-3, 20-4].

Схема автоматики и защиты при использовании отделителей и короткозамыкателей приведена на рис. 20-11. Замыкатель 1 имеет пружинный привод 4. Механизм расцепления привода 6 может срабатывать от реле максимального тока мгновенного действия 8 и независимого расцепителя 10.

От трансформатора тока 3 питается электромагнит 9 расцепителя отделителя 2. Отделитель отключается под действием пружины 5.

При нормальной работе подстанции отделитель 2 включен, а замыкатель 1 выключен.

При внутреннем повреждении трансформатора срабатывает либо реле дифференциальной защиты *РТ*, либо газовое реле *РГ*. Промежуточное реле *РП* при этом подает напряжение на электромагнит независимого расцепителя 10. В результате замыкатель 1 включается и через трансформатор тока 3 течет ток короткого замыкания. Электромагнит 9 подтягивает свой якорь 11 и заводит пружину 12, которая с ним связана. Схема будет находиться в таком состоянии до тех пор, пока от своей защиты не отключится выключатель, установленный в начале питающей линии (выключатель 4 на схеме рис. 20-9, в).

После отключения этого выключателя якорь реле 9 под действием своей пружины производит расцепление защелки 7 и отделитель 2 размыкает свои контакты. Теперь выключатель на питающем конце линии может включаться вновь. Такая схема применяется только тогда, когда головной выключатель отключается от замедленно дей-

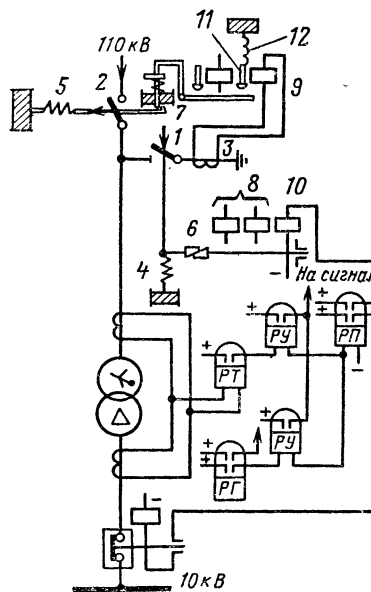


Рис. 20-11. Схема релейной защиты и автоматики при использовании отделителей и короткозамыкателей.

ствующей защиты. При быстродействующей защите линии применяются другие схемы [Л. 20-3].

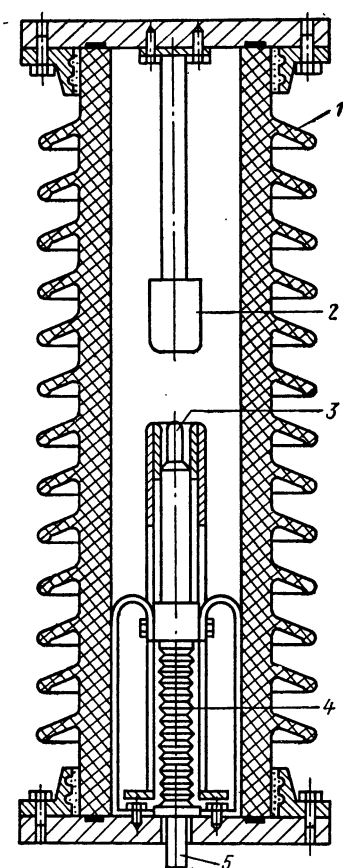


Рис. 20-12. Элегазовый короткозамыкатель, $U_n=110$ кВ.

В заключение следует отметить, что описанные выше конструкции замыкателей и отделителей имеют большое время срабатывания (0,5—1 с), которое не может удовлетворить современные энергосистемы. Сейчас ставится задача уменьшения этого времени до 0,08—0,12 с даже для таких высоких напряжений, как 220 кВ.

Необходимо указать, что рассмотренные аппараты ненадежно работают при гололеде и сильных морозах.

Для уменьшения времени срабатывания следует сокращать путь контактов путем применения элегаза или вакуума. Более перспективными являются элегазовые аппараты, поскольку на высоких напряжениях приходится несколько вакуумных камер включать последовательно.

На рис. 20-12 представлен элегазовый короткозамыкатель. Контакты 2 и 3 расположены в фарфоровом цилиндре 1. Давление элегаза 0,3 МПа. Привод подвижного контакта осуществляется стальной тягой 5. Стальной сильфон 4 осуществляет герметизацию подвижного контакта. Расстояние между контактами 85—110 мм при напряжении 110 кВ, поэтому время срабатывания в 4—5 раз меньше, чем у существующих замыкателей серии КЗ. Короткозамыкатель защищен от воздействия окружающей среды и может работать при гололеде и низких температурах.

Глава двадцать первая

РЕАКТОРЫ

21-1. Общие сведения

Реактор — это катушка с неизменной индуктивностью, которая служит для ограничения токов короткого замыкания и поддержания напряжения на шинах при

аварийном режиме. Для пояснения рассмотрим схему рис. 21-1. От генератора 1 питаются сборные шины 2. От этих шин отходят линии 3 к потребителю. Возьмем два случая: в первом за выключателем 4 отсутствует реактор, во втором за выключателем 5 установлен реактор 6.

При трехфазном коротком замыкании за выключателем 4 величина тока короткого замыкания $I_{к1}$ определяется в основном индуктивным сопротивлением генератора

$$I_{к1} = \frac{U_n}{\sqrt{3} X_g}. \quad (21-1)$$

Введем понятие относительного индуктивного сопротивления генератора в процентах

$$x_g \% = \frac{I_{н.г} X_g \sqrt{3}}{U_n} 100\%, \quad (21-2)$$

где $I_{н.г}$ — номинальный ток генератора.

Воспользовавшись (21-1) и (21-2), можно получить:

$$I_{к1} = I_{н.г} \frac{100}{x_g \%}. \quad (21-3)$$

В этом случае при коротком замыкании напряжение на сборных шинах будет равно нулю и на всех отходящих линиях пропадет напряжение.

Необходимо также отметить, что выключатель 4 должен быть выбран по току короткого замыкания $I_{к1}$.

При коротком замыкании на реактированной линии ток короткого замыкания определяется суммарным сопротивлением генератора и реактора:

$$I_{к2} = \frac{U_n}{\sqrt{3} (X_g + X_p)}. \quad (21-4)$$

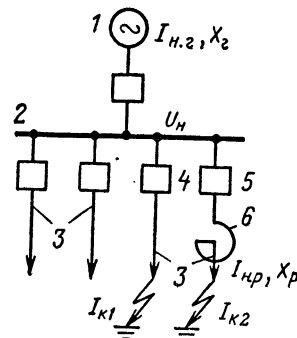


Рис. 21-1. Схема, поясняющая принцип действия реактора.

Введем относительное индуктивное сопротивление реактора в процентах

$$x_p \% = \frac{I_{н.р} X_p \sqrt{3}}{U_H} 100\%. \quad (21-5)$$

Обычно один источник обслуживает несколько десятков потребителей. Поэтому номинальный ток линии во много раз меньше номинального тока генератора. Длительный ток реактора выбирается равным току линии. Таким образом, $I_{н.р} \ll I_{н.г}$.

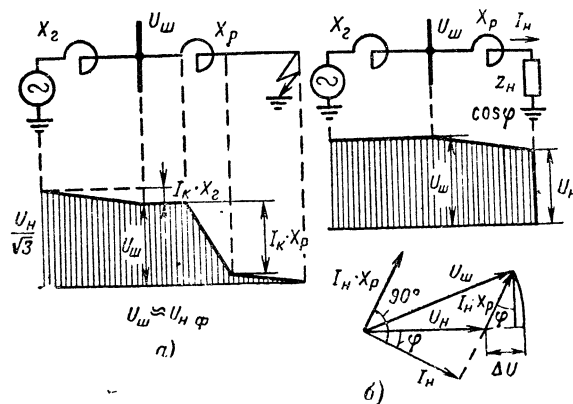


Рис. 21-2. Распределение напряжения при коротком замыкании и номинальном режиме работы.

Положим, что $x_r \% = x_p \%$. Тогда из (21-2) и (21-5) следует, что $X_p \gg X_r$. При этом можно написать, что

$$I_{к2} \approx \frac{U_H}{\sqrt{3} X_p} = I_{н.р} \frac{100}{x_p \%} \ll I_{к1}.$$

Таким образом, при сделанных допущениях ток короткого замыкания определяется только параметрами реактора.

Реактор является весьма надежным аппаратом, его повреждения практически исключены. Поэтому выбор аппаратуры линии производится по току $I_{к2} \ll I_{к1}$, что значительно облегчает и удешевляет распределительное устройство.

Поскольку $X_p \gg X_r$, то при коротком замыкании практически все напряжение ложится на индуктивное сопро-

тивление реактора и напряжение на **шинах** получается близким к номинальному (рис. 21-2, а).

При номинальном режиме, когда в цепи проходит ток нагрузки, потерю напряжения на реакторе можно определить по формуле [Л. 3-2]

$$\Delta U \% = \frac{\Delta U \sqrt{3}}{U_n} 100 \% \approx \frac{I_{н.р} X_p \sin \varphi \sqrt{3}}{U_n} 100 \% = x_p \% \sin \varphi.$$

Векторная диаграмма напряжений показана на рис. 21-2, б. При чисто индуктивной нагрузке $\varphi = 90^\circ$ потеря напряжения равна падению напряжения на реакторе. При активной нагрузке с $\cos \varphi = 0,8$ потеря напряжения равна $0,6 x_p \%$. Обычно $x_p \% < 10 \%$. Таким образом, в длительном режиме потеря напряжения на реакторе невелика.

В настоящее время созданы специальные сдвоенные реакторы, у которых потеря напряжения в номинальном режиме еще меньше.

Поскольку выбор аппаратуры распределительного устройства ведется с учетом ограничения тока короткого замыкания реактором, к его надежности предъявляются особо высокие требования.

При номинальном режиме обмотка реактора подвергается нагреву проходящим током. Мощность, выделяемая в обмотке реактора, составляет несколько киловатт в реакторах на малые токи и несколько десятков киловатт в реакторах на большие токи ($I_{н.р} = 2000$ А).

При коротком замыкании через реактор проходит ток, во много раз превышающий длительный. Это приводит к быстрому повышению температуры реактора.

В соответствии с этим в качестве основных параметров вводятся длительный номинальный ток I_n и ток термической стойкости $I_{н.т}$, отнесенный к определенному времени $t_{н.т}$. Иногда термическая стойкость задается произведением $I_{н.т} \sqrt{t_{н.т}}$.

Если индуктивное сопротивление реактора более 3%, то наибольший ток короткого замыкания, проходящий через реактор, равен:

$$I_{к.р} = I_{н.р} \frac{100}{x_p \%}$$

Этот ток берется за основу при расчете термической и электродинамической стойкости реактора.

Если $x_p \% < 3\%$, то при расчете тока короткого замыкания желательно учитывать сопротивление источника питания.

При прохождении тока короткого замыкания между реакторами и внутри реактора создаются электродинамические силы, которые стремятся его разрушить. Расчет величин этих сил рассмотрен в § 1-5. Механическая прочность реактора характеризуется ударным током электродинамической стойкости. При расчете электродинамической стойкости за основу берется ударный ток.

$$i_{уд} = 1,8 \sqrt{2} I_{к.р.}$$

Одним из основных параметров реактора является его индуктивность L . Поскольку

$$x_p \% = \frac{I_{н.р} X_p \sqrt{3}}{U_n} 100\% \text{ и } X_p = \omega L_p,$$

то индуктивность реактора равна:

$$L_p = \frac{10 U_n x_p \%}{I_{н.р} \cdot 2\pi f \sqrt{3}},$$

где U_n — в киловольтах; $I_{н.р}$ — в амперах.

Индуктивность определяется числом витков реактора и его размерами и рассчитывается по формулам [Л. 21-1 и 21-2].

Для бетонных реакторов, имеющих обмотку n витков в виде катушки высотой h (м), толщиной b (м) и средним диаметром D (м), хорошие результаты дает расчет индуктивности (мГ) по формуле Корндорфера:

$$L = 10,5 \cdot n^2 D \left[\frac{D}{2(b+h)} \right]^p \cdot 10^{-4},$$

где $p=3/4$ при $0,3 \leq \frac{D}{2(b+h)} \leq 1$ и $p=1/2$ при $1 \leq \frac{D}{2(b+h)} \leq 3$.

Известно (§ 5-2), что индуктивность пропорциональна магнитной проводимости. Применение ферромагнитных сердечников позволяет резко снизить размеры реактора. Однако в наиболее ответственный момент, при ко-

ротком замыкании, из-за большого тока происходит насыщение сердечников, уменьшение индуктивности. Это ведет к уменьшению токоограничивающего эффекта, который дает реактор. В связи с этим применение сердечников в токоограничивающих реакторах не получило распространения. Пропускная способность (кВ·А) трехфазного комплекта реакторов равна:

$$Q = 3I_{н.р}^2 X_p \cdot 10^{-3}.$$

По существу Q — это реактивная мощность трехфазного комплекта.

Вопросы теории, расчета и эксплуатации реакторов рассмотрены в работе [Л. 21-1].

21-2. Конструкция реакторов

Наибольшее распространение получили бетонные реакторы. На рис. 21-3 представлен трехфазный комплект таких реакторов. Многожильный провод 1 соответствующего сечения с помощью шаблонов наматывается в виде катушки. После этого в специальные формы заливается бетон. Застывая, бетон образует вертикальные стойки — колонны 2, которые скрепляют между собой отдельные витки.

Торцы колонн имеют шпильки, с помощью которых укрепляются изоляторы 3 и 4.

Для получения необходимой прочности электрической изоляции после затвердевания бетона реактор подвергают интенсивной сушке под вакуумом. Затем реактор дважды пропитывается влагостойким изоляционным лаком.

Между отдельными витками в ряду и между рядами выдерживается значительный зазор (3,5—4,5) 10^{-2} м. Такая конструкция улучшает охлаждение отдельных витков реактора и повышает электрическую прочность изоляции.

При больших номинальных токах (более 400 А) применяется несколько параллельных ветвей. Для того чтобы обеспечить равномерное распределение тока по ветвям, применяется транспозиция витков. Все витки ветвей должны быть одинаково расположены относительно оси реактора.

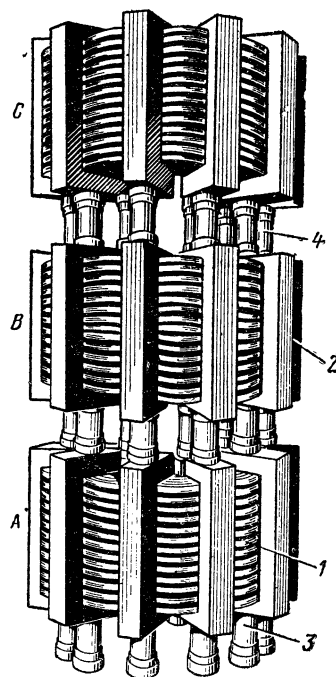


Рис. 21-3. Трехфазный комплект реакторов.

В качестве обмоточного материала используется многожильный медный или алюминиевый кабель большого сечения. Кабель покрывается несколькими слоями кабельной бумаги толщиной $0,12 \cdot 10^{-3}$ м. Поверх бумаги делается хлопчатобумажная оплетка. Общая толщина изоляции примерно $1,5 \cdot 10^{-3}$ м. Максимальная допустимая температура при длительном режиме не выше 105°C , при коротком замыкании — не выше 250°C .

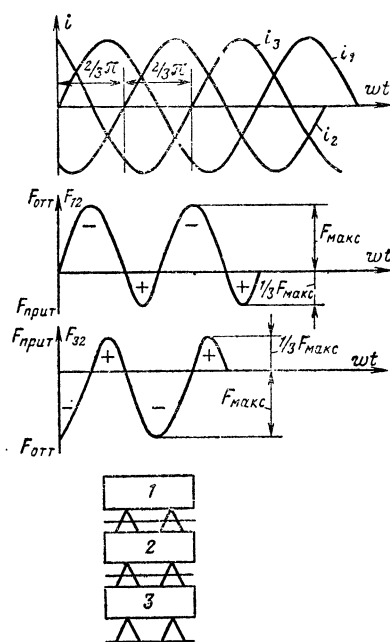


Рис. 21-4. Изменение во времени электродинамических сил, действующих между реакторами.

Реакторы охлаждаются, как правило, за счет естественной вентиляции. Ввиду выделения большой мощности в реакторе распределительное устройство должно предусматривать специальные каналы для охлаждающего воздуха, особенно при больших токах.

Мощное магнитное поле реактора замыкается вокруг обмотки. Все ферромагнитные тела в этом поле создают дополнительные активные потери и могут нагреваться до очень высоких температур. Для уменьшения этих потерь ферромагнитные детали (балки, арматура железобетонных стен) не должны находиться от обмотки на расстоянии меньшем, чем внешний радиус обмотки реактора.

Результирующие потери в реакторе колеблются в пределах от 0,1 до 0,55% пропускной способности реактора. Большие величины относятся к реакторам с алюминиевой обмоткой.

В трехфазном комплекте (рис. 21-3) наибольшему нагреву подвергается верхний реактор, поскольку подходящий снизу воздух уже подогрет реакторами, расположенными ниже.

Расстояние между реакторами определяется высотой опорных изоляторов. Так как при напряжении 6—10 кВ высота этих изоляторов мала, то при больших токах в реакторах возникают электродинамические силы, которые могут разрушить изоляторы, работающие на сжатие и на разрыв. Электродинамическая сила, действующая на изоляторы, имеет вид, изображенный на рис. 21-4.

В наиболее тяжелых условиях работают изоляторы верхней фазы. Для уменьшения разрывающего усилия, действующего на изоляторы, изменяют направление поля среднего реактора на обратное. При этом большое отталкивающее усилие становится притягивающим.

Изменение направления поля средней фазы достигается путем намотки этой фазы в направлении, обратном направлению намотки крайних фаз. Реакторы, предназначенные для вертикальной установки, имеют маркировку В (верхняя фаза), С (средняя) и Н (нижняя).

Если при расчете сил взаимодействия пренебречь влиянием третьей фазы, то, воспользовавшись расчетными формулами § 1-5 и 1-8, можно найти наибольшие отталкивающую и притягивающую силы (Н), действующие на изоляторы:

$$F_{\text{отт}} = \frac{1}{4} (i_{\text{уд}} \omega)^2 \psi; \quad F_{\text{прит}} = \frac{3}{4} (i_{\text{уд}} \omega)^2 \psi,$$

где $i_{\text{уд}}$ — ударный ток, равный

$$1,8 \sqrt{2} \frac{100}{x_p \%} I_{\text{н.р.}}$$

ω — число витков реактора;

ψ — коэффициент, который берется по рис. 1-11.

Силы, действующие на каждый изолятор, соответственно равны:

$$f_{\text{раст}} = \frac{F_{\text{отт}}}{N} - \frac{Mg}{N}; \quad f_{\text{сж}} = \frac{F_{\text{прит}}}{N} + \frac{Mg}{N},$$

где M — масса реактора;

N — число изоляторов (колонн);

g — ускорение свободного падения.

Сила веса реактора сжимает изоляторы и этим уменьшает растягивающую силу, действующую на изолятор.

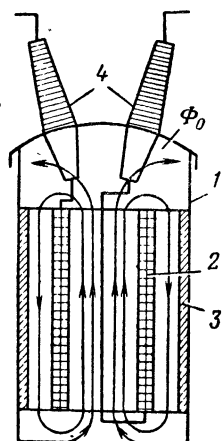
В реакторах на большую силу тока электродинамические силы при вертикальной установке в аварийном режиме получаются столь большими, что изоляторы не могут обеспечить необходимую электродинамическую стойкость.

В этих случаях приходится прибегать к горизонтальной установке реакторов. Расстояние между осями может быть выбрано достаточно большим. Расчет динамической стойкости для этого случая рассмотрен в [Л. 21-1 и 3-2].

Бетонные реакторы хорошо себя зарекомендовали при работе в закрытых распределительных устройствах при напряжении не выше 35 кВ. Недостатком их является громоздкость, большая масса. В настоящее время ведутся работы по уменьшению массы и габаритов таких реакторов путем применения современных изоляционных материалов — стеклопластика и эпоксидных смол.

При напряжениях более 35 кВ и при установке реакторов на открытой части подстанций применяется масляное исполнение. Схема такого реактора приведена на рис. 21-5. Обмотка реактора 2 наматывается на специальный каркас из изоляционного материала типа гетинакса. Эта обмотка погружается в стальной бак с трансформаторным маслом. Применение масла позволяет уменьшить расстояние между обмоткой и заземленными частями и улучшить охлаждение обмотки за счет конвекции масла. Все это дает возможность уменьшить массу и габариты аппарата. Выводы реактора присоединяются к зажимам проходных изоляторов 4.

Однако такая компоновка реактора наталкивается на большую трудность. Переменный магнитный поток реактора Φ_0 замыкается по баку, что приводит к его нагреву до недопустимых температур. Для того чтобы избежать нагрева реактора, внутри бака 1 устанавливается короткозамкнутая обмотка — экран 3. Как было пока-



зано в § 5-3, короткозамкнутый виток увеличивает магнитное сопротивление цепи и, следовательно, уменьшает магнитный поток, замыкающийся через бак.

В настоящее время в СССР предложены и разработаны [Л. 21-3] тороидальные реакторы. Обмотка такого реактора аналогична обмоткам тороидального магнитного усилителя, но только магнитопровод отсутствует. Магнитный поток замыкается по тору. Внешнее поле практически отсутствует, что дает возможность помещать реактор в стальной бак с маслом, не опасаясь нагрева бака. Изготовленные тороидальные реакторы на напряжение 110 кВ и выше имеют более высокие технические и экономические показатели по сравнению с конструкцией реактора, изображенного на рис. 21-5.

Рис. 21-5. Масляный реактор.

21-3. Сдвоенные реакторы

а) **Принцип работы.** Стремление к уменьшению падения напряжения в номинальном режиме, упрощению и удешевлению распределительного устройства привело к созданию сдвоенных реакторов.

На рис. 21-6, а показана схема, когда каждая отходящая линия имеет свой реактор, рассчитанный на номинальный ток линии. Каждая трехфазная группа реакторов размещается в специальной ячейке распределительного устройства.

На рис. 21-6, б приведена схема со сдвоенным реактором. Реакторы соседних ветвей сближены так, что между ними существует сильная магнитная связь. Совмещение в одном реакторе двух уменьшает габариты аппарата, не требует двух ячеек для размещения реакторов, удешевляет и упрощает распределительное устройство.

При нормальном режиме магнитные поля реакторов направлены встречно. В результате индуктивное сопротивление ветви падает из-за размагничивающего действия второй половины реактора. Соответственно уменьшается падение напряжения на ветви реактора. Падение

напряжения на ветви реактора ΔU_v при номинальном токе равно:

$$\Delta U_v = I_{н.в} (X_{р.в} - X_M) = I_{н.р} X_{р.в} \times \\ \times \left(1 - \frac{X_M}{X_{р.в}}\right) = I_{н.р} X_{р.в} (1 - k),$$

где $X_{р.в}$ — сопротивление ветви реактора;
 $X_M = \omega M$ — сопротивление взаимной индукции
 (M — коэффициент взаимной индуктивности);
 $k = M/L_{р.в}$ — коэффициент связи;
 $L_{р.в}$ — индуктивность одной ветви.

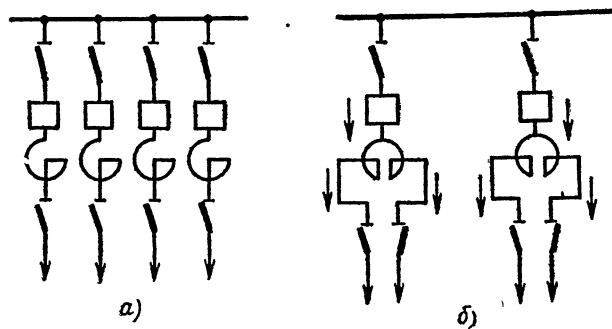


Рис. 21-6. Схема включения одинарных и двойных реакторов.

Чем больше коэффициент связи, тем меньше падение напряжения в ветви. С точки зрения уменьшения падения напряжения в номинальном режиме желательно увеличение коэффициента связи k .

При коротком замыкании на одной из линий падение напряжения на реакторе, обтекаемом током повреждения, в основном определяется сопротивлением ветви реактора $X_{р.в}$. Влияние соседней ветви, обтекаемой номинальным током, мало, так как размагничивающее действие этой ветви незначительно. Для увеличения коэффициента связи реакторы необходимо приблизить друг к другу. При одновременном коротком замыкании на линиях, отходящих от реактора, возникают большие электродинамические силы между ветвями реактора, из-за того что, во-первых, реакторы близко расположены друг к другу и, во-вторых, возрастает ток короткого замыкания, так как падает реактивное сопротивление ветвей.

Если первая ветвь реактора разомкнута, а во второй проходит ток короткого замыкания, то в реакторе первой ветви наводится э. д. с., равная $E = I_k k X_{p.в.}$. На отключенном выводе реактора потенциал равен сумме этой э. д. с. и напряжения сети. В предельном случае напряжение на этом выводе может удвоиться [Л. 1-8].

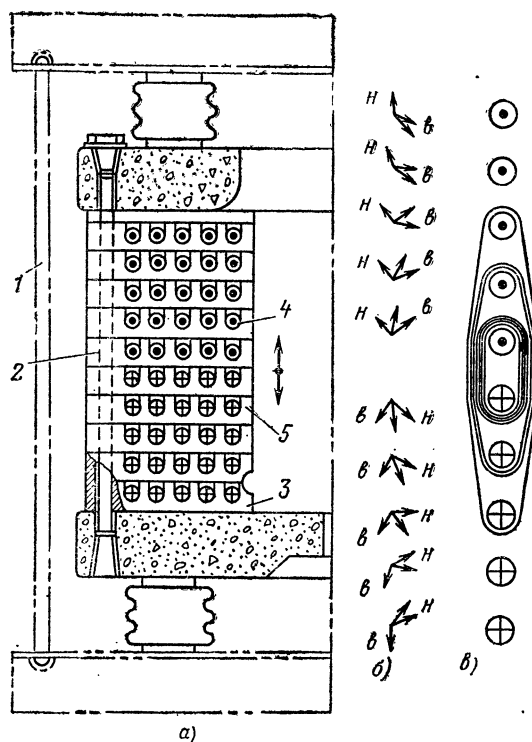


Рис. 21-7. Направление сил, действующих на витки сдвоенного реактора.

Для ограничения перенапряжений и электродинамических сил коэффициент связи берется в пределах от 0,3 до 0,5.

б) Конструкция и основные параметры сдвоенного реактора. Исследования, проведенные в [Л. 21-1], показали, что бетонные сдвоенные реакторы без применения специальных мер разрушались при коротком замыкании в обеих ветвях.

Большую электродинамическую стойкость имеет реактор сборной конструкции (рис. 21-7, а). Обмотка реактора уложена на изо-

ляционных прокладках 3. Стяжка реактора осуществляется с помощью металлических стержней 1 и стержней 2 из изоляционного материала. Рассмотрим силы, действующие на витки (рис. 21-7, б).

Векторы, помеченные буквой *n*, обозначают силу взаимодействия витка с нижней частью реактора. Векторы, помеченные буквой *в*, — силы, действующие на виток со стороны верхней части реактора. Векторы без пометки являются результирующей силой.

Наибольшим отталкивающим силам подвергаются ряды 4 и 5, расположенные близко друг к другу. По мере удаления рядов друг от друга направление действующих сил меняется (силы, действующие на витки крайних рядов).

Для получения необходимой электродинамической стойкости близлежащие ряды ветвей реактора бандажируются прочной стеклянной лентой, как это показано на рис. 21-7, в.

Расчет динамической стойкости сдвоенных реакторов дан в [Л. 21-1].

Основными параметрами сдвоенного реактора являются:

1. Номинальный длительный ток каждой ветви.
2. Индуктивное сопротивление (в процентах) одной ветви (при отсутствии тока в другой)

$$x_{p.v} \% = \frac{I_{н.р} X_{p.v} \sqrt{3}}{U_n} 100\%.$$

$$3. \text{ Коэффициент связи } k = \frac{\omega M}{X_{p.v}} = \frac{M}{L_{p.v}}.$$

4. Электродинамическая стойкость для случая, когда ток протекает только в одной цепи и когда ток короткого замыкания протекает в противоположном направлении по обеим ветвям. Как правило, во втором случае ударный ток динамической стойкости в 2—3 раза меньше, чем в первом.

5. Термическая стойкость для одной ветви.
6. Активные потери для одной ветви.

Глава двадцать вторая

РАЗРЯДНИКИ

22-1. Назначение разрядников и требования к ним

Прочность электрической изоляции аппаратов и оборудования может быть снижена, если ограничить величину возникающих перенапряжений.

Одной из радикальных мер, позволяющих снизить перенапряжения, является установка разрядника, который присоединяется между потенциальным выводом оборудования и землей.

Основным элементом разрядника является искровой промежуток. Вольт-секундная характеристика

ка этого промежутка (кривая 2) должна лежать ниже, чем характеристика защищаемого оборудования (кривая 1) (рис. 22-1). При появлении перенапряжения промежуток должен пробиться раньше, чем изоляция защищаемого оборудования. После пробоя линия заземляется через сопротивление разрядника или накоротко. При этом напряжение на линии определяется током I ,

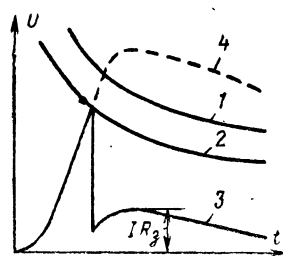


Рис. 22-1. Согласование характеристик разрядника и защищаемого оборудования.

проходящим через разрядник, сопротивлениями разрядника и заземления R_z . Чем меньше эти сопротивления, тем лучше ограничиваются перенапряжения, т. е. больше разница между возможным (кривая 4) и ограниченным разрядником перенапряжением (кривая 3).

Напряжение на разряднике при протекании импульсного тока данной величины и формы называется остаточным напряжением. Чем меньше это напряжение, тем лучше качество разрядника.

После того как импульсный ток проходит через разрядник, искровой промежуток оказывается ионизированным и он легко пробивается номинальным фазным напряжением. Возникает короткое замыкание на землю, и через разрядник протекает ток промышленной частоты, который называется сопровождающим. В связи с изменением режима работы установки сопровождающий ток может изменяться в широких пределах.

Для того чтобы избежать выключения оборудования от релейной защиты, этот ток должен быть отключен разрядником в возможно малое время (порядка полупериода промышленной частоты).

К разрядникам предъявляются следующие основные требования.

1. Вольт-секундная характеристика разрядника должна идти ниже, чем характеристика защищаемого объекта. Характеристика разрядника должна быть возможно пологой.

2. Искровой промежуток разрядника должен иметь определенную гарантированную электрическую прочность при промышленной частоте (50 Гц) и при им-

пульсах. Вентильный разрядник, предназначенный для защиты от атмосферных перенапряжений, не должен срабатывать при внутренних перенапряжениях.

3. Остаточное напряжение на разряднике, характеризующее его ограничивающую способность, не должно превышать величин, которые опасны для изоляции оборудования.

4. Сопровождающий ток частотой 50 Гц должен отключаться за малое время в возможно широком диапазоне токов.

5. Разрядник должен допускать большое число срабатываний без осмотра и ремонта.

22-2. Трубчатые разрядники

Разрез трубчатого разрядника показан на рис. 22-2. Для того чтобы разгрузить изоляционный материал разрядника от электрического поля, при нормальной работе установки он отделен от линии воздушным промежутком s_2 . Второй электрод разрядника заземляется. При появлении перенапряжения пробиваются промежутки s_1 и s_2 и импульсный ток отводится в землю. После прохода импульсного тока течет сопровождающий ток промышленной частоты. В промежутке s_1 между электродами 2 и 3 дуга загорается в узком канале обоймы 1 из газогенерирующего материала — винипласта или фибры. Внутри трубки поднимается давление. Газы могут выходить через отверстие в кольцевом электроде 3.

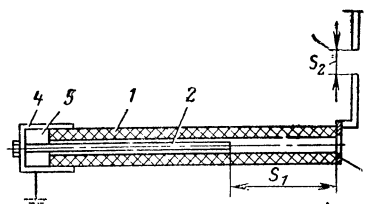


Рис. 22-2. Трубчатый разрядник.

При прохождении тока через нуль происходит гашение дуги под действием эффективного охлаждения промежутка s_1 газами, выходящими из разрядника.

Для улучшения гашения дуги в заземленном электроде 4 разрядника имеется буферный объем 5, где накапливается энергия в виде потенциальной энергии сжатого газа. При проходе тока через нуль создается дутье из буферного объема, что способствует эффективному гашению дуги (см. § 19-3).

Предельная величина отключаемого тока промышленной частоты определяется механической прочностью трубки (для фибробакелитовой трубки 10 кА, для винипластовой, упрочненной стеклотканью на эпоксидной смоле — 20 кА).

Минимальный ток определяется гасящей способностью трубки. Чем меньше диаметр выхлопного канала, чем больше его длина, тем меньше нижний предел отключаемого тока. Однако при протекании большого тока возникает высокое давление в трубке. При недостаточной механической прочности наступает разрушение разряд-

ника. Поэтому решающую роль для трубчатого разрядника играет его механическая прочность. До появления винипласта в качестве материала для разрядников применялась фибра. Фибровая трубка размещалась в бумажно-бакелитовой. Последняя увеличивала механическую прочность. Однако бакелит на открытом воздухе работает плохо, и требуется тщательная окраска бакелитовой трубки специальным лаком, защищающим трубку от воздействия атмосферы.

При маркировке разрядника рядом с обозначением его типа ставится дробь. В числителе — номинальное напряжение, в знаменате-

ле — отключаемые токи. Так, например, разрядник РТ $\frac{35}{0,8-5}$ расшифровывается как разрядник трубчатый фибровый напряжением 35 кВ, отключаемые токи в пределах 800—5000 А.

Защитное действие разрядника наглядно поясняется рис. 22-1. В момент пересечения кривой 4 с вольт-секундной характеристикой разрядника 2 наступает пробой промежутка и через него протекает импульсный ток I , который на сопротивлении заземления R_z создает падение напряжения IR_z .

Более совершенными являются разрядники РТВ (разрядник трубчатый винипластовый). Винипласт обладает высокой механической прочностью, прекрасно работает на открытом воздухе без всяких покрытий, имеет высокую газогенерирующую способность.

Наибольший отключаемый ток этого разрядника доведен до 20 кА.

Работа трубчатого разрядника сопровождается сильным звуковым эффектом и выбросом газов. Так, разрядник РТВ-110 имеет зону выброса в виде конуса с диаметром 3,5 и высотой 2,2 м. При установке разрядников необходимо предусмотреть, чтобы в эту зону не попадали элементы установки, находящиеся под высоким потенциалом.

Защитная характеристика разрядника в значительной степени зависит от вольт-секундной характеристики промежутка между электродами. В трубчатом разряднике промежуток образован стержневыми электродами, имеющими крутую вольт-секундную характеристику из-за большой неоднородности электрического поля. Электрическое поле в аппаратах и оборудовании стремятся сделать равномерным, так как в этом случае полнее удастся использовать изоляционный материал и уменьшить габариты и массу оборудования. При равномерном поле вольт-секундная характеристика получается пологой, практически мало зависимой от времени. В связи с этим трубчатые разрядники, имеющие крутую вольт-секундную характеристику, непригодны для защиты подстанционного оборудования. Обычно с их помощью защищается только линейная изоляция. При выборе трубчатого разрядника необходимо рассчитать возможный минимальный и максимальный ток короткого замыкания и по этим токам выбрать соответствующий разрядник. Номинальное напряжение разрядника должно соответствовать номинальному напряжению сети. Размеры внутреннего s_1 и внешнего s_2 промежутков (рис. 22-2) выбираются по специальным таблицам [Л. 4-6].

22-3. Вентильные разрядники

Разрез разрядника типа РВС-10 (разрядник вилитовый станционный на 10 кВ) показан на рис. 22-3, а. Основными элементами являются вилитовые кольца 6, искровые промежутки 2 и рабочие ре-

зисторы 4. Эти элементы расположены внутри фарфорового кожуха 1, который с торцов имеет специальные фланцы 3. С помощью этих фланцев осуществляется крепление и присоединение разрядника.

Особое внимание уделяется герметизации внутренней полости. Сами рабочие резисторы 4 изменяют свои характеристики при увлажнении. Влага, оседая на стенках и деталях внутри разрядника, ухудшает его изоляцию, создает возможность перекрытия. Герметизация достигается с помощью пластин 5, закрывающих торцы разрядника. Эти пластины привинчиваются к фланцам, между пластинами и фланцами ставятся резиновые прокладки 7.

Работа разрядника протекает в следующем порядке.

При появлении перенапряжения пробивается искровой промежуток и ток через рабочие резисторы уходит в землю.

Рабочие резисторы ограничивают сопровождающий ток и создают условия, при которых дуга с этим током может быть погашена единичными искровыми промежутками (рис. 22-3, б).

После пробоя искровых промежутков напряжение на разряднике равно:

$$U_p = IR_p.$$

Если сопротивление разрядника R_p линейное, то чем больше ток, тем больше напряжение на разряднике, причем оно может стать выше допустимого для оборудования. Чтобы ограничить напряжение, сопротивление R_p берется нелинейным, причем чем больше ток, тем меньше должно становиться сопротивление. Зависимость между напряжением и током можно в этом случае выразить формулой

$$U_p = AI^\alpha,$$

где A — постоянная, характеризующая напряжение на сопротивлении при токе 1 А;

α — показатель нелинейности. При $\alpha=0$ имеем идеальный случай, когда падение напряжения не зависит от величины тока.

Эти разрядники получили название *вентильных*, потому что при импульсных токах их сопротивление резко падает, что дает возможность пропустить большой ток при относительно небольшом падении напряжения на сопротивлении.

В настоящее время в качестве нелинейного материала широко применяется разработанный в ВЭИ *вилит*. В области больших токов его степень нелинейности α имеет величину 0,13—0,20. Типичная вольт-амперная характеристика разрядника с вилитовым резистором приведена на рис. 22-4.

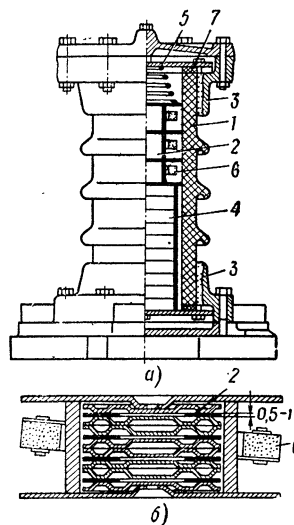


Рис. 22-3. Вилитовый разрядник, $U_n=10$ кВ.

Основу вилита составляют зерна карборунда SiC с небольшим удельным сопротивлением около 10^{-2} Ом·м. На поверхности карборундовых зерен создается пленка окиси кремния SiO_2 толщиной 10^{-7} м. Сопротивление этой пленки зависит от приложенного к ней напряжения. При небольших напряжениях удельное сопротивление составляет 10^4 — 10^6 Ом·м. При увеличении приложенного напряжения сопротивление пленки резко уменьшается и падение напряжения ограничивается. Сопротивление в этом случае определяется в основном зернами карборунда.

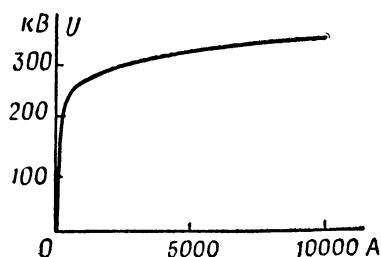


Рис. 22-4. Вольт-амперная характеристика вилитового резистора.

Рабочие резисторы изготавливаются в виде дисков диаметром 0,1—0,15 м и высотой (20—60) 10^{-3} м. Зерна карборунда связываются в диск с помощью жидкого стекла, которое после обжига крепко схватывает зерна между собой.

Вилит очень гигроскопичен. Для защиты от влаги цилиндрическая поверхность покрывается изолирующей обмазкой.

Торцевые поверхности металлизуются. Эти по-

верхности являются контактами диска.

В разряднике обычно ставится несколько дисков, соединенных последовательно (на рис. 22-3, а изображено 10 дисков). При наличии дисков остающееся напряжение соответственно увеличивается:

$$U_{\text{ост}} = nAI^{\alpha}.$$

Для уменьшения остающегося напряжения число дисков n должно быть возможно меньше.

При прохождении тока в дисках выделяется тепло и повышается их температура. Если эта температура превысит определенное значение, диски потеряют свои вентильные свойства и разрядник выйдет из строя. При протекании импульсных токов нагрев резисторов мал, несмотря на большой ток, так как длительность его протекания составляет несколько десятков микросекунд. После одиночного импульса резистор успевает остыть. При протекании тока промышленной частоты длительность воздействия резко возрастает (1 полупериод равен 10 000 мкс). Поэтому при длительном протекании даже небольшого тока происходит разрушение разрядника.

Предельный ток диска диаметром 100 мм равен 10 кА при длительности 40 мкс. Если ток имеет прямоугольную форму импульса с длительностью 2000 мкс, то допустимый ток падает до 150 А. Такие токи диск без повреждения пропускает 20—30 раз [Л.4-6].

После прохождения импульсного тока через разрядник начинает протекать ток короткого замыкания промышленной частоты. По мере приближения тока к нулевому значению сопротивление вилита резко увеличивается, что ведет к искажению формы кривой тока: снижаются ток и скорость подхода тока к нулю по сравнению с кривой неискаженной синусоидальной формы. Это значительно об-

легчает процесс гашения дуги, так как уменьшается мощность, подводимая к дуге в момент, близкий к нулю тока [Л.4-2]. Активное сопротивление разрядника ограничивает ток и приближает коэффициент мощности к единице, что ведет к уменьшению восстанавливающегося напряжения промышленной частоты (§ 4-6). Это позволяет погасить дугу в искровых промежутках без применения каких-либо специальных дугогасительных устройств.

Устройство единичного искрового промежутка вентильного разрядника ясно из рис. 22-3, б.

Форма электродов обеспечивает равномерное электрическое поле, что позволяет получить пологую вольт-секундную характеристику. Расстояние между электродами $(0,5-1) 10^{-3}$ м.

Ввиду затруднения возникновения заряда в закрытом объеме при малом времени импульса приняты меры для облегчения ионизации. Между электродами помещается миканитовая прокладка. Так как диэлектрическая проницаемость воздуха значительно меньше, чем у слюды, то на границе со слюдой, в воздухе, прилегающем к электродам, возникают высокие градиенты, которые вызывают начальную ионизацию воздуха. Образующиеся электроны приводят к быстрому формированию разряда в центре основного воздушного промежутка.

Промежутки соединяются в блоки (рис. 22-3, б). Обычно разрядник имеет несколько таких блоков. Вольт-секундная характеристика последовательно соединенных единичных промежутков позволяет получить пологую защитную характеристику.

Известно, что после прохода тока через нуль около каждого катода восстанавливается почти мгновенно электрическая прочность (§ 4-8). Если восстанавливающееся напряжение меньше электрической прочности, то дуга гаснет. Этот эффект особенно хорошо проявляется при небольших токах (до 100 А), когда термоэлектронной эмиссией с электродов можно пренебречь. Экспериментально установлено, что единичный промежуток способен отключить сопровождающий ток с амплитудой 80—100 А при действующем значении восстанавливающегося напряжения 1—1,5 кВ. Число единичных промежутков выбирается исходя из этого напряжения.

Количество дисков рабочего резистора должно быть таким, чтобы максимальное значение тока не превысило 80—100 А. При этом гашение дуги обеспечивается за один полупериод.

Для того чтобы обеспечить равномерную нагрузку единичных промежутков при промышленной частоте, они снабжены шунтирующими нелинейными резисторами б (рис. 22-3). Сопротивление этого резистора берется возможно большим, дабы сохранить неравномерное распределение при высокой частоте (импульсах). Термическая стойкость дисков рассчитана на пропускание сопровождающего тока в течение одного-двух полупериодов.

Внутренние перенапряжения имеют низкочастотный характер и могут длиться до 1 с. Вследствие малой термической стойкости вилит не может быть использован для ограничения внутренних перенапряжений. Для ограничения внутренних перенапряжений в ВЭИ разработан новый материал тервит, обладающий большой термической стойкостью. Коэффициент нелинейности тервита α больше, чем у вилита, что значительно увеличивает остающееся напряжение и делает этот материал непригодным для защиты от атмосферных перенапряжений. Поэтому для защиты от внутренних и внешних перенапряжений разрядник выполняется комбинированным. За-

щита от внешних перенапряжений осуществляется вилитовыми дисками, а от внутренних — тервитовыми [Л.4-6].

Для того чтобы предотвратить срабатывание вентильных разрядников от внутренних перенапряжений, нижний предел напряжения срабатывания при промышленной частоте должен быть не менее чем в 2,7 раза больше фазного напряжения [Л. 4-6].

Вентильный разрядник работает бесшумно. Для фиксации числа срабатываний устанавливается специальный регистратор, который включается между нижним выводом разрядника и заземлением. Наиболее надежным является электромагнитный регистратор, якорь которого при прохождении импульсного тока притягивается и воздействует на храповой механизм счетного устройства.

В другом регистраторе [Л.3-2] при прохождении импульсного тока сгорает плавкая вставка и счетный механизм поворачивается на одно деление.

Для улучшения защитных характеристик разрядника необходимо уменьшать остающееся напряжение, т. е. число дисков. При этом увеличивается сопровождающий ток.

Простые промежутки (рис. 22-3, б) не могут отключить токи 200—250 А. В этом случае для гашения применяются камеры магнитного дугтя. Магнитное поле создается постоянным магнитом. Дуга, возникающая в искровом промежутке, подвергается воздействию магнитного поля и загоняется в узкую щель, стенки которой выполнены из керамики (§ 19-8). На этом принципе созданы разрядники на напряжение до 500 кВ. Увеличение диаметра дисков до 150 мм позволяет поднять их термическую стойкость. В результате магнитно-вентильные разрядники в большинстве случаев используются и для ограничения внутренних перенапряжений [Л.4-6].

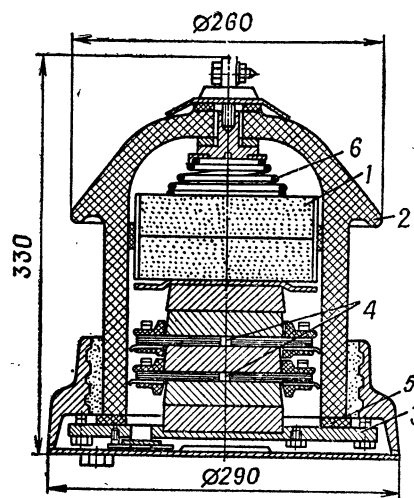


Рис. 22-5. Вилитовый разрядник постоянного тока, $U_n = 3000$ В.

22-4. Разрядники постоянного тока

Для защиты установок постоянного тока от перенапряжений могут быть применены вентильные разрядники. Однако гашение дуги сопровождающего тока здесь сопряжено с большими трудностями, поскольку погасить дугу постоянного тока значительно сложнее, чем переменного. Если использовать околоэлектродное падение напряжения в искровом промежутке, то потребуется очень большое число промежутков, так как на каждой паре электродов напряжение не должно превышать 20—30 В.

Для гашения дуги целесообразно использовать

магнитное дутье. Магнитное поле создается с помощью постоянных магнитов. Это поле, взаимодействуя с дугой, создает электродинамическую силу, которая с большой скоростью перемещает дугу в узкой щели из дугостойкого изоляционного материала. В результате интенсивного охлаждения дуги ее сопротивление увеличивается и ток уменьшается до нуля (§ 19-8).

Вилитовый разрядник для сети с напряжением 3000 В показан на рис. 22-5. Вверху расположен рабочий резистор 1, состоящий из двух вилитовых дисков. Резистор соединяется с двумя искровыми промежутками 4 с магнитным гашением дуги. Надежное соединение промежутков и дисков осуществляется с помощью пружины 6, которая является одновременно токоведущим элементом. Основные элементы разрядника располагаются в фарфоровом кожухе 2, который закрыт снизу крышкой 3. Герметизация осуществляется резиновой прокладкой 5.

Глава двадцать третья

ТРАНСФОРМАТОРЫ ТОКА

23-1. Общие сведения

Для удобства и безопасности измерения ток установок высокого напряжения с помощью трансформатора тока изменяется до стандартного значения 5 А или 1 А. Измерительные приборы и реле выполняются на эти токи и включаются в цепь вторичной обмотки трансформатора тока, один вывод которой обязательно заземляется. В случае повреждения изоляции трансформатора приборы и реле остаются под потенциалом земли. Схема включения трансформатора тока показана на рис. 23-1.

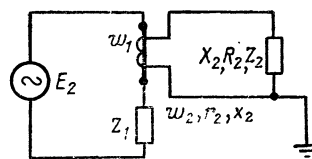


Рис. 23-1. Схема включения трансформатора тока.

Отличительной особенностью режима работы трансформатора тока является то, что первичный ток не зависит от режима работы его вторичной цепи. Будет ли вторичная цепь замкнута накоротко или разомкнута, первичный ток остается неизменным. Дело в том, что ток в первичной обмотке определяется сопротивлением нагрузки Z_1 , которое на несколько порядков выше, чем входное сопротивление трансформатора со стороны первичной обмотки при любом значении сопротивления Z_2 . Во вторичной цепи предохранитель не ставится, так как раз-

рыв этой цепи является аварийным режимом для трансформатора тока (§ 23-4).

Основными параметрами трансформаторов тока являются следующие:

Номинальное напряжение — линейное напряжение системы, в которой трансформатор тока должен работать. Это напряжение определяет изоляцию между первичной обмоткой, находящейся под высоким потенциалом, и вторичной, один конец которой заземлен.

Номинальный первичный и вторичный токи — это длительные токи, которые аппарат может пропускать. Трансформаторы тока обычно имеют запас по нагреву и позволяют длительно пропускать токи, которые примерно на 20% выше номинального значения.

Номинальный коэффициент трансформации — отношение номинального первичного тока к номинальному вторичному току:

$$k_n = I_{1н}/I_{2н}.$$

Действительный коэффициент трансформации не равен номинальному вследствие потерь в трансформаторе. Различают токовую погрешность и угловую.

Токовая погрешность в процентах определяется выражением

$$\Delta I\% = \frac{k_n I_2 - I_1}{I_1} 100 = \frac{I_2 - I_1'}{I_1'} 100, \quad (23-1)$$

где I_2 — вторичный ток;

I_1' — первичный приведенный ток.

В реальном трансформаторе вторичный ток сдвинут по фазе относительно первичного на угол, отличный от 180° . Для отсчета угловой погрешности вектор вторичного тока поворачивают на 180° . Угол между этим вектором и вектором первичного тока называют угловой погрешностью. Если перевернутый вектор вторичного тока опережает первичный ток, то погрешность положительная, если отстает, то погрешность отрицательная. Погрешность по углу измеряется в минутах.

В зависимости от погрешности по ГОСТ 7746-68 различают классы точности 0,2; 0,5; 1; 3; 10. Класс точности говорит о допустимой погрешности по току в процентах при номинальных условиях $z_2 = z_{2н}$.

Наряду с токовой и угловой погрешностью ГОСТ 7746-68 вводит полную погрешность ε (%), характеризующую относительный намагничивающий ток:

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

где I_1 — действующее значение первичного тока;
 i_2 — мгновенное значение вторичного тока;
 i_1 — мгновенное значение первичного тока;
 T — период частоты переменного тока (0,02 с).

Номинальная нагрузка трансформатора тока — это сопротивление нагрузки в омах, при котором трансформатор работает в своем классе точности при $\cos \varphi_{2H} = 0,8$. Иногда применяется понятие номинальной мощности

$$P_{2H} = I_{2H}^2 z_{2H}.$$

Поскольку ток I_{2H} стандартизован, то номинальное сопротивление нагрузки однозначно определяет и номинальную мощность трансформатора.

Номинальная предельная кратность — это кратность первичного тока по отношению к его номинальному значению, при которой погрешность по току достигает 10%. Нагрузка и ее коэффициент мощности должны быть номинальными.

Максимальная кратность вторичного тока — это отношение наибольшего вторичного тока к его номинальному значению при номинальной вторичной нагрузке. Максимальная кратность вторичного тока определяется насыщением магнитопровода, когда дальнейшее возрастание первичного тока не ведет к возрастанию потока.

Трансформаторы тока обтекаются током короткого замыкания, и его обмотки подвергаются воздействию больших токов. Динамическая стойкость — (кратность) определяется отношением допустимого ударного тока к амплитуде номинального первичного тока. Термическая стойкость (кратность) задается отношением допустимого в течение 1 с тока короткого замыкания к номинальному значению первичного тока.

Так как ток первичной обмотки задается сетью, то наибольшим термическим и динамическим воздействиям

Для номинальных токов можно было бы написать:

$$\frac{I_{1H}}{I_{2H}} = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{\omega_{2H}}{\omega_{1H}} = k_H. \quad (23-3)$$

В этом случае токовая погрешность в соответствии с (23-1) равна нулю. В действительности $I_0 \neq 0$.

Если принять, что $\omega_{2H}/\omega_{1H} = \omega_2/\omega_1$, то из уравнения (23-1) можно получить:

$$\Delta I \% = - \frac{I_1 \omega_1 - I_2 \omega_2}{I_1 \omega_1} 100 \%.$$

Учитывая, что угол δ мал, за разницу $I_1 \omega_1 - I_2 \omega_2$ можно взять проекцию вектора $I_0 \omega_1$ на горизонтальную ось (отрезок AC). Таким образом, погрешность по току пропорциональна отрезку AC . Погрешность можно рассчитать по (23-4) и (23-5), вывод которых приведен в [Л. 23-1].

Погрешность по току

$$\Delta I \% = - \frac{I_0 \omega_1}{I_1 \omega_1} \sin(\alpha + \psi) 100 \%. \quad (23-4)$$

Погрешность по углу в угловых минутах

$$\delta' = 3440 \frac{I_0 \omega_1}{I_1 \omega_1} \cos(\alpha + \psi), \quad (23-5)$$

где α — угол между вторичной э. д. с. E_2 и током;

ψ — угол потерь в сердечнике, равный $\arctg(I_{0a}/I_{0p})$.

Чем меньше намагничивающий ток, тем меньше погрешности и по току, и по углу.

Намагничивающий ток связан с напряженностью поля H законом полного тока

$$Hl = I_0 \omega_1, \quad (23-6)$$

где l — средняя длина магнитопровода.

Чем меньше H , тем меньше $I_0 \omega_1$.

Поток Φ_0 определяет вторичную э. д. с.

$$E_2 = 4,44 f \omega_2 \Phi_0.$$

Следовательно, чем больше E_2 , тем больше поток Φ_0 . С ростом Φ_0 увеличивается H и м. д. с. $I_0 \omega_1$. Для уменьшения погрешности сопротивление вторичной цепи делается возможно меньшим, так как при этом уменьшается $E_2 = I_2 \sqrt{(R_2 + r_2)^2 + (X_2 + x_2)^2}$.

Режим работы трансформатора тока является по существу режимом короткого замыкания.

б) Зависимость погрешности от первичного тока.
В процессе работы установки первичный ток изменяется в очень широких пределах, примерно от 10% I_H до токов короткого замыкания.

Рассмотрим работу трансформатора в зоне номинальных токов. Ради упрощения можно положить в (23-4) $\sin(\alpha + \psi) = 1$. Тогда

$$\Delta I = I_0 \omega_1 / I_1 \omega_1. \quad (23-7)$$

Так как $I_1 \omega_1 \approx I_2 \omega_2$, то

$$\Delta I = I_0 \omega_1 / I_2 \omega_2, \quad (23-8)$$

но

$$I_2 = \frac{E_2}{z_{02}} = \frac{4,44 f \omega_2 B_m S}{z_{02}}, \quad (23-9)$$

где

$$z_{02} = (R_2 + r_2) + j(X_2 + x_2).$$

Подставив (23-6) и (23-9) в (23-8), получим:

$$\Delta I = \frac{H l z_{02}}{4,44 f \omega_2^2 B_m S}; \quad (23-10)$$

поскольку $B_m/H = \mu_a$, то

$$\Delta I = \frac{l z_{02}}{4,44 f \omega_2^2 \mu_a S}. \quad (23-11)$$

При изменении первичного тока все величины остаются постоянными, за исключением проницаемости μ_a .

Если $I_1 \omega_1 \approx I_2 \omega_2$, то

$$I_1 \omega_1 = I_2 \omega_2 = \frac{4,44 f \omega_2^2 S}{z_{02}} B, \quad (23-12)$$

т. е. с ростом первичного тока индукция в сердечнике растет линейно.

Абсолютная магнитная проницаемость материала μ_a и индукция B_m связаны кривой $\mu_a(B_m)$ на рис. 23-3. Для наглядности на этом же рисунке приведена кривая

$B_m(H)$. С ростом первичного тока вначале μ_a увеличивается и погрешность падает. При $B_{\text{опт}}$ погрешность наименьшая. Затем при дальнейшем росте первичного тока проницаемость падает из-за насыщения сердечника, а погрешность ΔI увеличивается.

Трансформатор тока не должен давать больших погрешностей при номинальном токе и при коротком замы-

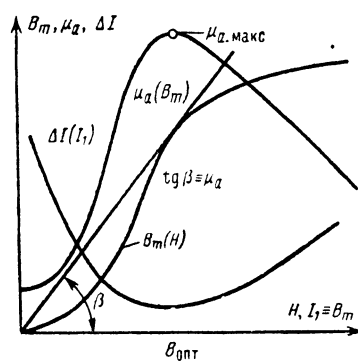


Рис. 23-3. Зависимость погрешности от первичного тока.

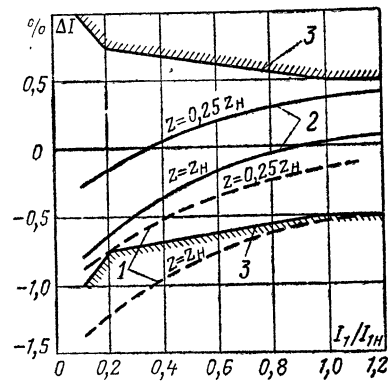


Рис. 23-4. Компенсация погрешности отмоткой вторичных витков.

кании. Так как индукция насыщения лежит в области 2,0 Т, то в некомпенсированных трансформаторах номинальную индукцию выбирают в пределах 0,06—0,1 Т.

При отсутствии компенсации погрешность по току всегда отрицательна и изменяется по U-образной кривой с ростом первичного тока. Аналогично зависит от тока угловая погрешность, но она имеет положительный знак.

Для того чтобы трансформатор удовлетворял определенному классу точности, необходимо, чтобы его погрешность находилась в допустимых пределах. Так, погрешности для трансформатора класса точности 0,5 должны лежать внутри области, ограниченной ломаными линиями 3 (рис. 23-4), при нагрузке в пределах $(0,25—1) z_{2н}$ и $\cos \varphi_2 = 0,8$.

Классы точности и нормированные погрешности приведены в [Л. 23-1]. Класс точности трансформатора определяется его погрешностью в процентах при первичном токе $(100—120\%) I_{1н}$.

В рабочем диапазоне индукций (до 0,1 Т) кривая намагничивания аппроксимируется уравнением [Л. 23-1]

$$H = 0,82B_m^{0,6}. \quad (23-13)$$

Обозначим кратность первичной, а следовательно, и вторичной м. д. с. через n . Тогда

$$\Delta I = \frac{Hl}{nI_{1H}w_1} = \frac{l}{nI_{1H}w_1} 0,82B_m^{0,6}. \quad (23-14)$$

Величину B_m выразим через ток I_{2H}

$$B_m = \frac{nI_{2H}z_{02}}{4,44fw_2S} = \frac{nI_{2H}^2z_{02}}{4,44fI_{2H}w_2S} = \frac{nI_{2H}^2z_{02}}{4,44fI_{1H}w_1S}. \quad (23-15)$$

Подставив (23-15) в (23-14), получим:

$$\begin{aligned} \Delta I &= \frac{0,82l}{nI_{1H}w_1} \left(\frac{nI_{2H}^2z_{02}}{4,44fI_{1H}w_1S} \right)^{0,6} = \\ &= \frac{0,82lI_{2H}^{1,2}z_{02}^{0,6}}{(4,44f)^{0,6}n^{0,4}(I_{1H}w_1)^{1,6}S^{0,6}}. \end{aligned} \quad (23-16)$$

Из уравнения (23-16) следует, что погрешность по току резко возрастает при уменьшении номинальной первичной м. д. с. I_1w_1 .

Наиболее совершенной конструкцией является одновитковый трансформатор тока, когда первичной обмоткой является шина или стержень (рис. 23-8). Однако для трансформатора высокого класса точности (класс 1, 0,5 и т. д.) необходимо для получения малой погрешности иметь первичную номинальную м. д. с. не ниже определенной величины. Для современных магнитных материалов и разработанных конструкций при классе точности 0,5 минимальный ток одновиткового трансформатора должен быть не менее 600—900 А. Если первичный ток менее 600 А, то первичная обмотка выполняется многовитковой.

в) **Влияние сопротивления нагрузки.** Увеличение нагрузки z_2 ведет к росту сопротивления z_{02} . В соответствии с (23-16) погрешность возрастает пропорционально $z_{02}^{0,6}$. С целью снижения погрешности необходимо уменьшать активное r_2 и реактивное сопротивление x_2 вторичной обмотки. Следует однако отметить, что при изменении сопротивления нагрузки в пределах номинального значения

$z_{2н}$ абсолютное значение вторичного тока изменяется незначительно. Дело в том, что первичный ток I_1 не зависит от сопротивления z_{02} . При уменьшении сопротивления z_{02} , допустим, в 2 раза, уменьшаются в 2 раза э. д. с. E_2 и индукция B_m . При этом упадут напряженность поля H и м. д. с. $I_0\omega_1$. Вторичный ток немного увеличится, так как уменьшится м. д. с. $I_0\omega_1$:

$$|I_2\omega_2| \approx |I_1\omega_1| - |I_0\omega_1|.$$

г) **Влияние конструктивных параметров.** В соответствии с (23-16) с ростом длины магнитопровода l погрешность пропорционально возрастает. Поэтому длину l стремятся сократить. Увеличение сечения магнитопровода S уменьшает погрешность, однако ΔI уменьшается медленнее, чем растет сечение. Следует также отметить, что с ростом сечения увеличивается длина витка обмотки и ее активное сопротивление, что вызывает некоторое увеличение погрешности. Поэтому увеличение сечения стали не всегда является рациональным.

При прочих равных условиях переход на материал с большей магнитной проницаемостью уменьшает погрешность.

23-3. Компенсация погрешности

а) **Витковая отмотка.** Простейшим методом компенсации погрешности является витковая отмотка. Если $\omega_2 = \omega_{2н} = \omega_{1н}k_n$, то погрешность всегда имеет отрицательный знак и определяется уравнением (23-4). Если число витков вторичной обмотки взять меньше, чем $\omega_{2н}$, то искусственно вводится положительная погрешность, которая частично компенсирует отрицательную.

Дело в том, что при $\omega_2 < \omega_{2н}$ коэффициент трансформации становится меньше, а вторичный ток $I_2 = I_1\omega_1/\omega_2$ может быть даже больше, чем $I_{2н} = I_1\omega_1/\omega_{2н}$. Таким образом создается положительная погрешность по току.

Токовая погрешность с учетом отмотки вторичных витков определяется по формуле (23-17), приведенной в [Л. 23-1]:

$$\Delta I\% = \left[-\frac{I_0\omega_1}{I_1\omega_1} \sin(\alpha + \psi) - \frac{\omega_2 - \omega_{2н}}{\omega_{2н}} \right] 100\%. \quad (23-17)$$

Второй член в скобках является витковой поправкой.

При отмотке вторичных витков кривая погрешности перемещается параллельно самой себе в область меньших погрешностей и при большом токе может быть даже положительной. Если вторичная нагрузка мала ($0,25 z_{2н}$), то погрешность может даже выйти из допустимых пределов данного класса.

На рис. 23-4 кривые 1 относятся к трансформатору без компенсации, а кривые 2 — к тому же трансформатору после отмотки вторичных витков.

Наибольшую компенсацию необходимо давать в области малых первичных токов. Однако при этом в области номинальных токов при малых нагрузках появляется положительная погрешность, выходящая за пределы класса. Поэтому витковая поправка не всегда дает желательный результат, что является недостатком этого метода. На угловую погрешность отмотки вторичных витков не оказывает влияния.

Для уменьшения угловой погрешности можно применить короткозамкнутый виток. Введение такого витка вызывает увеличение реактивного магнитного сопротивления (§ 5-3), что ведет к возраста-

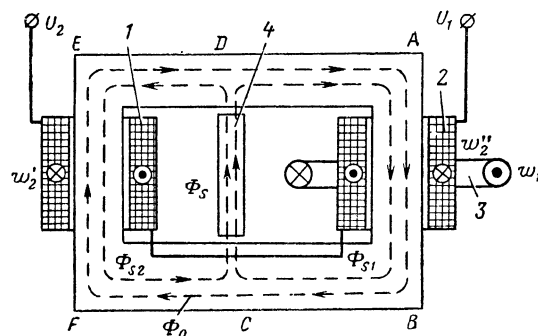


Рис. 23-5. Трансформатор тока с компенсацией по методу МЭИ.

нию угла потерь ψ (рис. 23-2). При этом угловая погрешность падает, а погрешность по току увеличивается. Такую компенсацию целесообразно применять в случае, когда по токовой погрешности имеется запас.

Помимо витковой отмотки, существует еще ряд конструктивных решений компенсаций [Л. 23-1]. Широкое применение получил метод шунта (метод МЭИ). Этот метод был предложен Г. Н. Петровым и С. С. Окунем [Л. 23-2] и заключается в повышении магнитной проницаемости путем подмагничивания магнитопровода полями рассеяния. Принцип его поясняется рис. 23-5.

Вторичная обмотка (зажимы U_1 , U_2) разбита на примерно равные части 1 и 2. Первичная обмотка 3, имеющая w_1 витков, расположена на правом стержне. Внутри магнитопровода располагается магнитный шунт 4. Части вторичных обмоток 1 с числом витков w_2' и 2 с числом витков w_2'' включены согласно.

Если пренебречь намагничивающим током, то можно написать:

$$I_1 w_1 + I_2 w_2' + I_2 w_2'' = 0. \quad (23-18)$$

Распределение вторичной обмотки по двум стержням создает увеличенные потоки рассеяния. Установка шунта 4 способствует значительному возрастанию этих потоков. На левом стержне при прохождении тока I_2 создается м. д. с. $I_2 w_2'$. Эта м. д. с. создает поток рассеяния Φ_{s2} , который замыкается через шунт. На правом стержне действует м. д. с., равная $I_1 w_1 - I_2 w_2''$. Это, по сути дела, избыток пер-

вичной м. д. с. Под действием этой м. д. с. возникает поток рассеяния Φ_{s1} , который также проходит через шунт 4. Выбрав соответствующим образом магнитное сопротивление шунта, можно даже при малых первичных токах перевести рабочую точку в область с высоким μ и повысить магнитное сопротивление сердечника. В результате м. д. с., необходимая для проведения потока Φ_0 , резко падает, что ведет к уменьшению как токовой, так и угловой погрешностей трансформатора. При токах, близких к номинальным и выше их, происходит насыщение шунта и компенсация перестает действовать.

Наряду с повышением магнитной проницаемости сердечника положительную роль в повышении точности играет также уменьшение индуктивного сопротивления вторичной обмотки в результате так называемого двойного рассеяния [Л. 23-2].

В заключение следует отметить, что создание высококачественных магнитных материалов типа стали марки Э310, пермаллоя и др. с высокой проницаемостью и малыми активными потерями позволяет построить малогабаритные трансформаторы тока с малой погрешностью и без применения компенсации.

23-4. Режим работы трансформаторов тока

а) Работа трансформатора при коротком замыкании.

При коротком замыкании первичный ток возрастает в десятки или несколько десятков раз. Трансформаторы то-

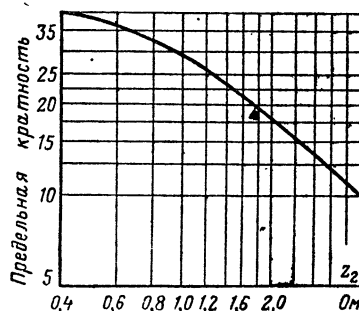


Рис. 23-6. Зависимость предельной кратности от вторичной нагрузки.

ка являются одним из основных звеньев релейной защиты. Поэтому трансформатор тока не только должен быть термически и динамически стойким, но и давать вторичный ток с погрешностью, обеспечивающей нормальную работу системы защиты.

При больших кратностях первичного тока магнитопровод трансформатора начинает работать в зоне насыщения. При этом погрешность резко растет.

Практика показала, что если погрешность достигла 10%, то при дальнейшем возрастании первичного тока

погрешность столь быстро увеличивается, что нормальная работа релейной защиты становится невозможной. Поэтому для трансформаторов тока, работающих в цепях защиты, необходимо, чтобы номинальная предельная (10%) кратность его была выше, чем отношение тока короткого замыкания к номинальному току.

Типичная зависимость номинальной предельной кратности от сопротивления вторичной нагрузки показана на рис. 23-6. Уменьшая величину нагрузки, можно поднимать и номинальную предельную кратность.

Трансформаторы, предназначенные для дифференциальной защиты, выбираются с одинаковой номинальной предельной кратностью. При этом ток небаланса защиты, равный разности вторичных токов трансформаторов (при одинаковом первичном токе), получается небольшим.

Вследствие насыщения сердечника при коротком замыкании кривая вторичного тока сильно искажена.

Приближенно максимальную кратность вторичного тока можно найти по формуле

$$n_{\text{макс}} = \frac{B_s}{B_{\text{мн}}} + (2 \div 3),$$

где B_s — индукция насыщения (для электротехнической стали примерно $B_s = 2 \text{ Т}$); $B_{\text{мн}}$ — амплитуда индукции при номинальном первичном токе.

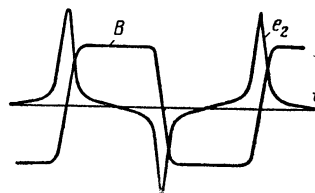
Необходимо отметить, что при наличии апериодической составляющей тока короткого замыкания в магнитопроводе появляется апериодическая составляющая намагничивающего тока, которая в десятки или несколько десятков раз больше, чем периодическая составляющая. Магнитопровод насыщается постоянной составляющей индукции. При этом возникают большие погрешности по току и углу. Современные трансформаторы не могут достаточно точно передать ток во вторичную цепь в самом начале короткого замыкания. Для синхронизированного выключателя, нуждающегося в точном измерении тока, необходимо создание специальных трансформаторов [Л.23-3].

Трансформаторы, имеющие многовитковую первичную обмотку, при коротком замыкании подвергаются и повышенной электрической нагрузке. Дело в том, что индуктивное сопротивление такой обмотки соизмеримо с со-

противлением остальной короткозамкнутой цепи. При этом на обмотку может ложиться существенная часть напряжения источника, вследствие чего возможен пробой межвитковой изоляции.

б) **Режим работы при разомкнутой вторичной обмотке.** В нормальном режиме м. д. с. $I_0\omega_1$ составляет проценты

Рис. 23-7. Изменение индукции B и вторичной э. д. с. e_2 во времени при разомкнутой вторичной обмотке.



или даже доли процента от м. д. с. $I_1\omega_1$. Амплитуда индукции в сердечнике равна всего 0,06—0,1 Т.

При размыкании вторичной цепи размагничивающая вторичная м. д. с. $I_2\omega_2$ пропадает. Поскольку ток в первичной цепи остается неизменным, то первичная м. д. с. будет и намагничивающей. Возрастание в сотни раз м. д. с. приводит к насыщению сердечника и появлению высоких э. д. с. на разомкнутых зажимах обмотки.

Ввиду несинусоидальности потока расчет этой э. д. с. затруднен. Примерные кривые изменения индукции B и вторичной э. д. с. показаны на рис. 23-7. Чем больше первичная номинальная м. д. с. $I_{1н}\omega_1$, тем больше значения пика e_2 . В некоторых случаях этот пик может достигать десятка киловольт. Такое напряжение опасно и для обмоток самого трансформатора, и для обслуживающего персонала. Это напряжение удобно определять по методике, описанной в [Л. 23-1].

При насыщениях сердечника в нем резко возрастают активные потери и он может нагреваться до недопустимых температур, в результате чего возможно воспламенение изоляции обмотки.

Режим разомкнутой вторичной обмотки является для трансформатора тока аварийным. Поэтому при работе с трансформаторами тока и в цепях релейной защиты вторичные зажимы должны быть обязательно закорочены.

23-5. Конструкция трансформаторов тока

В зависимости от числа витков первичной обмотки различают одновитковые и многовитковые трансформаторы тока.

В одновитковом аппарате первичная обмотка может быть выполнена в виде стержня или пакета шин. Примером такого испол-

нения является трансформатор ТПОЛ-10 с литой изоляцией, изображенный на рис. 23-8. Этот трансформатор используется как проходной изолятор при переходе из одного помещения в другое.

Применение литой эпоксидной изоляции позволяет сильно упростить конструкцию и технологию производства. Первичная обмотка — стержень 4, магнитопроводы 1 и крепежное кольцо 3 располагаются в специальной форме, после чего туда заливается жидкая

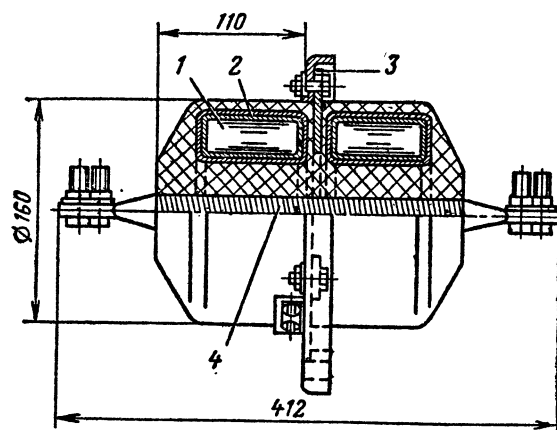


Рис. 23-8. Одновитковый трансформатор тока ТПОЛ-10, $U_n \Rightarrow 10$ кВ.

масса из эпоксидной смолы, пылевидного кварцевого песка и отвердителя. После затвердения и полимеризации изоляционный материал приобретает высокие электрические и механические свойства [Л. 1-6]).

Магнитопровод трансформатора 1, выполненный в виде тора, изготавливается из ленты, свернутой по спирали. На тор наматывается вторичная обмотка 2. Применение тороидального сердечника дает возможность полностью использовать высокие свойства текстурованного материала, например стали марки Э310. Если вторичная обмотка равномерно расположена на магнитопроводе, то индуктивное сопротивление вторичной обмотки равно нулю, что позволяет повысить точность трансформатора тока. Конструкция позволяет легко установить несколько магнитопроводов, каждый из которых имеет различные параметры.

Большим достоинством одновиткового исполнения является его высокая электродинамическая стойкость, так как на первичную обмотку действуют силы только от подводящих шин и соседних фаз.

При трехфазном коротком замыкании между стержнями первичных обмоток соседних фаз возникает электродинамическая сила. Кроме того, на конец стержня передаются силы, действующие на подводящую шину, которая одним своим концом укреплена на ближайшем опорном изоляторе, вторым — на стержне трансформатора тока.

Динамическая стойкость, которая обуславливается заводом-изготовителем, относится обычно к определенному расстоянию между фазами и определенной длине шины, соединяющей опорный изолятор с трансформатором [Л. 3-2].

Недостатком этой конструкции является большая погрешность при малом номинальном первичном токе, поскольку $w_1=1$. Поэтому одновитковые трансформаторы применяются при токах 400 А и более. При первичном токе более 2000 А применяются одновитковые шинные трансформаторы тока. В качестве первичной обмотки используется пакет шин распределительного устройства, который пропускается через окно трансформатора.

Электродинамическая стойкость такого трансформатора заводом не нормируется, поскольку она определяется механической прочностью шин и их креплением.

Одновитковые трансформаторы тока применяются и как встроенные. В этом случае используется токоведущий стержень и изолятор другого аппарата или оборудования (выключателя, силового трансформатора, проходного изолятора и др.). Расположение четырех таких трансформаторов в выключателе показано на рис. 19-2. Аналогично устанавливаются трансформаторы и на других видах оборудования. Применение встроенных трансформаторов тока дает большой экономический эффект.

Встроенные трансформаторы тока работают в тяжелых условиях (возможно отсыревание обмоток, попадание влаги). Поэтому они тщательно пропитываются лаком после изготовления и бандажировки обмоток.

На проходном изоляторе, как правило, устанавливается несколько магнитопроводов, вторичные обмотки которых можно соединять последовательно и параллельно. При последовательном соединении вторичных обмоток коэффициент трансформации не изменяется, так как удваивается число первичных и вторичных витков. Вторичный ток сохраняется, а э.д.с. E_2 удваивается, что дает возможность увеличить в 2 раза вторичную мощность. Для встроенных трансформаторов это очень важно, так как они удалены от реле и измерительных приборов, благодаря чему сопротивление соединяющих проводов получается большим.

При первичных токах до 100 А вторичные обмотки соединяются параллельно, что позволяет получить в нагрузке ток, приближающийся к стандартной величине 5 А при малом токе в первичной цепи.

Наряду с этим вторичные обмотки имеют отпайки, которые позволяют в небольшом диапазоне регулировать коэффициент трансформации. Если номинальный ток, проходящий по первичной обмотке стержня, меньше номинального первичного тока трансформатора, то ток во вторичной цепи можно увеличить путем уменьшения числа витков вторичной обмотки.

При малых первичных токах (ниже 400 А) для получения высокого класса точности приходится применять многовитковую первичную обмотку. В этом случае при любом первичном токе можно получить необходимую для данного класса первичную м.д.с. $I_1 w_1$ за счет увеличения числа первичных витков w_1 . На рис. 23-9 показан многовитковый трансформатор с литой изоляцией. Сердечник 1 прямоугольный, шихтованный; на сердечнике располагается вторичная обмотка 2 катушечного типа. Первичная обмотка 3 выполняется из медной шины и может иметь необходимое число витков. На концах первичной обмотки припаяны зажимы 5. Все детали трансформатора

связаны между собой эпоксидным литьем 4. Выводы вторичных обмоток присоединены к зажимам 6.

При коротком замыкании витки первичной обмотки разрываются электродинамическими силами, что снижает стойкость трансформатора. Кроме того, на первичной обмотке из-за ее относительно большой индуктивности может появиться значительное падение напряжения.

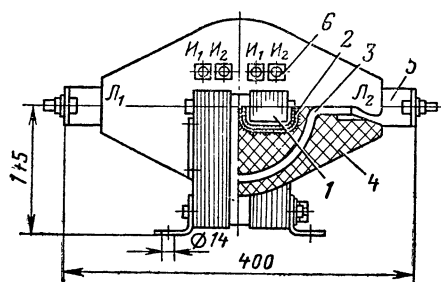


Рис. 23-9. Многовитковый трансформатор тока, $U_n = 10$ кВ.

При напряжении 35 кВ и выше для открытых установок применяются трансформаторы тока с масляной изоляцией. У нас в СССР наибольшее распространение получили трансформаторы восьмерочного типа. Сердечник с обмотками такого трансформатора представлен на рис. 23-10. Торондальные магнитопроводы 1 со вторичными обмотками 2 проходят через окно, образованное первичной обмоткой 4. Первичная об-

мотка 4 выполняется мягким многожильным проводом и обычно имеет несколько параллельных ветвей (на рис. 23-10 две ветви). При переходе с параллельного соединения на последовательное номинальный ток трансформатора уменьшается в 2 раза.

Первичная обмотка изолируется от вторичной с помощью кабельной бумаги 5. Лента из кабельной бумаги толщиной 0,12 мм наматывается вполнахлеста и на первичную обмотку и на вторичную. После наложения изоляции сердечник с обмотками крепится к основанию трансформатора с помощью лап 3. К этому же основанию крепится фарфоровый кожух, который защищает обмотки от воздействия окружающей среды.

Внутренняя полость трансформатора после вакуумной сушки заполняется трансформаторным маслом. Масло пропитывает кабельную бумагу и

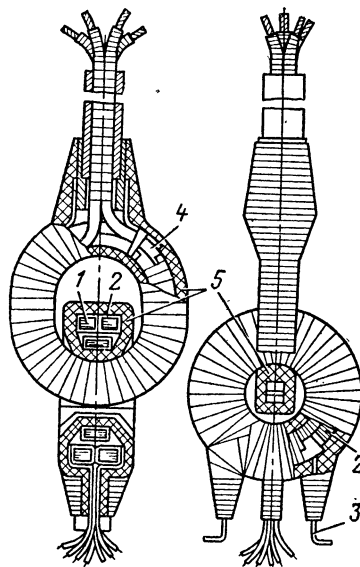


Рис. 23-10. Магнитопровод со вторичной и первичной обмотками трансформатора тока с бумажно-масляной изоляцией.

заполняет все пустоты. Такие трансформаторы выполняются на напряжение до 220 кВ. Общий вид аппарата с $U_n = 35$ кВ представлен на рис. 7-1.

С ростом номинального напряжения стоимость аппарата возрастает примерно пропорционально квадрату напряжения в основном за счет изоляции. Поэтому при напряжении $U_n > 220$ кВ применяют каскадную схему. На рис. 23-11 показан двухступенчатый каскадный трансформатор тока на напряжение 400 кВ. Каждая ступень выполнена на напряжение 200 кВ и представляет собой трансформатор, аналогичный рис. 23-10. Вторичная обмотка первой ступени питает первичную обмотку второй ступени. При перевозке каждая ступень, залитая маслом, доставляется к месту установки отдельно. Стоимость двухступенчатого трансформатора примерно в 2 раза меньше, чем одноступенчатого. Дальнейшее сокращение габаритов и массы может быть достигнуто применением конденсаторной бумажно-масляной изоляции.

Недостатком описанного выше варианта является увеличение погрешности трансформатора из-за увеличения сопротивления обмоток трансформатора [Л. 23-1].

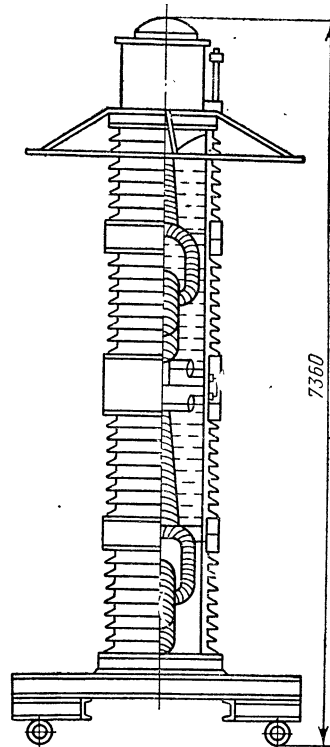


Рис. 23-11. Каскадный трансформатор тока, $U_n = 400$ кВ.

23-6. Выбор трансформаторов тока

Номинальное напряжение трансформатора должно соответствовать напряжению сети, в которой он устанавливается. Наибольший возможный ток продолжительного режима работы установки должен быть по возможности ближе к номинальному току трансформатора для получения наименьшей погрешности. Класс точности трансформатора выбирается в соответствии с его назначением. Более точные трансформаторы (классы 0,5 и 1)

используются для измерений, более грубые — используются для релейной защиты.

После выбора трансформатора по указанным параметрам проводится проверка его динамической и термической стойкости. Для этого необходимо знать ударный ток в месте установки трансформатора и действующее значение установившегося тока короткого замыкания. Эти величины должны быть меньше токов динамической и термической стойкости выбранного трансформатора.

Трансформаторы на малые номинальные токи хотя и имеют достаточную кратность по динамической и термической стойкости, но в абсолютных величинах эта стойкость может быть недостаточной, поэтому часто приходится выбирать трансформатор на номинальный ток, больший, чем ток установки, для того чтобы обеспечить необходимую стойкость. При этом, как правило, трансформатор тока работает с большей погрешностью, так как номинальный ток установки получается значительно меньше номинального тока трансформатора.

Для трансформаторов, работающих в цепях релейной защиты, необходимо, чтобы номинальная предельная кратность была выше отношения тока короткого замыкания к номинальному току.

Трансформаторы тока для дифференциальной защиты должны иметь одинаковую номинальную предельную кратность.

При выборе трансформатора тока необходимо учитывать, что его реальной нагрузкой являются не только обмотки приборов и реле, но и сопротивления соединительных проводов.

Глава двадцать четвертая

ТРАНСФОРМАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ

24-1. Общие сведения

а) **Назначение и основные параметры.** Трансформаторы напряжения служат для преобразования высокого напряжения в низкое напряжение стандартной величины, удобное для измерения. Обычно за номинальное вторичное напряжение принято напряжение 100 В или $100/\sqrt{3}$ В. Это позволяет для измерения любого напряжения применять одни и те же стандартные измери-

тельные приборы. Реле защиты, реагирующие на напряжение, также изготавливаются на стандартное напряжение независимо от напряжения установки.

Первичная обмотка трансформатора изолируется от вторичной соответственно классу напряжения установки. Для безопасности обслуживания один вывод вторичной обмотки обязательно заземляется. Таким образом, трансформатор напряжения изолирует измерительные приборы и реле от цепи высокого напряжения и делает безопасным их обслуживание.

Схема включения однофазного трансформатора напряжения дана на рис. 24-1. Первичная обмотка 1 присоединена к цепи высокого напряжения через предохранители 3. Вторичная обмотка 2 питает нагрузку в виде обмоток измерительных приборов или реле защиты через предохранители 4. В трансформаторах нормальной конструкции заземляются и вторичная обмотка 2 и сердечник 5.

Предохранители 4 служат для защиты трансформатора напряжения от коротких замыканий в цепи вторичной нагрузки. Предохранители 3, установленные на высоковольтной стороне, служат для защиты сети от короткого замыкания в трансформаторе. Для облегчения отключения желательна установка токоограничивающих предохранителей типа ПКТ или стреляющих с ограничивающим сопротивлением. Вследствие высокого сопротивления самого трансформатора при возникновении короткого замыкания во вторичной цепи ток в первичной цепи мал (порядка нескольких ампер) и его величина недостаточна для срабатывания предохранителей 3.

Основными параметрами трансформатора напряжения являются:

Номинальное напряжение обмоток—это напряжение на первичной и вторичной обмотках, указанное на шитке трансформатора. Номинальное напряжение трансформатора равно номинальному напряжению первичной обмотки.

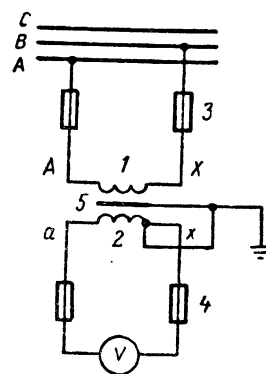


Рис. 24-1. Схема включения однофазного трансформатора напряжения.

Номинальный коэффициент трансформации — отношение номинального первичного напряжения к номинальному вторичному напряжению:

$$k_n = U_{1н}/U_{2н}.$$

Погрешность по напряжению согласно [Л.24-1] определяется уравнением

$$\Delta U \% = \frac{U_2 k_n - U_1}{U_1} 100\%, \quad (24-1)$$

где U_1 — напряжение, поданное на первичную обмотку;
 U_2 — напряжение, измеренное на зажимах вторичной обмотки.

Если $U_1/U_2 = k_n$, то погрешность всегда будет равна нулю.

За угловую погрешность принимается угол в минутах между первичным напряжением и повернутым на 180° вторичным. Если вторичное напряжение \dot{U}_2 опережает первичное напряжение \dot{U}_1 , то погрешность по углу считается положительной. Допустимая погрешность трансформатора по напряжению в процентах при номинальных условиях численно равна классу точности [Л.24-1].

Погрешности трансформатора не должны превышать табличные данные при колебании первичного напряжения в пределах 90—110% $U_{1н}$ и колебании мощности на вторичных зажимах в пределах 25—100% номинальной.

Номинальная вторичная нагрузка. Схема включения (рис. 24-1) трансформатора напряжения не отличается от силового. Ток во вторичной обмотке определяется сопротивлением нагрузки:

$$I_2 = U_2/z_2,$$

а вторичная мощность P_2 соответственно равна:

$$P_2 = U_2 I_2 = \frac{U_2^2}{z_2}.$$

При уменьшении сопротивления z_2 мощность, отдаваемая трансформатором напряжения, увеличивается. Как будет показано далее, погрешность увеличивается с ростом отдаваемой мощности.

Номинальная мощность трансформатора — это та наибольшая мощность (при номиналь-

ном коэффициенте мощности, равном 0,8), которая может быть снята с трансформатора при условии, что его погрешность не выйдет за пределы, определенные классом точности. Требования к трансформаторам напряжения определяются ГОСТ 1983-67.

б) **Погрешности трансформатора напряжения.** При трансформации высокого напряжения в низкое появля-

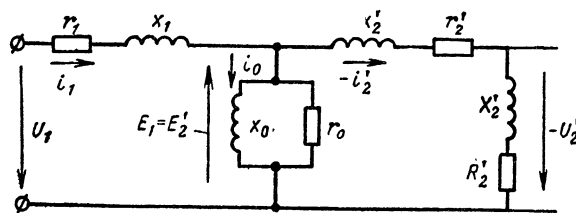


Рис. 24-2. Схема замещения трансформатора напряжения.

ется погрешность, которая является результатом активных и реактивных потерь в трансформаторе. Схема замещения трансформатора дана на рис. 24-2, а векторная диаграмма — на рис. 24-3. Все величины приведены к первичной обмотке. Поток Φ создает вторичную э. д. с. E_2' , отстающую на 90° относительно потока. Под действием этой э. д. с. во вторичной цепи возникает ток I_2' , который, проходя через сопротивление нагрузки R_2' и X_2' , создает напряжение U_2' на зажимах вторичной обмотки. Тот же ток создает падение напряжения на сопротивлении вторичной обмотки r_2' и x_2' . Сумма этих напряжений равна э. д. с. E_2' . Намагничивающий ток I_0 опережает на угол потерь ψ поток Φ . В первичной обмотке создается падение напряжения $I_1(r_1 + jx_1)$. Но

$$\dot{I}_0 \omega_1 = \dot{I}_1 \omega_1 + \dot{I}_2' \omega_2$$

или

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \dot{I}_2'. \quad (24-2)$$

Тогда

$$\dot{I}_1(r_1 + jx_1) = \dot{I}_0(r_1 + jx_1) + (-\dot{I}_2')(r_1 + jx_1).$$

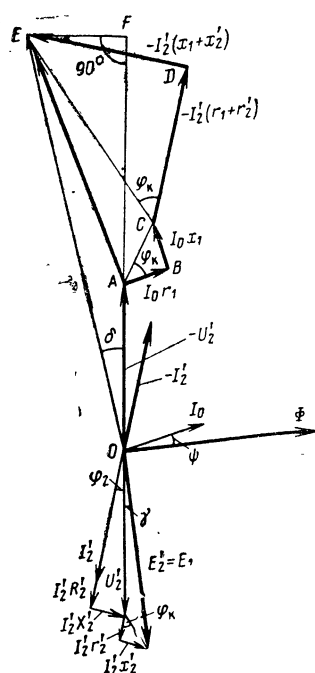
$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 (r_1 + jx_1) + (-\dot{I}'_2) (r'_2 + jx'_2) + (-U'_2).$$
$$U_1 = I_0(r_1 + jx_1) + (-I_2')(r_1 + r_2') + (-I_2')j(x_1 + x_2') + (-U_2').$$


Рис. 24-3. Векторная диаграмма трансформатора напряжения.

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} \text{ или } U_1 = U'_2,$$

т. е. точки A и E должны были бы совпадать. Погрешность появляется из-за активных и реактивных сопротивлений трансформатора и из-за наличия тока холостого хода. Рассмотрим погрешность по напряжению:

$$\Delta U\% = \frac{U_2 k_H - U_1}{U_1} 100 = - \frac{U_1 - U_2 k_H}{U_1} 100 = - \frac{U_1 - U_2'}{U_1} 100.$$

Поскольку угол δ мал, то вместо арифметической разности модулей векторов \vec{U}_1 и $-\vec{U}_2$ можно взять проекцию вектора AE на ось $-\vec{U}_2$. Таким образом, погрешность определяется отрезком AF .

Угол γ между напряжением на нагрузке \dot{U}_2 и э. д. с. E_2 составляет несколько минут, и им можно пренебречь. Находим проекции векторов $i_0 r_1$, $i_0 x_1$, $(-i_2')(r_1 + r_2')$,

$(-I'_2)(x_1+x'_2)$ на направление вектора $-U'_2$ (на вертикальную ось). Уравнение для погрешности по напряжению имеет вид:

$$\begin{aligned} \Delta U \% &= -\frac{AF}{OE} 100 \% = \\ &= -\frac{I_0(r_1 \sin \psi + x_1 \cos \psi) + I'_2[(r_1+r'_2) \cos \varphi_2 + (x_1+x'_2) \sin \varphi_2]}{U_1} \times \\ &\quad \times 100 \%. \end{aligned} \quad (24-3)$$

Уравнение (24-3) показывает, что погрешность состоит из двух частей. Первая определяется током холостого хода, вторая — током нагрузки. Для того чтобы уменьшить погрешность по напряжению, снижают активное и реактивное сопротивление обмоток.

Для получения малого активного сопротивления берутся малые плотности токов в обмотках (около 0,3 А/мм²). Благодаря малой плотности тока в обмотках эти трансформаторы слабо нагружены в тепловом отношении.

Для снижения индуктивного сопротивления обмоток x_1 и x_2 уменьшают расстояние между первичной и вторичной обмотками [Л.24-2].

При заданном первичном напряжении U_1 намагничивающий ток практически постоянен. В этом случае согласно (24-3) погрешность линейно возрастает с увеличением тока нагрузки I'_2 . Поскольку в номинальном режиме напряжение U'_2 мало изменяется с током нагрузки I'_2 , то выходная мощность P пропорциональна этому току. Зависимость погрешности по напряжению от мощности нагрузки для одного из трансформаторов показана на рис. 24-4, а.

На погрешность влияет коэффициент мощности нагрузки $\cos \varphi_2$ — с уменьшением $\cos \varphi_2$ погрешность увеличивается.

Погрешность зависит и от первичного напряжения. Рассмотрим холостой ход ($I'_2 = 0$). Если принять, что при изменении тока I_0 угол потерь не изменяется, то согласно (24-3) погрешность по напряжению будет определяться отношением намагничивающего тока I_0 к первичному напряжению U_1 . Индукция B пропорциональна

первичному напряжению, а намагничивающий ток пропорционален напряженности поля, так как

$$I_0 \omega_1 = Hl.$$

Тогда погрешность получается пропорциональной дроби H/B_m или обратно пропорциональной магнитной проницаемости μ_a . Обычно рабочая индукция в номинальном режиме выбирается в пределах 1,0—1,1 Т (материал сердечника — сталь Э42 или Э310).

При изменении первичного напряжения в пределах от 0,5 до 1,1 магнитная проницаемость увеличивается и погрешность уменьшается.

Следует отметить, что погрешность от тока холостого хода мала по сравнению с погрешностью от тока нагрузки. Поэтому при изменении напряжения в указанных пределах погрешность мало зависит от величины питающего напряжения.

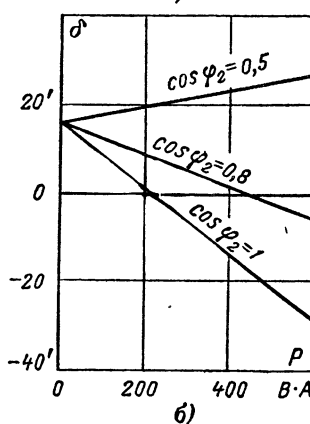
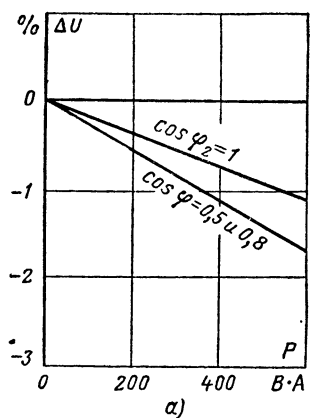


Рис. 24-4. Зависимость погрешностей трансформатора напряжения от нагрузки.

Угловая погрешность определяется углом δ между повернутым на 180° вторичным напряжением $-\dot{U}'_2$ и первичным напряжением \dot{U}_1 . Ввиду малости угла δ можно считать, что $OE=OF$ (рис. 24-3). Тогда $\operatorname{tg} \delta = \delta = EF/OE$ или (в угловых минутах)

$$\delta = 3440 \frac{I_0 (r_1 \cos \psi - x_1 \sin \psi) + I_2' [(r_1 + r_2') \sin \varphi_2 - (x_1 + x_2') \cos \varphi_2]}{U_1} \quad (24-4)$$

Подробный вывод выражения (24-4) приведен в [Л.24-1]. Погрешность по углу состоит также из двух частей: первой, определяемой током холостого хода, и второй, зависящей от тока нагрузки.

Из уравнения (24-4) следует, что реактивное сопротивление обмоток вносит отрицательную угловую погрешность, а активное — положительную. Зависимость угловой погрешности от мощности нагрузки P при различном коэффициенте мощности приведена на рис. 24-4, б.

В режиме холостого хода угловая погрешность положительна. При чисто активной нагрузке ($\cos \varphi_2 = 1$) с ростом мощности погрешность изменяет знак и становится отрицательной. При $\cos \varphi_2 = 0,5$ угловая погрешность линейно растет с мощностью и остается все время положительной. Следует отметить, что характер нагрузки ($\cos \varphi_2$) оказывает большее влияние на угловую погрешность, чем на погрешность по напряжению (ср. рис. 24-4, а и б).

Компенсацию погрешности по напряжению легко получить путем уменьшения числа витков первичной обмотки. Если уменьшить число витков первичной обмотки, то коэффициент трансформации становится меньше номинального и вторичное напряжение возрастает. При этом мы вводим положительную погрешность, которая компенсирует отрицательную. Обычно вводится такая коррекция, что при холостом ходе трансформатор имеет максимально допустимую для данного класса точности положительную погрешность.

Результирующая погрешность по напряжению при отмотке первичных витков выражается уравнением

$$\Delta U \% = - \frac{I_0 (r_1 \sin \psi + x_1 \cos \psi) + I_2' [(r_1 + r_2') \cos \varphi_2 + (x_1 + x_2') \sin \varphi_2]}{U_1} \times \\ \times 100 \% + \frac{\omega_{1H} - \omega_1}{\omega_{1H}} \cdot 100. \quad (24-5)$$

На угловую погрешность витковая поправка не влияет.

Угловую погрешность в трехфазных трансформаторах напряжения можно компенсировать. В этом случае необходимая компенсация достигается путем применения специальных компенсирующих обмоток [Л.24-1]. При ак-

тивной нагрузке вносится положительная поправка. При индуктивной нагрузке применяется другая схема соединений, которая дает отрицательную поправку [Л.24-1].

24-2. Конструкция трансформаторов напряжения

При напряжении до 35 кВ конструкция трансформаторов напряжения сходна с конструкцией силовых трансформаторов.

Индукция в сердечниках значительно меньше, чем у силовых трансформаторов. Это снижает погрешность, позволяет в некоторых случаях проводить испытания индуцированным напряжением

[Л.24-1]. Для испытания трансформатора на выводы вторичной обмотки подается удвоенное напряжение частотой 50 Гц. На первичной появляется также удвоенное напряжение. Индукция не должна превышать индукцию насыщения.

При эксплуатации возможны случаи, когда первичная обмотка, рассчитанная на работу при фазном напряжении, попадает под линейное напряжение вместо фазного. При этом сердечник не должен насыщаться.

На напряжение до 35 кВ выпускаются однофазные трансформаторы, у которых либо оба вывода обмотки высокого напряжения изолированы, либо только один (второй вывод заземлен).

На рис. 24-5, а показан внешний вид однофазного трансформатора напряжения на 6 кВ с масля-

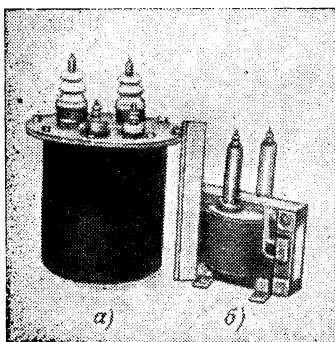


Рис. 24-5. Трансформаторы напряжения с масляной и литой изоляцией.

ной изоляцией. Оба вывода первичной обмотки изолированы от корпуса.

Перспективным направлением является применение в качестве изоляции пластмасс, отказ от масляной изоляции. Наряду с резким сокращением массы и габаритов упрощается эксплуатация, делается ненужным уход за маслом. Трансформаторы с литой изоляцией пожаробезопасны, удобны в передвижных установках и КРУ (см. гл. 25). На рис. 24-5, б представлен трансформатор напряжения с литой изоляцией типа НОК-6 на те же параметры, что и расположенный рядом масляный. В настоящее время отечественная промышленность выпускает трансформаторы с литой изоляцией на напряжение до 35 кВ.

Габариты трансформаторов в значительной степени определяются изоляцией аппарата. В связи с этим там, где это возможно, трансформатор выполняется для измерения напряжения между фазой и землей. В этом случае отпадает необходимость в изоляции второго вывода первичной обмотки, который заземляется. Линейное напряжение получается путем соединения в звезду вторичных обмоток таких трансформаторов. При этом, однако, погрешность измерения

возрастает, так как суммируются погрешности двух трансформаторов. Такая конструкция позволяет уменьшить габариты и удешевить трансформатор напряжения.

Возможные схемы включения однофазных трансформаторов нормального исполнения показаны на рис. 24-6. В случае рис. 24-6, а применяются два однофазных трансформатора, у которых первичная обмотка имеет изолированные выводы. Эта схема называется схемой

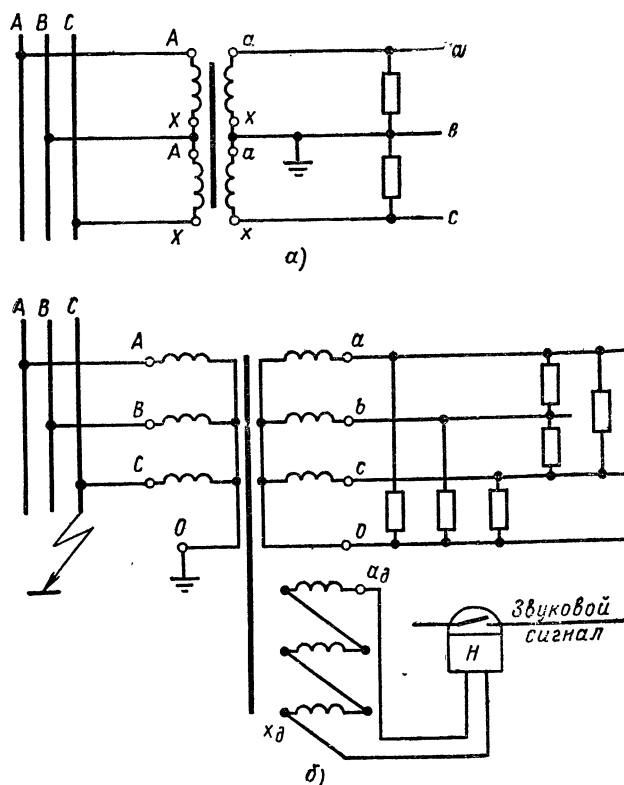


Рис. 24-6. Схемы включения трансформаторов напряжения в трех-
фазных цепях.

открытого треугольника. Такая схема очень удобна для измерения мощности и энергии. В этой схеме к каждому из трансформаторов может подключаться нагрузка вплоть до номинальной.

Схема позволяет получить и напряжение $\dot{U}_{AC} = -(\dot{U}_{AB} + \dot{U}_{BC})$ (приборы подключаются между точками a и c). Однако такое включение нагрузки не рекомендуется, так как создаются дополнительные погрешности за счет тока приборов, проходящего через обе вторичные обмотки.

В случае рис. 24-6, б могут применяться трансформаторы, у которых один из выводов первичной обмотки заземлен. Каждая из обмоток подключена к фазному напряжению, поэтому номинальное напряжение трансформатора должно равняться $U_n/\sqrt{3}$. Вторичная нагрузка приключается по схеме звезды или треугольника. Номинальное напряжение вторичной обмотки равно $100/\sqrt{3}$.

Для контроля изоляции и питания защиты, срабатывающей при коротком замыкании на землю, трансформаторы имеют дополнительные обмотки, которые включаются по схеме разомкнутого треуголь-

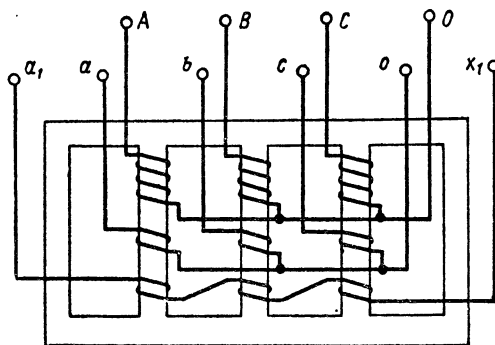


Рис. 24-7. Трансформатор напряжения с пятистержневым сердечником.

ника. При симметричном режиме сумма э.д.с., наводимых в этих обмотках, равна нулю. Если один из проводов заземляется, то равновесие э.д.с. нарушается и напряжение на концах разомкнутого треугольника подается на реле или сигнализацию.

Возможны два режима работы схемы рис. 24-6, б. Если нейтраль сети изолирована или заземлена через дугогасящую катушку, то заземление одной из фаз, например C, не ведет к короткому замыканию. Установка может оставаться длительное время в работе. При этом напряжение на трансформаторе C падает до нуля, а напряжение на трансформаторах A и B увеличивается до линейного. В связи с этим индукция в сердечниках трансформаторов A и B увеличивается в $\sqrt{3}$ раз. Во избежание увеличения нагрева сердечников и резкого возрастания погрешности этих трансформаторов сердечники не должны насыщаться при таком увеличении индукции.

В установках с заземленной нейтралью заземление одной из фаз вызывает короткое замыкание. Релейная защита быстро отключает поврежденный участок. Напряжение на «здоровых» фазах при коротком замыкании не поднимается выше (1,2—1,3) U_ϕ .

Уменьшение габаритов и снижение стоимости трансформаторов напряжения может быть достигнуто путем объединения трех отдельных измерительных трансформаторов в один трехфазный трансформатор. Применяются трехстержневые и пятистержневые магнитопроводы.

Трехфазные трехстержневые трансформаторы делаются с изолированной нулевой точкой на стороне высокого напряжения. Это объясняется тем, что при работе в сетях с изолированной нейтралью возникает аварийный режим работы трансформатора при заземлении одной фазы сети, если нулевая точка в трансформаторе заземлена [Л. 24-1].

Для контроля изоляции в системе с изолированным нулем применяются трехфазные пятистержневые трансформаторы (рис. 24-7). В этом случае при заземлении одной из фаз потоки «здоровых» фаз замыкаются по крайним стержням, имеющим малое магнитное сопротивление. Трансформатор имеет обмотку, соединенную в открытый треугольник a_1x_1 , которая используется для сигнализации и релейной защиты. При симметричном режиме на выходе этой обмотки никакого напряжения не появляется.

При напряжениях выше 35 кВ ввиду резкого возрастания габаритов и стоимости трансформатора нормальной конструкции применяются каскадные трансформаторы напряжения.

При напряжении 110 кВ применяют два каскада (рис. 24-8, а). Каждый каскад имеет свой магнитопровод (I и II). Каждый магнитопровод имеет обмотку высокого напряжения (ВН), рассчитанную на половинное напряжение фазы. Один конец этой обмотки соединен с магнитопроводом, второй изолирован от него на напряжение $U_{\phi}/2$. Нижняя ступень имеет выходные обмотки ax и $a_d x_d$: одна предназначена для питания измерительных приборов, вторая — для питания реле. Обмотка связи cb_1 расположена на магнитопроводе I , а обмотка связи cb_2 — на магнитопроводе II .

При отсутствии обмоток связи, если нагрузка не включена к выходным обмоткам, напряжение разделится поровну между обмотками ВН, так как их индуктивные сопротивления холостого хода одинаковы.

При включении нагрузки вторичный ток размагничивает магнитопровод I и поток в нем уменьшается. Реактивное сопротивление ступени I также уменьшается. Это ведет к тому, что напряжение между ступенями поделится неравномерно, причем большая часть ляжет на ступень II .

Обмотки связи служат для выравнивания распределения напряжения между обмотками при включении нагрузки. При холостом ходе э. д. с. в этих обмотках одинаковы, так как равны потоки в магнитопроводах I и II . Обмотки включены навстречу друг другу, так что уравнивающий ток равен нулю. При включении нагрузки поток в магнитопроводе I падает. Электродвижущая сила обмотки cb_2 становится больше, чем э. д. с. обмотки cb_1 . В результате в этих обмотках протекает уравнивающий ток, который размагничивает магнитопровод II и подмагничивает магнитопровод I . Этот ток таков, что верхний элемент воспринимает на себя половину нагрузки, включенной на выходных обмотках.

Более совершенным является вариант рис. 24-8, б, разработанный в последнее время. Трансформатор имеет один магнитопровод, изолированный от земли на напряжение $U_{\phi}/2$. Магнитопровод двухстержневой, на верхнем стержне располагается обмотка связи II . Сверху размещается обмотка ВН, рассчитанная на напряжение $U_{\phi}/2$. Один конец ее соединен с магнитопроводом, второй изолирован от него на напряжение $U_{\phi}/2$. На нижнем стержне размещаются обмотки в следующем порядке: обмотка связи I , обмотка высокого напряжения и сверху размещаются выходные обмотки низкого напряжения.

Трансформаторы для сети 110 кВ подвергаются воздействию атмосферных перенапряжений. Поэтому принимаются меры для получения равномерного распределения напряжения по катушкам обмотки ВН. С этой целью поверх обмоток ВН располагаются экраны

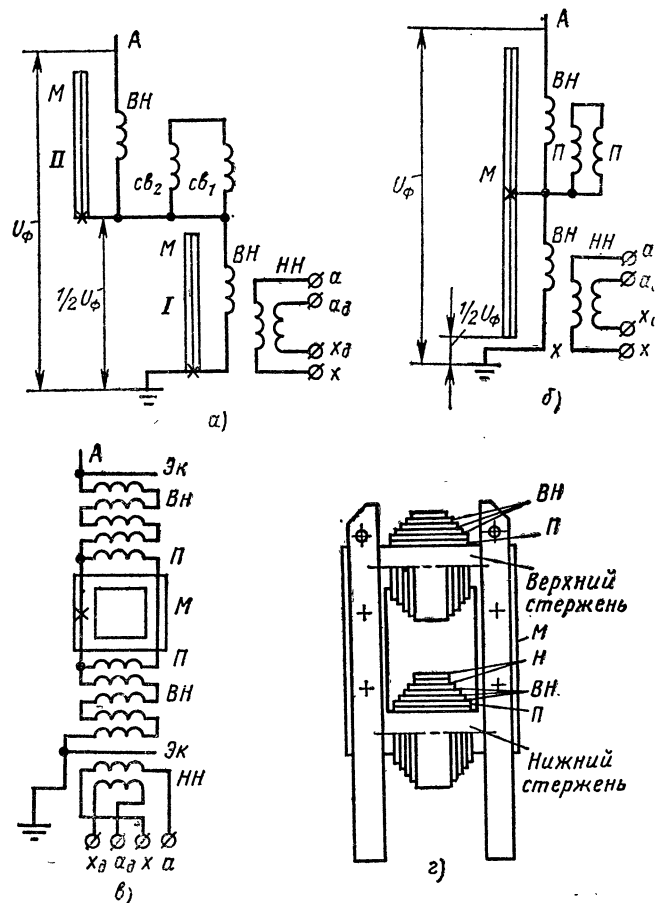


Рис. 24-8. Расположение и схемы обмоток каскадного трансформатора напряжения.

Эк, которые электрически соединяются с последним витком обмотки (рис. 24-8, в).

Собранный магнитопровод с обмотками крепится к основанию трансформатора на изоляционных стойках (рис. 24-8, г). После этого устанавливается фарфоровый кожух и заливается маслом. Трансформатор на 220 кВ собирается путем установки сверху еще одного

трансформатора на 110 кВ. Аналогично устроены трансформаторы для напряжения до 500 кВ. Для выравнивания распределения напряжения применяют охранные кольца [Л. 1-6]. Изоляция верхних элементов подвергающихся большей электрической нагрузке, соответственно усиливается.

В заключение следует отметить, что результирующие активное и индуктивное сопротивления каскадного трансформатора получаются значительно больше, чем у трансформатора нормального исполнения, поэтому класс точности каскадных трансформаторов не удается поднять выше первого.

Как указывалось, трансформаторы напряжения имеют малую плотность тока в обмотках. В том случае, когда такой трансформатор используется как источник мощности и погрешность нас не интересует, нагрузку можно значительно увеличить. Так, например, трансформатор НОМ-10 в классе 0,5 имеет нагрузку всего 80 В·А, хотя максимальная мощность, которая может быть снята со вторичной обмотки, равна 720 В·А.

24-3. Емкостные делители (конденсаторные трансформаторы напряжения)

Для измерения высокого напряжения и питания реле могут быть использованы емкостные делители напряжения. Принципиальная схема подобного устройства приведена на рис. 24-9. Делитель состоит из двух конденсаторов C_1 и C_2 .

В чисто емкостной цепочке (цепь трансформатора напряжения A_1X отключена) напряжение делится обратно

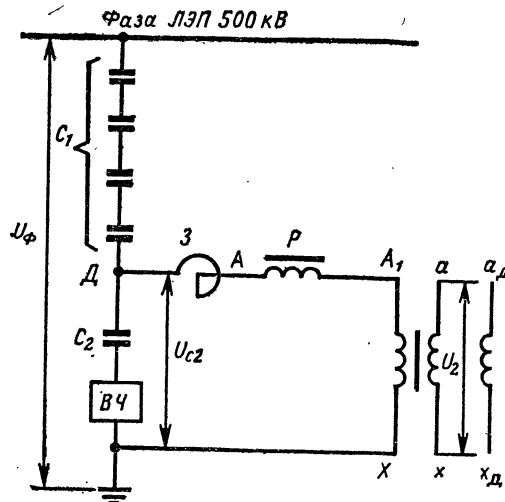


Рис. 24-9. Схема конденсаторного трансформатора напряжения

пропорционально величинам емкостей. Емкость конденсатора C_2 на порядок больше, чем C_1 , и сквозной ток, текущий по цепочке, определяется конденсатором C_1 . Емкость конденсатора C_2 выбирается так, чтобы напряжение на ней находилось в пределах 4000—12 000 В.

Для дальнейшего понижения напряжения применяется дешевый трансформатор напряжения нормального исполнения. Напряжение U_{C2} , полученное на нижней

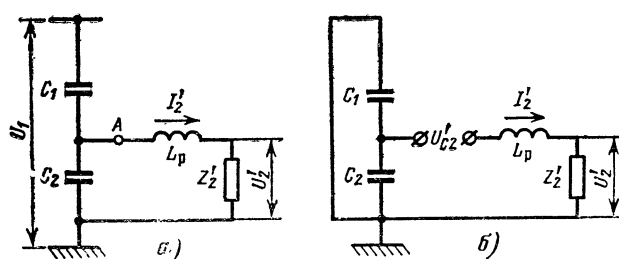


Рис. 24-10. Упрощенная расчетная схема для рис. 24-9.

ступени, через реактор P подается на этот трансформатор. Нагрузка, имеющая номинальное напряжение 100 В, включается на вторичную обмотку трансформатора напряжения.

Если трансформатор подключить к конденсатору C_2 без реактора P , то с ростом нагрузки уменьшается входное сопротивление трансформатора и напряжение на нижней ступени начинает падать. В результате и напряжение на нагрузке в значительной степени зависит от ее величины. Если включить реактор, который настроен в резонанс с емкостью $C_1 + C_2$ при частоте $f = 50$ Гц, то выходное напряжение мало зависит от величины нагрузки.

Если пренебречь током холостого хода трансформатора напряжения, то схема рис. 24-9 может быть преобразована в схему рис. 24-10. Для выявления основных свойств делителя примем, что трансформатор напряжения идеальный и погрешности не вносит. Тогда этот трансформатор вместе с нагрузкой можно заменить z_2' — сопротивлением нагрузки, приведенным к первичной обмотке трансформатора.

Для решения задачи воспользуемся методом наложения. Разомкнем цепь в точке A и определим напряжение на разрыве:

$$U'_{C_2} = U_1 \frac{C_1}{C_1 + C_2}.$$

Теперь замкнем источник питания и в разрыве включим напряжение U'_{C_2} (рис. 24-10, б):

$$U'_{C_2} = jI'_2 X_p - j \frac{1}{\omega(C_1 + C_2)} I'_2 + U'_2.$$

Поскольку реактор настроен в резонанс с конденсатором $C_1 + C_2$, то

$$X_p = \omega L_p = \frac{1}{\omega(C_1 + C_2)},$$

тогда

$$U'_{C_2} = U_1 \frac{C_1}{C_1 + C_2} = U'_2.$$

Таким образом, при наличии реактора, настроенного в резонанс, напряжение на нагрузке U'_2 определяется только отношением $\frac{C_1}{C_1 + C_2}$ и не зависит от z_2 . При сделанных допущениях погрешности определяются трансформатором T .

Необходимо отметить, что с ростом тока I'_2 напряжение U'_2 практически остается постоянным, в то время как напряжение на реакторе $I'_2 X_p$ пропорционально растет. В результате на конденсаторе нижней ступени возможно появление опасных для его работы напряжений.

При коротком замыкании на вторичной стороне ($U_2 = 0$) вследствие явлений резонанса на емкости C_2 появится большое напряжение, которое может привести к пробое этого конденсатора. Для ограничения этих перенапряжений параллельно нижней ступени ставится разрядник. Для устранения этого опасного режима во вторичной цепи трансформатора рекомендуется ставить отключающий аппарат, который отключает ток короткого замыкания в цепи нагрузки.

До последнего времени в качестве емкостного делителя использовались конденсаторы, образуемые обкладками

ми конденсаторной бумажно-масляной или барьерной изоляции. Из-за малой емкости верхней ступени (C_1) выходная мощность установки мала (15 В·А при изоляторе на напряжение 110 кВ). Погрешность по напряжению достигает 5%, а угловая погрешность доходит до 5°.

В связи с широким применением высокочастотной связи по проводам высокого напряжения и использованием защит, работающих на высокой частоте, начали применять делители, созданные специальными конденсаторами с относительно большой емкостью. Это позволило значительно увеличить мощность, снимаемую с делителей. При высоких напряжениях эта мощность может достигать 1000 В·А.

Для развязки цепей высокой частоты и промышленной частоты последовательно с реактором P включается заградитель Z , который не пропускает токов высокой частоты в трансформатор (рис. 24-9):

В СССР выпускаются делители на мощности до 300 В·А первого класса точности. Исследования показали, что возможно создание делителей класса точности 0,2.

Ввиду того что конденсаторы связи, используемые для создания делителей, имеют допуски на величину емкости, в реальных установках и реактор и трансформатор напряжения имеют возможность подгонки своих параметров. Индуктивность реактора изменяется за счет величины воздушного зазора в стыках сердечника и за счет отпаяек обмотки реактора. Трансформатор напряжения имеет также регулировку коэффициента трансформации с помощью отпаяек.

В настоящее время создаются делители для питания потребителей небольшой мощности. При высоких напряжениях (220 кВ и выше) и малой мощности потребителя создание обычных понизительных подстанций нерентабельно.

В этих случаях удается осуществить отбор мощности с помощью делителей. Конденсатор C_1 образуется путем подвеса параллельно проводу фазы другого проводника, изолированного от земли. Длина этого проводника берется равной нескольким километрам. Напряжение с дополнительного провода подается на нижнюю ступень делителя. От нижней ступени делителя напряжение через реактор подводится к понизительному трансформатору. Таким путем удается снимать мощность до нескольких киловольт-ампер.

Сравнение стоимости делителя и каскадных трансформаторов показывает, что делители целесообразно применять при напряжениях выше 110 кВ.

Делитель обеспечивает равномерное распределение напряжения в верхней ступени благодаря относительно большой емкости входящих в него конденсаторов. В трансформаторах напряжения этот вопрос усложняется с ростом номинального напряжения, когда количество элементов возрастает.

При напряжениях 400 кВ и выше стоимость делителя примерно в 2 раза ниже стоимости трансформатора напряжения. При напряжении ниже 110 кВ использование делителя не дает ощутимого эффекта.

Недостатком емкостных делителей является склонность к перенапряжениям, появляющимся вследствие феррорезонансных явлений. Дело в том, что наличие конденсаторов и нелинейной индуктивности создает возможность появления резонанса не только на основной частоте, но и на низших частотах, субгармониках. Это опасно с точки зрения прочности изоляции, а также создает искажения, которые ведут к ложному срабатыванию защиты. Возможно даже повреждение присоединяемых приборов.

В настоящее время разработано много схем, эффективно ограничивающих эти перенапряжения.

Работа делителя зависит также от изменения частоты измеряемого напряжения, так как возможны нарушения условия резонанса реактора и конденсаторов.

Глава двадцать пятая

КОМПЛЕКТНЫЕ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА (КРУ) И КОМПЛЕКТНЫЕ СТАНЦИИ УПРАВЛЕНИЯ (КСУ)

25-1. Общие сведения

До 40-х годов нашего столетия распределительные устройства (РУ) создавались следующим образом. Вначале проектировалась электрическая часть в соответствии с номинальным напряжением, номинальным током и мощностью отключения и выбирались необходимая электрическая аппаратура и установочные изделия. После того проектировалась строительная часть здания. Для

обеспечения надежности и безопасности обслуживания электрическое оборудование размещалось в прочных железобетонных ячейках. Основным оборудованием в те годы являлись баковые масляные выключатели, масляные трансформаторы напряжения, поэтому механическая прочность ячеек рассчитывалась на то, что повреждение и взрыв аппарата в одной ячейке не должны вызывать повреждение оборудования в соседних ячейках.

Установка оборудования и монтаж производились на месте. Все три основные стадии (проектирование, выполнение строительных работ и монтаж) требуют большой затраты квалифицированного труда и времени. Особо трудоемкими являются монтаж, наладка оборудования и подготовка к включению. На этом этапе приходится выполнять много работы по подгонке отдельных узлов друг к другу.

Бурное развитие энергетики, широкая электрификация и автоматизация производственных процессов требовали разработки новых методов строительства РУ, каковым является создание комплектных распределительных устройств (КРУ).

КРУ — это совокупность электрических аппаратов, необходимых для РУ (коммутационные аппараты, релейная защита и измерительные приборы), смонтированных на заводе в условиях серийного или даже массового производства.

Для ограничения количества необходимых исполнений проектные институты проводят типизацию схем первичной (высоковольтной) и вторичной (низковольтной) коммутации. По разработанным схемам завод создает конструкцию КРУ, разрабатывает технологию производства.

По сравнению со сборными устройствами КРУ обладает следующими преимуществами:

1. Производство КРУ ведется индустриальным методом с широким применением машин. Операции по изготовлению разбиваются на простейшие, что делает возможным внедрение автоматизации. Это позволит снизить стоимость КРУ.

2. Заводское изготовление распределительных устройств повышает их качество, дает возможность широко внедрять новейшие достижения в области конструирования и технологии электроаппаратостроения, увеличивает надежность энергоснабжения.

Применение аппаратуры, специально предназначенной для КРУ, изолированных шин и удачной компоновки позволяет значительно уменьшить размеры ячейки и всего КРУ в целом.

3. Время, необходимое для монтажа КРУ, составляет всего 14% времени монтажа сборного РУ. Изготовленные, собранные и испытанные на заводе ячейки КРУ устанавливаются на фундаменте в построенном здании, производится присоединение входных и выходных цепей первичной коммутации и цепей управления, после чего КРУ включаются в работу. Таким образом, резко сокращается количество необходимой квалифицированной рабочей силы при монтаже [Л. 25-1].

4. Здание, в котором размещается КРУ, имеет более простую конструкцию (нет железобетонных ячеек) и меньший объем благодаря уменьшению размера КРУ по сравнению со сборным РУ. Это удешевляет строительную часть. Применение КРУ позволяет на 20% сократить расходы металла [Л.25-1].

5. В КРУ повышаются надежность и безопасность эксплуатации. Специальные блокировки обеспечивают полную безопасность ремонта и обслуживания КРУ.

6. Наиболее подверженная износу часть КРУ — выключатели при ремонте легко заменяются на резервные, что позволяет сократить перерыв в энергоснабжении.

7. Значительно упрощается проектирование распределительного устройства. Оно сводится к выбору типовых ячеек КРУ, выпускаемых заводами.

В настоящее время изготавливаются КРУ, которые устанавливаются на открытой подстанции (КРУН) и вообще не требуют строительства зданий.

При строительстве новых электрических станций и распределительных устройств КРУ находят самое широкое применение благодаря своим преимуществам. Малые габариты КРУ, высокая надежность позволяют делать глубокий ввод высокого напряжения.

25-2. Комплектное распределительное устройство высокого напряжения

Типовая ячейка КРУ показана на рис. 25-1. Электрическая схема цепи высокого напряжения ясна из этого же рисунка. Основой КРУ является стальной сварной каркас, к которому крепятся оборудование и стенки.

Внутри ячейка разбита на отсеки, в которых находятся элементы КРУ.

В отсеке *А* устанавливаются сборные шины КРУ, закрепленные на опорных изоляторах.

В отсеке *Б* располагается выключатель *1* с приводом *2*. Отсек *В* содержит измерительный трансформатор тока *4* и выходной кабель с концевой разделкой *5*.

Присоединение выключателя *1* к сборным шинам и трансформатору тока производится с помощью втычных

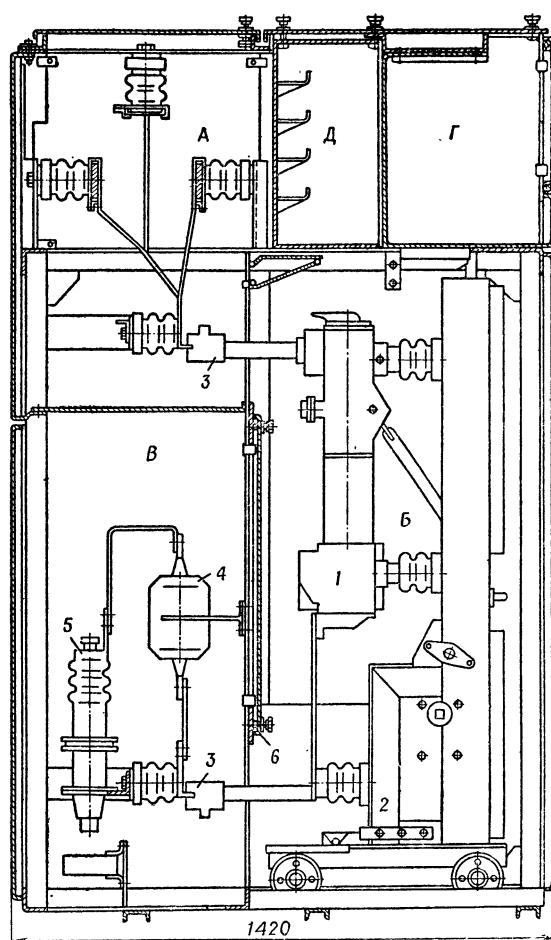


Рис. 25-1. Ячейка КРУ 10 кВ.

разъединителей 3 с розеточным или пальцевым контактом.

В отсеке *Д* располагаются кабели управления, а в отсеке *Г* — релейные аппараты и приборы для измерений.

Разбивка объема на ячейки диктуется тем, что возможные повреждения отдельных элементов должны быть строго локализованы, иначе при аварии возможен выход из строя не только всей ячейки, но и повреждение всего КРУ.

При возникновении дуги между шинами появляется электродинамическая сила, которая со скоростью в сотни метров в секунду перемещает дугу, при этом дуга причиняет большие разрушения. Для того чтобы воспрепятствовать движению дуги, в настоящее время начинается применяться ошиновка с твердой изоляцией в виде стеклоткани, пропитанной эпоксидной смолой. При наличии такой изоляции дуга не может перемещаться вдоль шин.

Одним из основных элементов ячейки является выключатель. Ввиду того что перегородки между ячейками изготовлены из листовой стали и имеют небольшую прочность, взрыв выключателя может привести к разрушению не только ячейки, но и всего КРУ. Поэтому в КРУ рекомендуется применять пожаробезопасные магнитные и воздушные выключатели. При небольшом количестве масла возможно применение маломасляных выключателей. На рис. 25-1 применен выключатель ВМП-6.

Газы, выходящие из выключателя при отключении, должны иметь свободный выход из ячейки во избежание возможного взрыва. (Искра, вызывающая взрыв, может появиться из-за плохого контакта в ошиновке).

При большой мощности отключения выхлопные газы должны выбрасываться в атмосферу с помощью специальных газопроводов. Для уменьшения опасности взрыва необходимо, чтобы блок-контакты схемы управления выключателем были вынесены в другой отсек, так как возможно воспламенение газа от искры, возникающей при разрыве цепи отключающей или включающей катушки привода.

Стенки КРУ имеют небольшую толщину и большую поверхность. Деформация их возможна даже при небольших избыточных давлениях внутри ячейки. Поэтому желательны подпружиненные клапаны сброса давления.

При мощностях отключения до 350 МВ·А рациональным является пружинный привод, встроенный в механизм самого выключателя. Ввиду малой мощности двигателя такого привода (100 Вт) отпадает необходимость применения мощного автономного источника питания (аккумулятора).

Во всех современных КРУ выключатель монтируется на тележке, которая позволяет выкатывать выключатель вместе с приводом из КРУ для ревизии и ремонта. Компоновка выключателя с втычными разъединителями позволяет легко осуществить их блокировку и безопасные условия работы. Механизм выкатывания заблокирован с механизмом выключателя. Выкатывание возможно только тогда, когда выключатель отключен.

Тележка выключателя имеет три фиксированных положения: рабочее, когда разъединители включены, промежуточное, когда разъединители отключены, но цепи вторичной коммутации и управления приводом остаются включенными, и третье, когда все цепи отключены и выключатель может быть выкачен из ячейки полностью и направлен на ремонт. Вместо него может быть установлен резервный выключатель на те же параметры.

При переводе тележки из рабочего положения в промежуточное металлические шторы *б* (рис. 25-1) закрывают отверстия в перегородке ячейки и отделяют отсек *Б* выключателя от отсеков *А* и *В*, которые могут находиться под высоким напряжением.

При выкатывании выключателя эти шторы открываются.

В промежуточном положении ячейки механизм выключателя может быть испытан, так как цепи управления остаются включенными.

В ремонтном положении цепи управления отключаются. Наиболее надежным контактом для этих целей пока следует считать применение штепсельных разъемов, которые расположены на концах гибких кабелей управления.

Вместо обычных рубящих разъединителей в КРУ нашли применение втычные разъединители. Подвижные пальцевые контакты *з* укреплены на жестких шинах, связанных с выводами выключателя. Неподвижные контакты в виде массивных шин укреплены на специальных опорных изоляторах. При выкатывании тележки пальцы подвижных контактов охватывают неподвижные и созда-

ют надежный контакт. Эта конструкция обеспечивает пропускание номинальных токов до 3000 А.

Трансформаторы тока 4 применяются с литой изоляцией.

В ячейке измерения напряжения устанавливаются пока масляные трансформаторы серий НОМ, НТМ и др. Эти трансформаторы пожароопасны, занимают много места и требуют специальной ячейки для их размещения. Перспективным является применение трансформаторов с твердой литой изоляцией типа НОК, которые столь надежны, что можно будет отказаться от предохранителей, которые обычно ставятся с трансформаторами НОМ.

Аппаратура релейной защиты и измерительные приборы монтируются на откидной передней крышке отсека Г. При ревизии и ремонте эта крышка открывается и все приборы становятся легкодоступными. Соединение приборов с остальной схемой вторичной коммутации осуществляется многожильным гибким кабелем.

Высокое напряжение подается в КРУ через проходные изоляторы, устанавливаемые на крыше.

Развитие заводского метода изготовления РУ привело к созданию комплектных трансформаторных подстанций (КТП), которые служат для приема, преобразования и распределения электрической энергии. Все элементы подстанции: силовой понижающий трансформатор, коммутационная и защитная аппаратура высокого и низкого напряжения, измерительные приборы — комплектуются в единую установку в заводских условиях, что дает большой экономический эффект, повышает надежность энергоснабжения и ускоряет ввод новых мощностей.

Большие преимущества КТП привели к широкому распространению таких установок на напряжения вплоть до 110 кВ.

25-3. Герметизированные элегазовые распределительные устройства (ГРУ)

В связи с ростом городов и укрупнением промышленных предприятий, автоматизацией производственных процессов резко возрастает потребление электроэнергии. Возникает большая необходимость глубокого ввода линий 110, 220, 330 кВ для питания потребителей. Создание распределительных устройств открытого типа (аппара-

ты находятся на открытом воздухе) и закрытого типа (аппараты находятся внутри зданий) затруднено, так как расстояние между токоведущими частями в воздухе при этих напряжениях велико и требуются колоссальные площади и помещения для размещения таких РУ. Кроме того, существующие РУ создают большие радиопомехи, повышают уровень шумов, вызываемых работой воздушных выключателей. Особенно остро стоит вопрос при размещении РУ под землей (ГЭС, РУ в высокогорных районах). Единственным выходом из создавшегося положения является РУ, в которых изоляция осуществляется твердыми, жидкими изоляционными материалами или газами под повышенным давлением. Твердая изоляция распространения не получила — трудно обеспечить надежную изоляцию при переходе от одного элемента РУ к другому. Минеральное масло из-за пожаро- и взрывоопасности не применяется. Другие (негорючие хлорированные масла) жидкости дороги, выделяют хлор. Поэтому наиболее подходящими являются газы — воздух и элегаз. Первый требует высокого давления, а следовательно, большой прочности оболочек. Поэтому элегаз нашел преимущественное применение. Свойства элегаза рассмотрены в § 19-7. Элегазовые РУ (ГРУ) требуют на порядок меньшую площадь, чем обычные РУ, и имеют небольшие размеры по высоте.

На рис. 25-2, б и в представлены два возможных варианта ГРУ для схемы рис. 25-2, а. На этих рисунках: 1 — сборные шины, 2 — автоматический заземлитель, 3 — разъединитель сборных шин, 4 — ручной заземлитель, 5 — выключатель, 6 — шкаф управления, 7 — разъединитель ответвления, 8 — концевая кабельная муфта, 9 — приставка к емкостному делителю напряжения, 10 — трансформатор тока. В первом варианте каждая фаза имеет свою изоляцию и расположена в отдельной оболочке (рис. 25-2, б), во втором все три фазы шинопровода имеют общую оболочку (рис. 25-2, в). В варианте рис. 25-2, б исключаются междуфазные короткие замыкания, снижаются электродинамические усилия. Несмотря на большую стоимость и больший габарит этому варианту отдается предпочтение. По соображениям удобства изготовления, эксплуатации и ремонта каждый элемент ГРУ (выключатель, разъединитель, шины) представляют собой самостоятельную единицу, которая герметизируется и испытывается отдельно. Внутренние

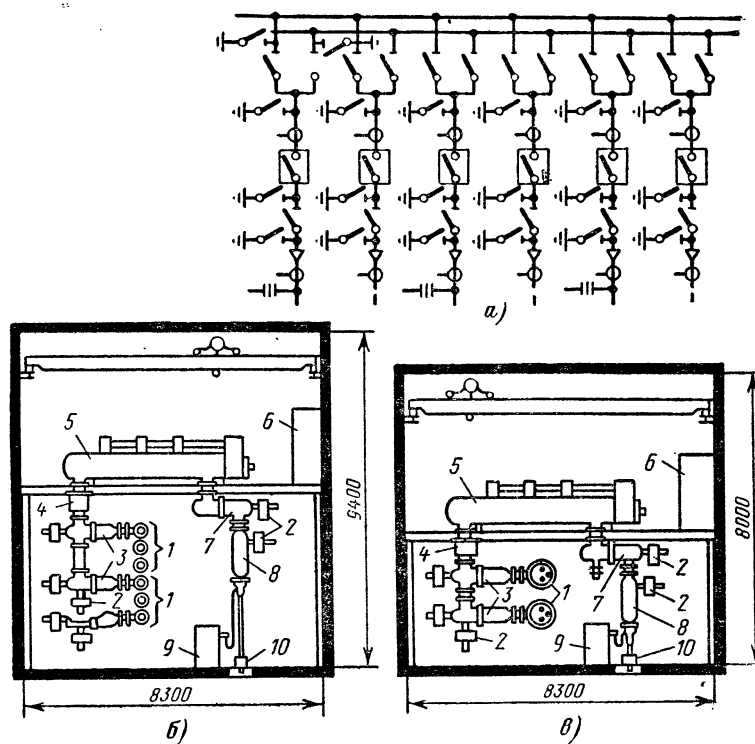


Рис. 25-2. Герметизированное элегазовое РУ.

объемы элементов объединяются в блоки с общей контрольно-измерительной газовой аппаратурой. Следует отметить, что питающие ГРУ кабельные линии и кабельные линии, отходящие к потребителю, также имеют элегазовую изоляцию.

Подробные сведения о конструкции ГРУ, устройству отдельных элементов приведены в [Л. 19:9].

25-4. Комплектные распределительные устройства низкого напряжения

Ячейка КРУ на напряжение 380—500 В показана на рис. 25-3. Электрическая схема показана в левом нижнем углу рисунка. Отходящие кабельные линии присое-

диняются к сборным шинам через установочные автоматы. Ток нагрузки линий измеряется с помощью трансформаторов тока и амперметров, расположенных на лицевой стороне щита. Всего от щита отходит шесть линий.

Основой КРУ является металлическая рама. Обычная изоляционная плита отсутствует. Ошиновка КРУ

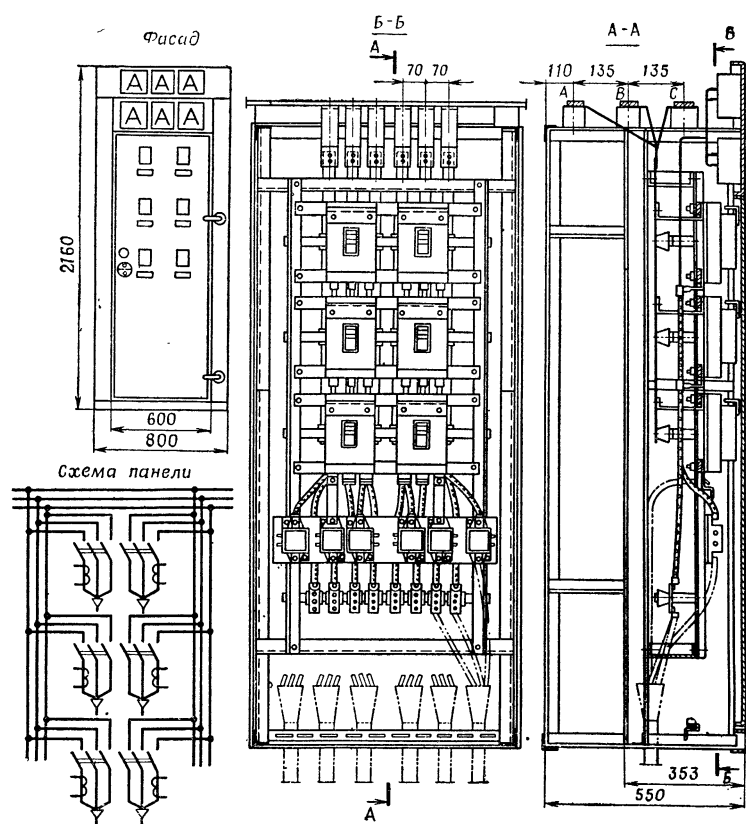


Рис. 25-3. Ячейка КРУ низкого напряжения.

крепится с помощью опорных изоляторов, а автоматы, имеющие изоляционный контур, крепятся к металлическим рейкам непосредственно.

С лицевой стороны КРУ закрыто листом стали. Через отверстия этой панели проходят только рукоятки автоматов. Такая защита обеспечивает безопасную коммутацию цепи с помощью автоматов. Изготовление рамы, установка и соединение аппаратов производятся в заводских условиях, что обеспечивает низкую стоимость, высокое качество РУ.

25-5. Комплектные станции управления (КСУ)

Типовые схемы автоматического управления электроприводами также целесообразно изготавливать на аппаратных заводах в виде комплектных устройств. Конструкция этих станций аналогична конструкции низковольтного КРУ.

Станция КСУ типа ПГХ-5008 предназначена для пуска, реверса и остановки четырех асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Управляющие импульсы подаются либо от командоаппаратов, либо от специальных датчиков, обеспечивающих необходимый технологический процесс.

Элементная схема управления для двух двигателей приведена на рис. 25-4. Автомат 1А служит для защиты двигателя от коротких замыканий. В КСУ используются автоматы серии АЗ100, имеющие только максимальную мгновенную защиту.

Включение и отключение двигателя производится контактором 1КЛ, имеющим магнитное гашение дуги. Защита двигателей от перегрузки и двухфазного режима осуществляется с помощью двух тепловых реле 1РТ и 2РТ.

Размыкающие контакты этих реле включены в цепь катушки контактора 1КЛ.

Защита цепи управления от коротких замыканий производится с помощью предохранителя типа ПР.

Нулевая защита двигателя обеспечивается контактором 1КЛ, имеющим высокий коэффициент возврата электромагнита (§ 10-3). Аналогичную схему имеют третий и четвертый двигатели. Второй двигатель имеет реверс. Схема управления снабжена электрической блокировкой: при включении контактора В размыкается цепь катушки контактора Н.

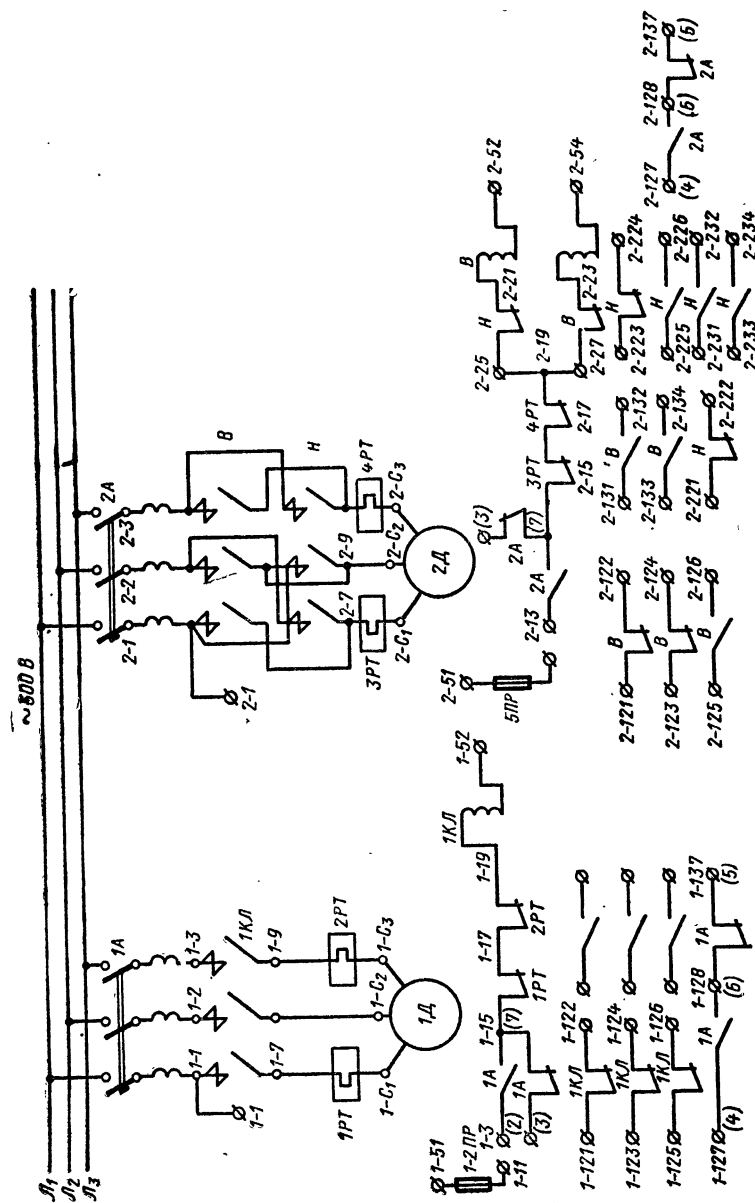


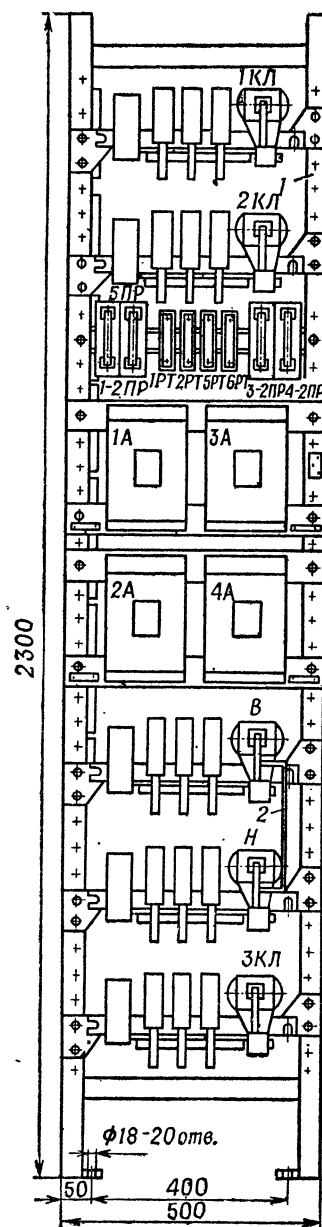
Рис. 25-4. Схема комплектной станции управления (КСУ).

Конструкция КСУ показана на рис. 25-5. Основой станции является стальная рама 1. На поперечных рейках рамы смонтированы все аппараты. В КСУ применены моноблочные контакторы. В этих контакторах все элементы объединены вместе без изоляционной плиты (рис. 10-7).

Контакторы В и Н, предназначенные для реверса, имеют механическую блокировку — якорь электромагнитов связаны тягой 2 (см. § 10-3). Автоматы защиты 1А—4А сгруппированы вместе, что позволяет быстро восстанавливать питание при отключении двигателей максимальной защитой. Предохранители, защищающие цепи управления и тепловые реле 1РТ—8РТ, установлены на третьей рейке. Электрические соединения схемы управления выполняются в виде пучков изолированного провода.

Рассмотренная выше конструкция КСУ очень удобна и в производстве и в эксплуатации. Использование моноблочных аппаратов дает возможность в случае необходимости быстро производить замену аппаратов станции.

Рис. 25-5. Конструкция КСУ.



ПРИЛОЖЕНИЕ I

РАСЧЕТ И ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ МУС

1. Связь электрических характеристик МУС с конструктивными параметрами

а) **Магнитопроводы и обмотки МУС.** В МУС на небольшую мощность широкое распространение получили тороидальные магнитопроводы. Рассмотрим геометрические соотношения для этих маг-

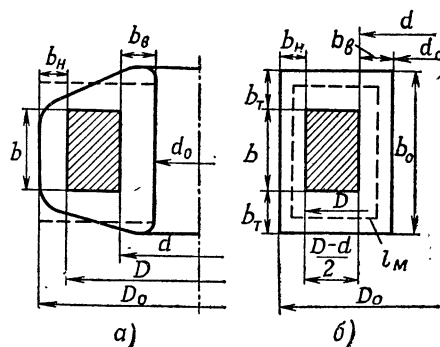


Рис. П-1.

нитопроводов. Для того чтобы насыщение слоев с диаметрами D и d происходило одновременно, отношение D/d берут близким к единице (рис. П-1). Для маломощных усилителей $D/d=1,2$, для более мощных $D/d \approx 1,6$ [Л. 6-8].

На рис. П-1 дан разрез обмотки тороидального усилителя. Из условия равенства сечений обмоток внутренней и внешней частей следует:

$$\frac{\pi}{4} (D_0^2 - D^2) = \frac{\pi}{4} (d^2 - d_0^2). \quad (\text{П-1})$$

Поскольку $D > d$, а число витков, располагающихся на внутренних и внешних диаметрах, одинаково, то

$$b_n = \frac{D_0 - D}{2} < b_v = \frac{d - d_0}{2}.$$

Торцевая толщина обмотки

$$b_T = \frac{b_H + b_B}{2}.$$

Действительное сечение обмотки (рис. П-1, а) можно заменить расчетным (рис. П-1, б).

Длина средней магнитной линии $l_c = \pi \frac{D+d}{2}$. Средняя длина витка $l_M = 2b + D_0 - d_0$. Активное сечение магнитопровода сердечника $S_c = b \frac{D-d}{2} k_{з.с.}$. Коэффициент заполнения по стали $k_{з.с.}$ зависит от толщины ленты и колеблется от 0,8 (для ленты $0,05 \cdot 10^{-3}$ м) до 0,9 (для ленты $0,2 \cdot 10^{-3}$ м).

Площадь окна, занимаемого обмоткой,

$$S_{\text{окна.м}} = \frac{\pi d^2}{4} \left(1 - \frac{d_0^2}{d^2} \right).$$

Сечение меди обмотки

$$S_M = \frac{\pi d^2}{4} \left(1 - \frac{d_0^2}{d^2} \right) k_{з.м} = \frac{\pi^2 d^2}{16} \left(1 - \frac{d_0^2}{d^2} \right) \left(\frac{d_M}{d_{из}} \right)^2 k_{укл}, \quad (\text{П-2})$$

где d_M — диаметр голого провода;

$d_{из}$ — диаметр провода с изоляцией.

Коэффициент укладки $k_{укл}$ характеризует плотность намотки (рис. П-4). Диаметр d_0 определяется типом намоточного станка. Обычно

$$d_0/d = 0,3 \div 0,5.$$

Мощность, выделяемая в обмотках усилителя, рассеивается через поверхность охлаждения. Внутренняя поверхность почти не участвует в охлаждении усилителя, так как отверстие используется, как правило, для крепления усилителя. При этом допущении

$$S_{\text{охл}} = S_{\text{бок}} + 2S_{\text{тор.}},$$

где

$$S_{\text{бок}} = \pi D_0 b_0; \quad S_{\text{тор.}} = \frac{\pi}{4} (D_0^2 - d_0^2); \quad b_0 = b + 2b_T.$$

При обычно используемых соотношениях

$$D/d = 1,2 \div 1,6; \quad b/d = 0,2 \div 0,8; \quad S_{\text{охл}} \approx 4dl \quad [\text{Л. 6-8}].$$

б) Плотность тока в рабочей обмотке. Наибольшие потери в МУС имеют место в режиме максимальной отдачи, когда через рабочую обмотку протекает наибольший ток нагрузки. В этом режиме индукция в магнитопроводе изменяется от $+B_r$ до $+B_s$ по частной петле гистерезиса. Площадь этой петли мала, и потерями в сердечнике можно пренебречь. При тепловом расчете МУС учитывают

только потери в обмотке, что значительно упрощает расчет усилителя на нагрев.

Потери в рабочей обмотке равны:

$$P = I^2 r_p = I^2 \rho \frac{l_{cp} \omega}{q} = \frac{(I\omega)^2 \rho l_{cp}}{q\omega} = \frac{(I\omega)^2 \rho l_{cp}}{fQ},$$

где I — ток в обмотке (действующее значение);
 f — коэффициент заполнения окна медью;
 Q — сечение окна;
 l_{cp} — средняя длина витка обмотки;
 q — сечение провода рабочей обмотки.

В усилителе с самонасыщением м.д.с. управления $I_y \omega_y$ значительно меньше, чем м.д.с. рабочей обмотки [Л. 6-1]. Поэтому потерями в обмотке управления можно пренебречь. При расчете принимаем, что все окно занято рабочей обмоткой, так как обмотка управления занимает малую часть окна.

Потери в рабочей обмотке равны:

$$P_{м.р} = \delta^2 q^2 \frac{\rho l_{м.р} \omega_p}{q} = \delta^2 \rho S_{м.р} l_{м.р} = \delta^2 \rho V_m, \quad (П-3)$$

где V_m — объем, занятый медью обмотки;
 δ — плотность тока;

$S_{м.р}$ — сечение меди рабочей обмотки.

При определении температуры используем закон Ньютона:

$$P = k_t S_{охл} \tau, \quad (П-4)$$

где k_t — коэффициент теплоотдачи;

τ — превышение температуры обмотки над окружающей средой. Воспользовавшись (П-3) и (П-4), получим:

$$\delta^2 \rho S_{м.р} l_{м.р} = k_t S_{охл} \tau.$$

Положив $S_{охл} = 4 d l_m$, находим δ :

$$\delta = \sqrt{\frac{k_t S_{охл} \tau}{\rho S_{м.р} l_{м.р}}} = 2 \sqrt{\frac{k_t d \tau}{\rho S_{м.р}}}. \quad (П-5)$$

После подстановки (П-2) в (П-5) получим:

$$\delta = 4 \sqrt{\frac{k_t \tau}{\rho \pi \left(1 - \frac{d_0^2}{d^2}\right) k_{э.м}}} \frac{1}{\sqrt{d}}. \quad (П-6)$$

Для большого числа усилителей можно принять: $k_t = 13$ Вт/(м²·°С); $\tau = 50^\circ$ С; $\rho = 2,3 \cdot 10^{-8}$ Ом·м (для нагретого состояния); $k_{э.м} = 0,3$; $d_0/d = 0,5$.

Тогда зависимость (П-6) можно представить в виде

$$\delta = \frac{0,7 + 0,8}{\sqrt{d}},$$

где δ — в А/мм², а d — в метрах.

Таким образом, допустимая плотность тока обратно пропорциональна корню квадратному из диаметра магнитопровода. Чем меньше размеры магнитопровода, тем больше допустимая плотность тока.

в) Зависимость между мощностью в нагрузке, к. п. д. и кратностью по току от конструктивных параметров для усилителя по схеме рис. 6-9, б. Номинальная мощность в нагрузке равна:

$$P_n = P_{н.ср} = I_{н.ср}^2 R_n = U_n I_n. \quad (\text{П-7})$$

Выразим U_n и I_n через конструктивные факторы:

$$U_n = \eta \beta U = \eta \beta \cdot 4 f \omega_p B_m S_c, \quad (\text{П-8})$$

где β учитывает отличие реальной петли от идеальной (§ 6-5). Нагрев обмоток определяется действующим значением тока, который связан со средним значением через коэффициент формы тока $k_{\Phi i}$. Каждый МУ в двухполупериодной схеме имеет средний ток в обмотке, равный половине среднего тока нагрузки:

$$I_p = I_n / 2.$$

Тогда действующее значение тока в рабочей обмотке равно:

$$I_{др} = k_{\Phi i} I_n / 2$$

или

$$I_n = \frac{2 I_{др}}{k_{\Phi i}} = \frac{2 \delta q_{м.р} \omega_p}{k_{\Phi i} \omega_p} = \frac{2 \delta S_{м.р}}{k_{\Phi i} \omega_p}, \quad (\text{П-9})$$

где $k_{\Phi i}$ — коэффициент формы тока, протекающего через рабочую обмотку.

Подставив (П-8) и (П-9) в (П-7), получим:

$$P_n = U_n I_n = \frac{8 f}{k_{\Phi i}} \eta \beta \delta B_m S_{м.р} S_c. \quad (\text{П-10})$$

Мощность, отдаваемая нагрузке усилителя при прочих неизменных параметрах, прямо пропорциональна частоте.

При неизменных f , δ и B_m с ростом мощности усилителя растет произведение сечения меди на сечение стали, т. е. растут габариты усилителя.

Чем больше значение допустимой максимальной индукции B_m , тем большая мощность может быть снята с усилителя. С этой точки зрения материалы с более высокой индукцией насыщения позволяют уменьшать габариты аппарата.

Для расчета усилителя необходимо знать связь к.п.д. η с конструктивными параметрами усилителя:

$$\eta = \frac{R_n}{R_p} \approx \frac{R_n}{R_n + r_p} = 1 - \frac{I_n r_p}{U \beta}; \quad (\text{П-11})$$

$$r_p = \rho \frac{I_{ср} \omega_p}{q_p}.$$

После подстановки (П-8) и (П-9) в (П-11) получим:

$$\eta = 1 - \frac{\rho l_{м.р} \delta}{2k_{\Phi i} f \beta S_c B_m}. \quad (\text{П-12})$$

В качестве одного из заданных параметров обычно задается кратность изменения тока в нагрузке. Минимальный ток в нагрузке определяется током холостого хода, который зависит от материала, выбранного значения индукции, длины средней магнитной линии

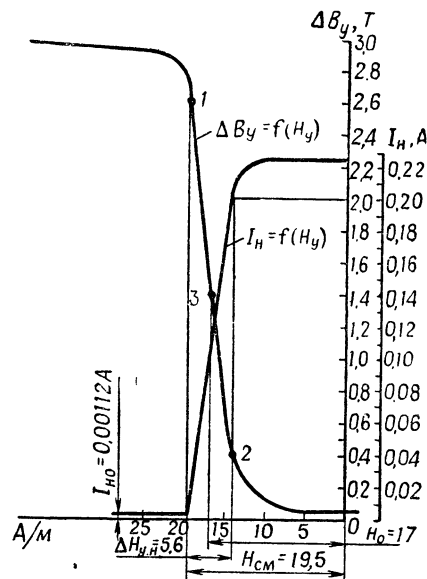


Рис. П-2.

магнитопровода и числа витков рабочей обмотки. Намагничивающий ток в каждом магнитопроводе схемы рис. 6-9, б равен:

$$I_{0cp} = H_{0cp} l_c / w_p.$$

Поскольку поочередно намагничиваются оба магнитопровода, то ток холостого хода за период удваивается:

$$I_{н.о} = \frac{2H_{0cp} l_c}{w_p}. \quad (\text{П-13})$$

Согласно рекомендации [Л. 6-2] напряженность холостого хода H_{0cp} (среднее значение) может быть найдена по динамической кривой размагничивания (рис. П-2). Эта величина есть напряженность постоянного поля, соответствующая точке 3, лежащей на середине линейного участка кривой размагничивания.

Кратность изменения тока

$$k_{кр.тока} = I_{II} / I_{H0}. \quad (\text{П-14})$$

После подстановки (П-9) и (П-13) в (П-14) получим:

$$k_{\text{кр-тока}} = \frac{S_{\text{м.р}} \delta}{k_{\Phi i} H_{0\text{ср}} l_{\text{с}}} . \quad (\text{П-15})$$

2. Пример расчета и выбор параметров МУС

Заданы $p_{\text{ср}}=20$ Вт; $I_{\text{п.ср}}=0,2$ А; $I_{\text{у}}=0,02$ А; $k_{\text{р}}=5000$; $f=50$ Гц; $\tau=50^\circ\text{С}$ и схема усилителя (рис. 6-9, б).

а) **Выбор магнитопровода.** Размер сердечника определяется произведением $S_{\text{с}} S_{\text{м.р}} = S_{\text{с}} S_{\text{м}}$. Для расчета этой величины с помощью уравнения (П-10) необходимо вначале задаться величинами η ; β ; $B_{\text{м}}$ и δ , ориентируясь на имеющийся опытный материал. Величины $B_{\text{м}}$ и β берем согласно табл. П-1 [Л. 6-8].

Сплавы марок 50НП и 65НП рекомендуется применять в том случае, когда требуется высокий коэффициент усиления по мощности $k_{\text{р}}$.

Т а б л и ц а П-1

Материал	$B_{\text{м}}, \text{Т}$	β
Сплав марки 65НП	0,9—1,1	0,9—0,95
Сплав марки 50НП	1,1—1,3	0,85—0,9
Холоднокатанные стали марок Э310, Э320, Э330, Э370, Э380 и др.	1,3—1,7	0,75—0,85

Выбираем для нашего случая сплав марки 50НП. Максимальную индукцию берем равной $B_{\text{м}}=1,3$ Т, $\beta=0,86$. Мощность $P_{\text{н}}$ связана с параметрами МУС уравнением (П-10):

$$S_{\text{с}} S_{\text{м}} = \frac{P_{\text{расч}} k_{\Phi i}}{8 f \eta \delta \beta B_{\text{м}}} = \frac{k_{\text{сх}} P_{\text{н}} k_{\Phi i}}{8 f \eta \delta \beta B_{\text{м}}} . \quad (\text{П-16})$$

Коэффициент $k_{\text{сх}}$ зависит от схемы усилителя и колеблется в пределах 0,8—8 [Л. 6-8]. Для схемы рис. 6-9, б $k_{\text{сх}}=1$.

Приближенные значения δ и η выберем по табл. П-2 [Л. 6-8]: $\delta=3,8$ А/мм²; $\eta=0,66$.

Для схемы рис. 6-9, б $k_{\Phi i}=\pi/2$; $k_{\text{сх}}=1$; $S_{\text{с}} S_{\text{м}}=2,68 \cdot 10^{-8}$ м⁴.

Приняв $k_{\text{з.м}}=0,3$, $k_{\text{з.с}}=0,85$ и $d_0/d=0,5$, воспользуемся табл. П-3, в которой приведены параметры ряда тороидальных ленточных сердечников. Геометрические параметры этих сердечников рассчитаны для принятых коэффициентов заполнения по меди и стали. Более полная таблица приведена в работе [Л. 6-2]. Первая цифра условного обозначения — внутренний диаметр, мм, вторая — внешний диаметр D , мм, и третья — высота сердечника h , мм.

Воспользуемся (П-16) для нашего случая

$$S_{\text{с}} S_{\text{м}} = \frac{P_{\text{н}} k_{\Phi i}}{8 \eta f \delta \beta B_{\text{м}}} = \frac{20\pi/2}{8 \cdot 0,66 \cdot 50 \cdot 3,8 \cdot 0,86 \cdot 1,3 \cdot 10^{-5}} = 2,79 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4.$$

Т а б л и ц а П-2

Тип магнитопровода	δ , А/мм ²	$f=50$ Гц		$f=400$ Гц	
		η	P_H , кВт	η	P_H , кВт
ОЛ40/56-12,5	3,75	0,56	0,013	0,94	0,170
ОЛ40/64-12,5	3,75	0,68	0,023	0,96	0,265
ОЛ45/70-16	3,54	0,74	0,041	0,97	0,430
ОЛ50/70-25	3,36	0,76	0,061	0,97	0,620
ОЛ50/80-25	3,36	0,83	0,100	0,98	0,930
ОЛ56/90-25	3,18	0,85	0,138	0,98	1,270
ОЛ64/100-25	2,96	0,86	0,180	0,98	1,650
ОЛ70/110-32	2,84	0,89	0,303	0,99	2,700
ОЛ80/128-32	2,66	0,90	0,455	0,99	4,040
ОЛ90/140-40	2,50	0,92	0,710	0,99	6,100
ОЛ100/160-40	2,37	0,93	1,020	0,99	8,650

Т а б л и ц а П-3

Тип магнитопровода	I_C , 10 ⁻² м	I_M , 10 ⁻² м	S_C , 10 ⁻⁴ м ²	S_M , 10 ⁻⁴ м ²	$S_C S_M$, 10 ⁻⁸ м ⁴
ОЛ40/56-12,5	15,0	7,10	0,85	2,83	2,40
ОЛ40/64-12,5	16,3	7,78	1,28	2,83	3,62
ОЛ45/70-16	18,0	8,95	1,70	3,58	6,09
ОЛ50/70-25	18,8	10,8	2,12	4,42	9,37
ОЛ50/80-25	20,5	11,6	3,18	4,42	14,1
ОЛ56/90-25	22,8	12,4	3,61	5,55	20,0
ОЛ64/100-25	25,7	13,2	3,82	7,25	27,7
ОЛ70/110-32	28,2	15,4	5,44	8,67	47,1
ОЛ80/128-32	32,6	17,0	6,54	11,3	74,0
ОЛ90/140-40	36,2	19,5	8,50	14,3	122
ОЛ100/160-40	41,0	21,2	10,2	17,7	181

Выбираем сердечник ОЛ 40/64-12,5, имеющий $S_C S_M = 3,62 \times 10^{-8} \text{ м}^4$, $d = 40 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $D = 64 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $b = 12,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

После этого производим уточненный расчет δ и η с помощью формул (П-5) и (П-12):

$$\delta = 3,68 \text{ А/мм}^2; \quad \eta = 0,707.$$

Значения S_M , I_M , S_C берем из табл. П-3. Коэффициент теплоотдачи k_T и удельное сопротивление меди ρ берем равными: $k_T = 10 \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^\circ\text{С)}$; $\rho = 2,3 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ (для нагретого состояния обмотки).

Определив уточненные значения δ и η , вновь по формуле (П-10) рассчитываем $S_C S_M$ и определяем, обеспечивает ли выбранный сердечник необходимое значение этого произведения. В заключение рас-

чета мощность МУС проверяется еще раз с использованием реальных величин η , δ и $S_m S_c$.

б) **Расчет параметров обмоток.** Напряжение на нагрузке

$$U_n = \frac{P_n}{I_n} = \frac{20}{0,2} = 100 \text{ В};$$

напряжение источника питания (действующее значение)

$$U_d = \frac{U_n k_{\Phi u}}{\beta \eta} = \frac{100 \cdot 1,11}{0,86 \cdot 0,707} = 182,5 \text{ В}.$$

В режиме максимальной отдачи напряжение на нагрузке имеет синусоидальную форму, поэтому

$$k_{\Phi u} = 1,11.$$

Число витков рабочей обмотки

$$w_p = \frac{U_d}{4,44 / S_c B_m} = 4950.$$

Сечение и диаметр голого провода рабочей обмотки:

$$q_p = \frac{\pi d_p^2}{4} = \frac{I_d}{\delta} = \frac{I_n k_{\Phi l}}{2\delta},$$

откуда

$$d_p = \sqrt{\frac{2 I_n k_{\Phi l}}{\pi \delta}}.$$

Выбираем провод марки ПЭВ-2: $d_p = 0,23 \text{ мм}$; $d_{p.из} = 0,275 \text{ мм}$; $q_p = 0,0415 \text{ мм}^2$.

Сопротивление рабочей обмотки

$$r_p = \frac{4 \rho l_{cp} w_p}{\pi d_p^2} = 213 \text{ Ом}; \quad \rho = 2,3 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Реальный к. п. д.

$$\eta = \frac{R_n}{R_n + r_p} = \frac{500}{713} = 0,702.$$

в) **Выбор выпрямителей рабочей цепи.** Прямой ток через каждый вентиль равен половине тока нагрузки:

$$I_{в.ср} = \frac{I_n}{2} = 0,1 \text{ А}.$$

К каждому вентилю (в непроводящий полупериод) прикладывается амплитуда напряжения источника питания

$$U_m = \sqrt{2} U_d = 258 \text{ В}.$$

Ввиду того что число витков рабочей обмотки велико ($w_p = 4950$), необходимо взять диод с малым обратным током (§ 6-5). Выбираем кремниевый диод Д209 с прямым током 0,1 А, обратным напряжением 400 В и обратным током 5 мкА (при температуре $+20^\circ\text{C}$ и обратном напряжении 258 В). Тогда

$$H_{\text{обр}} = \frac{I_{\text{обр}} w_p}{l_c} = \frac{5 \cdot 10^{-6} \cdot 4250}{16} = 0,15 \text{ А/м} \ll \Delta H_{y.n} = 5,6 \text{ А/м}.$$

г) **Расчет обмотки управления и смещения.** Для определения параметров обмотки управления необходимо воспользоваться кривой размагничивания $\Delta B_y(H_y)$ для сплава 50НП с толщиной ленты $0,05 \cdot 10^{-3}$ м (рис. П-2). Для того чтобы характеристика управления усилителя была линейной, необходимо, чтобы он работал на линейной части кривой $\Delta B_y(H_y)$ — точки 1 и 2 на рис. П-2. Задаваясь различными значениями ΔB_y , находим ток в нагрузке, воспользовавшись уравнением (6-11). Далее с помощью кривой размагничивания находим соответствующее значение H_y и строим зависимость $I_n = f(H_y)$. Для изменения тока нагрузки от максимального значения ($I_n = 0,2$ А) до минимального необходимо, чтобы обмотка управления создавала $\Delta H_{y.n} = 5,6$ А/м. Тогда число витков обмотки управления будет равно:

$$w_y = \frac{\Delta H_{y.n} l_c}{I_y} = \frac{5,6 \cdot 0,163}{0,02} = 46.$$

Мощность управления определяем, зная коэффициент усиления:

$$P_y = \frac{P_n}{k_p} = \frac{20}{5000} = 0,04 \text{ Вт}.$$

Сопротивление двух обмоток управления равно:

$$2r_y = \frac{P_y}{I_y^2} = \frac{0,004}{0,0004} = 10 \text{ Ом}.$$

Сопротивление одной обмотки

$$r_y = 5 \text{ Ом}.$$

Средняя длина витка обмотки управления l_y равна:

$$l_y \approx 2b_0 + D_0 - d_0.$$

Поскольку обмотки управления и смещения занимают небольшую площадь, то b_0 , D_0 и d_0 можно взять из расчета размещения обмоток (§ П-1, д). Средняя длина витка обмотки управления

$$l_y = 2,25 + 72 - 22 = 100 \text{ мм} = 0,1 \text{ м}.$$

Диаметр провода обмотки управления

$$d_y = \sqrt{\frac{4\rho l_y w_y}{\pi r_y}} \sqrt{\frac{4 \cdot 2,3 \cdot 10^{-8} \cdot 0,1 \cdot 46}{3,14 \cdot 5}} = 1,65 \cdot 10^{-4} \text{ м} = 0,165 \text{ мм}.$$

Выбираем провод марки ПЭВ-2: $d_y = 0,17$ мм; $q_y = 0,0227$ мм²; $d_{y.из} = 0,21$ мм.

Сопротивление обмотки управления при $d_y = 0,17$ мм равно:

$$r_y = \frac{\rho l_y w_y}{q_y} = 4,66 \text{ Ом.}$$

В том случае, когда необходимо, чтобы ток нагрузки I_n возрастал с увеличением тока управления I_y , на усилителе размещается обмотка смещения, создающая отрицательную м.д.с., равную $H_{см} l_c$. Обмотки w_y и w_c включаются встречно; м.д.с. обмотки w_c равна:

$$I_{см} w_c = H_{см} l_c.$$

Согласно рекомендации [Л. 6-2] ток в обмотке смещения должен быть не менее чем на два порядка больше по отношению к обратному току вентилей в цепи смещения. Если используются вентили Д226 (обратный ток 0,1 мА), то ток смещения должен быть не менее 10 мА.

Задаемся током в обмотке смещения $I_{см} = 0,03$ А. Тогда число витков обмотки смещения равно:

$$w_{см} = \frac{H_{см} l_c}{I_{см}} = \frac{0,196 \cdot 16,3}{0,03} = 107.$$

Возьмем в обмотке смещения такую же плотность тока, как и в рабочей обмотке. Тогда сечение провода обмотки смещения будет равно:

$$q_{см} = \frac{I_{см}}{\delta} = \frac{0,03}{3,76} = 0,008 \text{ мм}^2.$$

Выбираем провод ПЭВ-2: $d_{см} = 0,11$ мм; $d_{см.из} = 0,14$ мм; $q_{см} = 0,0095$ мм².

Принимая, что $l_y = l_{см}$, определяем сопротивление обмотки смещения:

$$R_{см} = \frac{\rho l_{см} w_{см}}{q_{см}} = \frac{\rho l_y w_{см}}{q_{см}} = \frac{2,3 \cdot 10^{-8} \cdot 0,1 \cdot 107}{9,5 \cdot 10^{-9}} = 26 \text{ Ом.}$$

Мощность, потребляемая обмоткой смещения,

$$P_{см} = I_{см}^2 R_{см} = (0,03)^2 \cdot 26 = 23,4 \cdot 10^{-3} \text{ Вт.}$$

Характеристика управления усилителя при наличии обмотки смещения дана на рис. П-3.

д) **Проверка размещения обмоток.** После расчета параметров обмоток проверяется их размещение на магнитопроводе. Сечение, занятое всеми тремя обмотками, равно:

$$Q_{обм} = \frac{w_p d_{p.из}^2}{k_{укл.p}} + \frac{w_y d_{y.из}^2}{k_{укл.y}} + \frac{w_{см} d_{см.из}^2}{k_{укл.см}}.$$

Коэффициенты укладки $k_{укл.}$ определяем по рис. П-4.

Часть окна занята каркасом; на каркас и зазор между ним и сердечником можно положить $\Delta = 2 \cdot 10^{-3}$ м.

Тогда диаметр отверстия, свободного от обмотки, можно найти с помощью уравнения

$$\frac{\pi d_0^2}{4} = \frac{\pi}{4} (d - 2\Delta)^2 - \frac{w_p d_{p.из}^2}{k_{укл.p}} - \frac{w_y d_{y.из}^2}{k_{укл.y}} - \frac{w_{см} d_{см.из}^2}{k_{укл.см}},$$

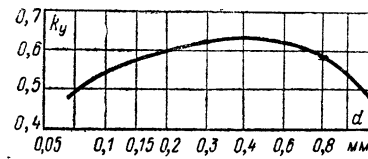
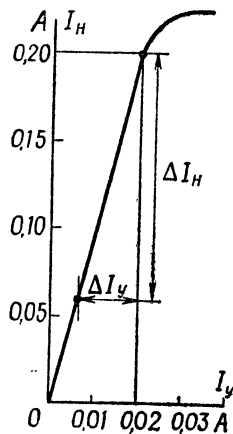


Рис. П-4.

Рис. П-3.

откуда

$$d_0 = \sqrt{(d - 2\Delta)^2 - \frac{4}{\pi} \left(\frac{w_p d_{p.из}^2}{k_{укл.p}} + \frac{w_y d_{y.из}^2}{k_{укл.y}} + \frac{w_{см} d_{см.из}^2}{k_{укл.см}} \right)} = 22 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

При расчете усилителя удобно пользоваться относительной величиной геометрических размеров [Л. 6-8]:

$$D_* = \frac{D}{d} = 1,6; \quad d_{0*} = \frac{d_0}{d} = 0,55; \quad b_* = \frac{b}{d} = 0,312.$$

Средняя высота обмотки равна;

$$b_0 = b + 0,5 [(D_0 - D) + (d - d_0)] = 25 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Внешний диаметр

$$D_0 = \sqrt{(d^2 - d_0^2) + D^2} = 72 \cdot 10^{-3} \text{ м [см. (П-1)].}$$

Поверхность охлаждения согласно [Л. 6-8] равна:

$$S_{охл} = d^2 \pi D_{0*} [b_* + D_{0*} - 0,5 (D_* - 1 + d_{0*})] = 139 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2;$$

$$D_{0*} = \frac{D_0}{d} = 1,8.$$

Поскольку $d_0/d > 0,5$, то остается отверстие, достаточное для прохождения через него челнока обмоточного станка. После определения всех размеров дросселя находим тип станка [Л. 6-2].

е) **Определение коэффициентов усиления и постоянной времени.** После того как определены параметры сердечника и обмоток и построена характеристика управления, определяем коэффициенты усиления и постоянную времени T , используя линейную часть характеристики рис. П-3:

$$k_i = \frac{\Delta I_n}{\Delta I_y} = \frac{0,14}{0,014} = 10;$$

$$k_U = \frac{\Delta I_n R_n}{\Delta I_y \cdot 2r_y} = 10 \frac{500}{2 \cdot 4,66} = 538;$$

$$k_P = k_i^2 \frac{R_n}{2r_y} = 100 \frac{500}{2 \cdot 4,66} = 5380.$$

Поскольку обмотка смещения потребляет очень малую мощность, то последовательно с этой обмоткой можно включить большое активное сопротивление. При этом обмотка смещения не будет увеличивать инерционность усилителя и при расчете постоянной времени T обмотку можно не учитывать:

$$T = \frac{1}{2f} \frac{\omega_y}{\omega_p} \frac{1}{\eta} k_U = \frac{538 \cdot \frac{46}{4950}}{2 \cdot 50 \cdot 0,702} = 0,0715 \text{ с.}$$

ж) **Проверка на нагрев.** Рассчитываем превышение температуры

$$\tau = \frac{P_p}{k_T S_{охл}} = \frac{k_{\Phi i}^2 \left(\frac{I_n}{2} \right)^2 r_p}{10^{-3} \cdot 139} = 37,8^\circ \text{ С.}$$

Поскольку допустимое превышение температуры $\tau = 50^\circ \text{ С}$, то с усилителя может быть снята большая мощность.

з) **Определение кратности изменения тока нагрузки**

$$k_{кр.тока} = \frac{I_n}{I_{н0}} = \frac{I_n \omega_p}{2H_{ср} I_c} = \frac{0,2 \cdot 4950}{2 \cdot 0,17 \cdot 16,3} = 179.$$

Значение $H_{ср}$ определяем по рис. П-2.

ПРИЛОЖЕНИЕ II
Нагревостойкость электроизоляционных материалов
(по ГОСТ 8865-70)

Класс нагревостойкости	Температура, °С	Характеристика основных групп электроизоляционных материалов, соответствующих данному классу нагревостойкости
Y	90	Непропитанные и не погруженные в жидкий электроизоляционный материал волокнистые материалы из целлюлозы, хлопка и шелка, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов
A	105	Пропитанные или погруженные в жидкий электроизоляционный материал волокнистые материалы из целлюлозы, хлопка или шелка, а также соответствующие данному классу другие сочетания материалов
E	120	Некоторые синтетические органические пленки, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов
B	130	Материалы на основе слюды (в том числе на органических подложках), асбеста и стекловолокна, применяемые с органическими связующими и пропитывающими составами, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов
F	155	Материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые в сочетании с синтетическими связующими и пропитывающими составами, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов
H	180	Материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые в сочетании с кремнийорганическими связующими и пропитывающими составами, кремнийорганические эластомеры, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов
C	Более 180	Слюда, керамические материалы, стекло, кварц, применяемые без связующих составов или с неорганическими или кремнийорганическими связующими составами, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов

ПРИЛОЖЕНИЕ III

**Допустимые превышения температуры для аппаратов
низкого напряжения по ГОСТ 12434-73 (для температуры
окружающего воздуха +40° С)**

Наименование частей аппарата	Аппараты распре- деления энергии. Про- должительный режим работы		Аппараты управления приемниками энергии. Продолжительный, пре- рывисто-продолжитель- ный, повторно-кратко- временный и кратковре- менный режимы работы	
	в воздухе	в транс- форма- торном масле	в воздухе	в транс- форма- торном масле
1. Контакты, коммутиру- ющие главные цепи:				
а) из меди	55	40	65; см. примечания 1, 2	65; см. примеча- ние 1
б) гальванически покрытые серебром	См. при- мечание 3	50	См. при- мечание 3	65
в) с накладками из сереб- ра и металлокерами- ческих композиций на базе серебра с окисью кадмия или с окисью меди	См. при- мечание 4	50	См. при- мечание 4	65
2. Блок-контакты с на- кладками из серебра	80	50	80; см. примечание 2	65
3. Контактные соедине- ния внутри аппаратов и неразмыкаемые вин- товые, болтовые, за- клепочные и другие жесткие соединения (кроме паяных и свар- ных):				
а) из меди и ее сплавов; из алюминия и его сплавов без защитных покрытий контактных поверхностей	55	50	55	55

Продолжение прилож. III

Наименование частей аппарата	Аппараты распределения энергии. Продолжительный режим работы		Аппараты управления приемниками энергии. Продолжительный, прерывисто-продолжительный, повторно-кратковременный режимы работы	
	в воздухе	в трансформаторном масле	в воздухе	в трансформаторном масле
б) из меди и ее сплавов, из алюминия и его сплавов и из низкоуглеродистой стали, защищенные от коррозии покрытием контактных поверхностей соответствующим металлом, обеспечивающим стабильность переходного сопротивления лучше меди	65	50	65	65
в) из меди и ее сплавов и из низкоуглеродистой стали, защищенные от коррозии покрытием контактных поверхностей серебром	95	50	60	65
4. Обмотки многослойных катушек с изоляционными материалами нагревостойкостью по ГОСТ 8865-70:				
класса А . . .	65	60	80	60
» Е . . .	80	60	90	60
» В . . .	90	60	100	60
» F . . .	110	—	120	—
» Н . . .	130	—	140	—

Примечания:

1. При продолжительном режиме работы превышение температуры должно быть не более 55° С.

2. Указанное превышение температуры при повторно-кратковременном режиме работы не должно быть большим при испытании в условиях, когда на контактах возникнет электрическая дуга.

3. Температура ограничивается нагревостойкостью соседних частей, если слой серебра не повреждается электрической дугой и не стирается при испытании на механическую износостойкость при нагретых контактах. В противном случае эти контакты должны рассматриваться как не имеющие покрытия серебром.

4. Температура ограничивается нагревостойкостью соседних частей, но не должна превышать 200° С.

Список литературы

К главе первой

- 1-1. Нейман Л. Р., Демирчян К. С. Теоретические основы электротехники. Т. 1 и 2. Л., «Энергия». 524 и 408 с.
- 1-2. Холявский Г. Б. Расчет электродинамических усилий в электрических аппаратах. Л. — М., Госэнергоиздат, 1962. 184 с.
- 1-3. Буйлов А. Я. Основы электроаппаратостроения. М. — Л., Госэнергоиздат, 1946. 372 с.
- 1-4. Буткевич Г. В., Михайлов В. В., Ратгауз И. И. Реакторы. М. — Л., Госэнергоиздат, 1933. 182 с.
- 1-5. Залесский А. М. Электрические аппараты высокого напряжения. Л. — М., Госэнергоиздат, 1957. 540 с.
- 1-6. Залесский А. М. и Бачурин Н. И. Изоляция аппаратов высокого напряжения. Л. — М., Госэнергоиздат, 1961. 258 с.
- 1-7. Романовский В. Б. Теория колебаний шин и изоляторов под влиянием электродинамических усилий. — В кн.: Высоковольтное аппаратостроение. ОНТИ НКТП СССР, 1935.
- 1-8. Васильев А. А. Электрическая часть станций и подстанций. Ч. 1. М. — Л., Госэнергоиздат, 1963. 495 с.
- 1-9. Основы теории электрических аппаратов. Под редакцией Г. В. Буткевича. М., «Высшая школа», 1970. 600 с.

К главе второй

- 2-1. Залесский А. М., Кукеков Г. А. Тепловые расчеты электрических аппаратов. Л., «Энергия», 1967. 378 с.
- 2-2. Гордой А. В., Сливинская А. Г. Электромагниты переменного тока. М., «Энергия», 1968. 200 с.
- 2-3. Дружинин В. В. Магнитные свойства электротехнической стали. М., «Энергия», 1974. 240 с.
- 2-4. Чунихин А. А. Уменьшение активных потерь в ферромагнитных частях масляного выключателя. — «Вестник электропромышленности», 1960, № 2.
- 2-5. Михайлов В. В. Расчет и конструирование высоковольтной аппаратуры. М. — Л., Госэнергоиздат, 1955. 270 с.
- 2-6. Брон О. Б. Электрические аппараты с водяным охлаждением. Л., «Энергия», 1967. 264 с.
- 2-7. Таев И. С. Электрические аппараты управления. Высшая школа, 1969. 446 с.
- 2-8. Новиков Ю. Н. Теория и расчет электрических аппаратов. Л., «Энергия», 1970. 327 с.

2-9. **Афанасьев В. В.** Конструкция выключающих аппаратов высокого напряжения. Л., «Энергия», 1969. 640 с.

2-10. **Хомяков М. В.** Уход за электрическими контактами. М., «Энергия», 1967. 104 с.

К главе третьей

3-1. **Хольм Р.** Электрические контакты. М., Изд-во иностр. лит., 1961. 464 с.

3-2. Электротехнический справочник МЭИ. Т. 1. М., «Энергия», 1971. 880 с.

3-3. **Брон О. Б.** Электрическая дуга в аппаратах управления. Л. — М., Госэнергоиздат, 1954. 532 с.

3-4. **Родштейн Л. А.** Электрические аппараты. Л., «Энергия», 1971. 392 с.

3-5. **Витенберг М. И.** Расчет электромагнитных реле для аппаратуры автоматики и связи. Л., «Энергия», 1966. 724 с.

3-6. **Буткевич Г. В. и Иоффе Б. Е.** Исследование пальцевых контактов масляных выключателей при больших силах тока. — «Теоретическая и экспериментальная электротехника», 1932, № 5—6.

3-7. **Кузнецов Р. С.** Аппараты распределения электрической энергии на напряжение до 1000 В. М., «Энергия», 1970. 543 с.

3-8. **Витенберг М. И.** Расчет электромагнитных реле для аппаратуры автоматики и связи. Л. — М., Госэнергоиздат, 1961. 704 с.

3-9. **Мелашенко И. П.** Дугостойкая металлокерамика для контактных систем силовых выключателей. М., ВИНТИ, 1959.

3-10. **Чунихин А. А., Годжелло А. Г., Логинов А. Д.** Повышение надежности выключателя ВМГ-133 с приводами различных типов. — «Энергетик», 1963, № 9.

3-11. **Баранов И. Б.** Холодная сварка пластических металлов. М., Машгиз, 1959.

3-12. **Хомяков М. В., Якобсон И. А.** Термитная сварка многопроводных проводов линий электропередачи и подстанций. М. — Л., Госэнергоиздат, 1960. 37 с.

3-13. **Хомяков М. В.** Испытание и контроль контактных соединений электрооборудования. М., «Энергия», 1964. 37 с.

3-14. **Сотсков Б. С.** Основы расчета и проектирования электро-механических элементов автоматических и телемеханических устройств. М., «Энергия», 1965. 576 с.

3-15. **Никифоровский Н. Н.** О коммутации тока при размыкании одной из двух параллельных цепей электрических аппаратов. — «Электричество», 1959, № 12.

3-16. **Срибнер Л. А.** Путевые выключатели на магнитоуправляемых контактах. М., «Энергия», 1971. 56 с.

3-17. **Буль Б. К., Шоффа В. Н.** Магнитоуправляемые герметизированные устройства (герконы). Ч. I и II. М., Информстандартэлектро, 1967.

3-18. **Харазов К. И.** Реле с магнитоуправляемыми контактами. М., «Энергия», 1971. 88 с.

3-19. **Буль Б. К., Шоффа В. Н., Коробков Ю. С.** Сравнительный анализ основных принципов построения и перспективы развития импульсных коммутационных элементов — ферридов. — «Электропромышленность», 1972, вып. 2(10).

К главе четвертой

- 4-1. Сена Л. А. О механизме возникновения дуги при разрыве цепи. — «Журнал экспериментальной и теоретической физики», 1945, т. 15, вып. 8.
- 4-2. Буткевич Г. В. Дуговые процессы при коммутации электрических цепей. М., «Энергия», 1973, 263 с.
- 4-3. Залесский А. М. Электрическая дуга отключения. Л. — М., Госэнергоиздат, 1963, 266 с.
- 4-4. Баталов Н. М., Петров Б. Н. Тяговые электрические аппараты. М. — Л., Госэнергоиздат, 1961, 208 с.
- 4-5. Таев И. С. Электрическая дуга в аппаратах низкого напряжения. М., «Энергия», 1965, 224 с.
- 4-6. Техника высоких напряжений. Под редакцией Д. В. Разевига. М. — Л., Госэнергоиздат, 1963, 472 с.
- 4-7. Буйлов А. Я. Основные типы современных выключателей высокого напряжения. — «Электричество», 1946, № 5.
- 4-8. Бабилов М. А., Чунихин А. А. Двухступенчатое гашение дуги в масляных выключателях на напряжение 6 кВ. М., МЭИ, 1951.
- 4-9. Спиридонов В. И. Метод расчета шунта в низковольтных аппаратах. — «Электричество», 1963, № 8, с. 32—36.
- 4-10. Цейров Е. М. Воздушные выключатели высокого напряжения. М. — Л., Госэнергоиздат, 1957, 311 с.

К главе пятой

- 5-1. Гордон А. В. и Сливинская А. Г. Электромагниты постоянного тока. М. — Л., Госэнергоиздат, 1960, 447 с.
- 5-2. Буль Б. К. Основы теории и расчета магнитных цепей. М., «Энергия», 1964, 464 с.
- 5-3. Преображенский А. А. Теория магнетизма, магнитные материалы и элементы. М., «Высшая школа», 1972, 288 с.
- 5-4. Проектирование электрических аппаратов авиационного электрооборудования. М., Оборонгиз, 1962. Авт.: В. А. Балагуров, Ф. Ф. Галтеев, А. В. Гордон, А. Н. Ларионов. 515 с.
- 5-5. Львов Е. Л. Связь между различными методами расчета статических тяговых сил в электромагнитных системах. — «Труды МЭИ», вып. VII. М. — Л., 1951.
- 5-6. Сахаров П. В. Проектирование электрических аппаратов. М., «Энергия», 1971, 560 с.
- 5-7. Лысов Н. Е. Расчет электромагнитных механизмов. М., Оборонгиз, 1949, 111 с.
- 5-8. Бабилов М. А., Чунихин А. А. Новая конструкция дугогасительного устройства для увеличения мощности отключения выключателя ВМ-22. — «Труды МЭИ», вып. XV, 1955.
- 5-9. Никитенко А. Г., Черный А. С. Расчет динамических характеристик электрических аппаратов переменного тока на электронно-вычислительных машинах непрерывного действия. — «Известия вузов, Электротехника», 1960, № 8.
- 5-10. Бабилов М. А. Электрические аппараты. Ч. 1. М. — Л., Госэнергоиздат, 1951, 420 с.
- 5-11. Сливинская А. Г., Гордон А. В. Постоянные магниты. М., «Энергия», 1965, 128 с.
- 5-12. Ступель Ф. А. Электромеханические реле. Основы проектирования и расчета. Харьков, Изд-во Харьковского университета, 1956, 354 с.

- 5-13. Гордон А. В., Сливинская А. Г. Поляризованные электромагниты. М., «Энергия», 1964. 120 с.
- 5-14. Сливинская А. Г. Электромагниты и постоянные магниты. М., «Энергия», 1972. 248 с.
- 5-15. Тер-Акопов А. К. Динамика быстродействующих электромагнитов. М., «Энергия», 1965. 168 с.
- 5-16. Сливинская А. Г., Чунихин А. А. К расчету динамической тяговой характеристики электромагнита постоянного тока. — «Труды МЭИ», вып. XV. Госэнергоиздат, 1955, с. 1—18.
- 5-17. Любчик М. А. Оптимальное проектирование силовых электромагнитных механизмов. М., «Энергия», 1974. 392 с.

К главе шестой

- 6-1. Львов Е. Л. Магнитные усилители в технике автоматического регулирования. М., «Энергия», 1971. 552 с.
- 6-2. Липман Р. А., Негневицкий И. Б. Магнитные усилители постоянного тока с самонасыщением. МЭИ, 1966.
- 6-3. Розенблат М. А. Магнитные элементы автоматики и вычислительной техники. М., «Наука», 1966.
- 6-4. Чунихин А. А. Электрические аппараты. М., «Энергия», 1967. 535 с.
- 6-5. Юревич Е. И. Электромагнитные устройства автоматики. Л., «Энергия», 1964. 415 с.
- 6-6. Розенблат М. А. Магнитные усилители и модуляторы. М. — Л., Госэнергоиздат, 1963. 112 с.
- 6-7. Электротехнический справочник МЭИ. Т. 3. М., «Энергия», 1966. 871 с.
- 6-8. Липман Р. А. и Негневицкий И. Б. Быстродействующие магнитные и магнитно-полупроводниковые усилители. М. — Л., Госэнергоиздат, 1960. 403 с.

К главе седьмой

- 7-1. Сапожников А. В. Уровни изоляции электрооборудования высокого напряжения. М., «Энергия», 1969. 296 с.
- 7-2. Кукеков Г. А. Проектирование выключателей переменного тока высокого напряжения. Л., «Энергия», 1972. 336 с.
- 7-3. Тереза Г. П. Заводские испытательные станции низковольтной аппаратуры. М. — Л., Госэнергоиздат, 1949. 156 с.
- 7-4. Хомяков М. В. Профилактические испытания высоковольтного оборудования. М. — Л., Госэнергоиздат, 1957. 233 с.

К главе восьмой

- 8-1. Бачурин Н. И. Некоторые вопросы проектирования механизмов высоковольтных выключателей. — В кн.: Высоковольтное аппаратостроение. Л. — М., Госэнергоиздат, 1954.
- 8-2. Буйлов А. Я. Выключатели переменного тока высокого напряжения. ОНТИ, 1936.
- 8-3. Бабинов М. А. Электрические аппараты. Ч. III. М. — Л., Госэнергоиздат, 1963. 736 с.
- 8-4. Ачеркан Н. С. Детали машин. М., Машгиз, 1954.

К главе девятой

- 9-1. Булгаков В. А. Электрическая аппаратура управления. М.—Л., Госэнергоиздат, 1947.
9-2. Вешеневский С. Н. Характеристики двигателей в электроприводе. М., «Энергия», 1967. 472 с.
9-3. Ильинский Н. Ф. Расчет и выбор пусковых сопротивлений для электродвигателей. М., «Энергия», 1966. 70 с.

К главе десятой

- 10-1. Кобленц М. Г. Контакторы постоянного тока для металлургических электроприводов. — «Электропромышленность и приборостроение», 1960, № 14. с. 15—18.
10-2. Ермолаев И. Н. Магнитные пускатели переменного тока. М. — Л., Госэнергоиздат, 1961. 63 с.

К главам одиннадцатой и двенадцатой

- 11-1. Федосеев А. М. Релейная защита электрических систем. М. — Л., Госэнергоиздат, 1961. 440 с.
11-2. Сотсков Б. С. Элементы автоматической и телемеханической аппаратуры. М. — Л., Госэнергоиздат, 1950.
11-3. Аппараты низкого напряжения. Реле. Сводный каталог.
11-4. Зимин Е. Н. Защита асинхронных двигателей до 500 В. М. «Энергия», 1967. 88 с.

К главе тринадцатой

- 13-1. Ройзен С. С., Стефанович Т. Х. Магнитные усилители в приводе и автоматике. М., «Энергия», 1970. 552 с.
13-2. Тищенко Н. М. Бесконтактные магнитные реле. М. — Л., Госэнергоиздат, 1961. 128 с.
13-3. Тищенко Н. М. Стабильность магнитных усилителей. М., «Энергия», 1964. 320 с.
13-4. Липман Р. А. Полупроводниковые реле. М. — Л., Госэнергоиздат, 1963. 96 с.
13-5. Васильева Н. П., Петрухин Б. П. Проектирование логических элементов автоматики. М. — Л., «Энергия», 1970. 336 с.
13-6. Единая серия полупроводниковых логических и функциональных элементов (ЭТ). М., «Энергия», 1966, 112 с. Авт.: Гиршберг В. В., Доманицкий С. М. и др.
13-7. Архипцев Ю. Ф. Бесконтактные элементы автоматики. «Энергия», 1972. 88 с.
13-8. Зыков В. А. и др. Трехфазный бесконтактный пускатель на тиристорах. Электрическая аппаратура для машиностроения, материалы семинара. МДНТП, 1966.
13-9. Бронштейн А. М., Иоффе Ю. Н. Исследование макета вентильно-механического отключающего устройства высокого напряжения. — «Электричество», 1970, № 7.
13-10. Бирюков А. В. и др. Транзисторные устройства защиты, автоматики, сигнализации и управления для КРУ 3—10,5 кВ. — «Электрические станции», 1971, № 3.
13-11. Транзисторные схемы автоматического управления. Под ред. Ю. И. Конева. М., «Советское радио», 1967.

13-12. Коссов О. А. Усилители мощности в режиме переключения. Л., «Энергия», 1971. 432 с.

13-13. Бесконтактные элементы промышленной телемеханики. М., «Энергия», 1973. Авт.: В. С. Крутенко и др.

13-14. Чебовский О. Г., Моисеев Л. Г., Сахаров Ю. В. Силовые полупроводниковые приборы. М., «Энергия», 1975.

13-15. Бесконтактные устройства защиты для низковольтных электрических аппаратов. М., «Энергия», 1971. 88 с. Авт.: Могилевский Г. В., Райнин В. Е. и др.

К главе четырнадцатой

14-1. Датчики систем автоматического контроля и регулирования. ГНТИ машиностроительной литературы, 1959. Авт.: Агейкин Д. И. и др.

14-2. Туричин А. М. Электрические измерения неэлектрических величин. Изд. 4-е. Л., «Энергия», 1966.

14-3. Электрические измерения. М., «Вышая школа». Под редакцией Е. Г. Шрамкова, 1972.

14-4. Аранович Б. И., Шамрай Б. В. Электромагнитные устройства автоматики. Л., «Энергия», 1965. 484 с.

14-5. Чесноков А. А. Решающие усилители. М. — Л., Госэнергоиздат, 1963. 64 с.

К главе пятнадцатой

15-1. Поздеев А. Д., Розман Я. Б. Электромагнитные муфты и тормоза с массивным якорем. М. — Л., Госэнергоиздат, 1963. 104 с.

15-2. Воробьева Т. М. Электромагнитные муфты. М. — Л., Госэнергоиздат, 1960. 207 с.

15-3. Могилевский В. Г. Электромагнитные порошковые муфты и тормоза. М., «Энергия», 1964, 104 с.

15-4. Мастяев Н. З., Орлов И. Н. Гистерезисные электродвигатели. М., МЭИ, 1963.

15-5. Мизюрин С. Р., Ермилов М. А. Проектирование магнитно-гистерезисных муфт. М., МАИ, 1966.

К главе семнадцатой

17-1. Айзенберг Б. Л. Плавкие предохранители в установках напряжением до 1000 В. Л. — М., Госэнергоиздат, 1955, 143 с.

17-2. Мелькумов А. М. Современные высоковольтные предохранители, ЦБТИ, 1947.

17-3. Мелькумов А. М. Некоторые исследования применения металлических растворителей плавких вставок предохранителей. — «Электричество», 1949, № 6.

17-4. Мелькумов А. М. и Жиронкина З. Л. Новые низковольтные предохранители с большой отключающей способностью. — «Электричество», 1947, № 5.

17-5. Ефремов И. С. и др. Исследование перегрузочной способности тиристорных ВКДУ. — «Электротехника», 1966, № 12.

17-6. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). Разд. I, III. М. — Л., Госэнергоиздат, 1957.

17-7. Лившиц Д. С. Нагрев проводников и защита предохранителями в электросетях до 1000 В. М. — Л., Госэнергоиздат, 1959. 40 с.

К главе восемнадцатой

18-1. Артоболевский С. И. и Козинцев Б. П. О классификации механизмов свободного расцепления автоматов защиты. — «Вестник электропромышленности», 1952, № 6.

18-2. Голубев А. И. Быстродействующие автоматические выключатели. М., «Энергия», 1964. 240 с.

К главе девятнадцатой

19-1. ГОСТ 687-70. Выключатели переменного тока высокого напряжения.

19-2. Чернышев Н. М. Об учете аperiodической составляющей в отключаемом токе. — «Электричество», 1956, № 2.

19-3. Чунихин А. А., Горкин В. Д. Влияние различных факторов на время срабатывания индукционно-динамического привода контактов синхронизированного выключателя высокого напряжения. — «Труды МЭИ», вып. 244, 1975, с. 1—7.

19-4. Коровяковский И. Г. Приводы к выключателям высокого напряжения. М. — Л., Госэнергоиздат, 1962. 223 с.

19-5. Чернов Ю. И. Гидравлические системы для высоковольтных выключателей. — «Электротехника», 1968, № 11.

19-6. Афанасьев В. В. Воздушные выключатели. Л., «Энергия», 1964. 304 с.

19-7. Афанасьев В. В., Макарова Н. А. Установки по производству сжатого воздуха для распределительных устройств с воздушными выключателями. — В кн.: Высоковольтное аппаратостроение. Л. — М., Госэнергоиздат, 1954.

19-8. Вишневский Ю. И. и Филиппов Ю. А. Воздушные выключатели новой серии с металлической дугогасительной камерой на напряжение 110—750 кВ. Доклад на семинаре ВДНХ, 1965.

19-9. Полтев А. И. Элегазовые аппараты Л., «Энергия», 1971. 152 с.

19-10. Бронштейн А. М., Чемерис В. С. Исследование элегазового автопневматического дугогасящего устройства на большие токи отключения. М., Информэлектро, 1969.

19-11. Попов Н. А. Вакуумные выключатели. М., «Энергия», 1965. 112 с.

19-12. Буткевич Г. В., Набатов В. Ф., Клепарская Л. Г. Синхронизированное отключение цепей высокого напряжения. — «Электричество», 1969, № 1.

19-13. Чунихин А. А., Анкэ Э., Строганов Б. Г. Исследование междуконтактной прочности при синхронизированном отключении. — «Электричество», 1975, № 10, с. 5—8.

К главе двадцатой

20-1. Правила технической эксплуатации и безопасности обслуживания электроустановок промышленных предприятий. Диспропетровск, «Проминь», 1964.

20-2. Афанасьев В. В. Разъединители переменного тока высокого напряжения. Л. — М., Госэнергоиздат, 1963, 223 с.

20-3. Лазин А. М. Короткозамыкатели и отделители. М. — Л., Госэнергоиздат, 1963, 40 с.

20-4. Гогичайшвили П. Ф. Подстанции без выключателей на высшем напряжении. М., «Высшая школа», 1965. 200 с.

К главе двадцать первой

- 21-1. Стернин В. Г., Карпенский А. К. Токоограничивающие реакторы. М., «Энергия», 1965. 256 с.
21-2. Калантаров П. Л., Цейтлин А. А. Расчет индуктивностей. Л., «Энергия», 1970. 368 с.
21-3. Лейтес Л. В. Тороидальный токоограничивающий реактор. — «Электротехническая промышленность», 1962, № 4.

К главе двадцать третьей

- 23-1. Бачурин Н. И. Трансформаторы тока. Л., «Энергия», 1964. 376 с.
23-2. Петров Г. Н., Окунь С. С. Трансформаторы тока с компенсацией погрешностей по методу МЭИ. — «Электричество», 1952, № 1.
23-3. Чунихин А. А. Расчет и выбор параметров трансформатора тока с немагнитным зазором для управления синхронизированным выключателем. — «Электричество», 1973, № 2.

К главе двадцать четвертой

- 24-1. Дымков А. М. Трансформаторы напряжения. М., «Энергия», 1975. 204 с.
24-2. Петров Г. Н. Трансформаторы. Т. 1. М. — Л., Энергоиздат, 1934. 444 с.
24-3. Булашевич Д. И., Юренков В. Д. Емкостный отбор мощности от линий электропередачи. М. — Л., Госэнергоиздат, 1959. 135 с.

К главе двадцать пятой

- 25-1. Двоскин Л. И. Схемы и конструкции распределительных устройств. М., «Энергия», 1974. 516 с.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Автоматические воздушные выключатели 470
 - — — быстродействующие 484
 - — — дугогасительные системы 475
 - — — механизмы 477
 - — — расцепители 479
 - — — токоведущая цепь 473
 - — — универсальные и установочные 481
- Аппараты высокого напряжения 6
 - низкого напряжения 6
- Бесконтактные аппараты 189, 353
 - магнитные реле (БМР) 362
 - — коэффициент возврата 363
 - — построение релейной цепи 362
 - — условие релейного режима 363
- элементы защиты автоматических выключателей 405
- Выключатели высокого напряжения 487
 - — баковые масляные 493
 - — вакуумные 527
 - — воздушные, конструкции 515
 - — — общие сведения 510
 - — — выбор 535
 - — — выключатели нагрузки 532
 - — — классификация 493
 - — — масляные 498
 - — — основные параметры 488
 - — — приводы масляных выключателей 503
 - — — синхронизированные 530
 - — — элегазовые 521
 - — — электромагнитные 525
- Датчики неэлектрических величин 406
 - — — дифференциальные индуктивные 414
 - — — индуктивные 413
 - — — индукционные 421
 - — — контактные 412
 - — — магнитные системы индуктивных датчиков 416
 - — — магнитоупругие 420
 - — — параметры 406
 - — — резистивные 409
 - — — трансформаторные 418
- Двухкаскадный полупроводниковый усилитель 370
 - — — влияние параметров на работу полупроводникового реле 375
 - — — релейный режим 371
 - — — характеристики управления 373
- Защитные свойства оболочки аппарата 7
- Изоляция аппаратов 222
 - — внешняя 225
 - — внутренняя 224
 - — вольт-секундная характеристика 228
 - — испытание 230
 - — испытательные напряжения 230
- Изоляция аппаратов, контроль 240
 - — кратности коммутационных и атмосферных перенапряжений 227
 - — минимальные изоляционные расстояния и пути утечки 235
 - — номинальные напряжения 223
 - — природа перенапряжений 107, 125, 127, 227
 - — скользящий разряд 238
- Классификация электрических аппаратов 5
- Командоаппараты 461
 - кнопки управления 266
 - командоконтроллер 266
 - — регулируемый 267
- конечные и путевые выключатели 269
- микровыключатели 269
- универсальные переключатели 271
- Комплектные распределительные устройства 601
 - — — высокого напряжения 603
 - — — герметизированные, элегазовые 607
 - — — низкого напряжения 609
 - — — станции управления 611
- Контакты 286
 - износостойкость коммутационная 287, 290
 - механическая 286
 - назначение и классификация 286
 - условия работы 287
 - переменного тока 286, 301
 - — — высокочастотные 308
 - — — дугогасительная система 304
 - — — контактные системы 301
 - — — с залипанием 312
 - — — собственное время отпускания 312
 - — — — срабатывания 312
 - — — электромагнитный механизм 310
 - — — постоянного тока 288
 - — — дугогасительная камера 298
 - — — дугогасительное устройство с катушкой напряжения 296
 - — — — — тока 291
 - — — — — постоянным магнитом 297
 - — — допустимый ток повторно-кратковременного режима 290
 - — — контактная и токоведущая системы 290
 - — — номинальный ток 290
 - — — собственное время включения 300
 - — — — отключения 300
 - — — электромагнитная система 298
- Контроллеры 261
 - барабанные 261
 - кулачковые 262
 - — плоские 264
- Логические элементы 378
 - — памяти 390
 - — времени 392

Логические элементы магнитно-полупроводниковые 364, 383
 — — серии «Логика Т» 385
 — — согласующий элемент 389
 — — таблица логических функций 380

Магнитные пускатели 313
 — — блокировка реверсивных пускателей 317
 — — конструкция 303, 315
 — — назначение и требования к ним 313
 — — тепловая защита 313, 333
 — — усилители дроссельные 189
 — — с самонасыщением 191
 — — — быстродействующие 211
 — — — влияние различных факторов на характеристику управления 209
 — — — двухполупериодные 199
 — — — с малым сопротивлением цепи управления 201
 — — — динамические параметры 207
 — — — запаздывание 206
 — — — магнитопроводы 220
 — — — материалы сердечников 219
 — — — обмотки 221
 — — — однополупериодные 191
 — — — основные соотношения 194, 196, 200
 — — — расчет и выбор параметров 614
 — — — реверсивные 213
 — — — режимы работы 217
 — — — с активно-индуктивной нагрузкой на постоянном токе 203
 — — — статические параметры 204
 — — — характеристика управления 194, 197, 218

Механизмы аппаратов 243
 — — буферные устройства 248
 — — включение механизма с электромагнитным приводом 256
 — — время отключения 243
 — — трогания при включении 245
 — — отключающие пружины 253
 — — расчет отключающей пружины контактора, реле 254
 — — скорость в момент размыкания 248, 255
 — — собственное время включения 245
 — — — отключения 243
 — — — упрощенный метод расчета времени включения аппарата с электромагнитным приводом 259
 — — — уравнения отключения 246

Муфты с электрическим управлением 424
 — — — гистерезисные 438
 — — — основные соотношения 439
 — — — — принцип действия 438
 — — — индукционные 424
 — — — электромагнитные порошковые 433

Муфты с электрическим управлением электромагнитные порошковые, коэффициент управления 434
 — — — — — основные соотношения 434
 — — — — — регулирование 435
 — — — — — электромагнитные трения 427
 — — — — — динамика 431
 — — — — — основные соотношения 427
 — — — — — устройство 427, 429
 — — — — — электростатические 426

Нагрев аппаратов 34
 — — допустимые превышения температуры элементов аппаратов 627
 — — — температуры частей аппарата при длительном режиме 61
 — — — — — коротком замыкании 61
 — — — изолированных токоведущих частей 46
 — — — катушки 48
 — — — конвекция естественная 41
 — — — искусственная 41
 — — — коэффициент перегрузки по току при кратковременном режиме 54
 — — — — — повторно - кратковременном режиме 57
 — — — коэффициенты отдачи тепла при конвекции 42
 — — — теплоотдачи 44
 — — — методы измерения температуры элементов аппаратов 62
 — — — нагревостойкость изоляционных материалов 626
 — — — Ньютона уравнение 45
 — — — обобщенный коэффициент теплоотдачи 45
 — — — определение установившейся температуры по части кривой нагрева 64
 — — — передача тепла конвекцией 41
 — — — — — лучеиспусканием 43
 — — — переходный процесс без отдачи тепла 51, 57
 — — — — — при наличии теплоотдачи 50
 — — — — — охлаждения 52
 — — — — — постоянной времени нагрева 51
 — — — — — превышение температуры 45
 — — — — — максимальное в катушке 49
 — — — — — при коротком замыкании 57
 — — — — — малом t/T 57
 — — — — — при кратковременном режиме работы 52
 — — — — — продолжительность включения 56
 — — — — — радиус с максимальной температурой нагрева катушки 49, 67
 — — — — — расчет сечения проводника по длительному режиму 45
 — — — — — режим работы перемежающийся 54
 — — — — — повторно - кратковременный 56
 — — — — — результирующее тепловое сопротивление цилиндрического проводника с изоляцией 48

- Нагрев аппаратов, Стефана —
Болцмана уравнение 43
— температуры распределение по
радиусу катушки 49
— тепловое сопротивление ряда
плоских стенок 41
— — цилиндрического слоя 47
— тепло, отдаваемое конвекцией
41
— тепловой закон Ома 41
— тепловые сопротивления ка-
тушки 50, 67
— теплопроводность удельная 39
— — замещающегося тела ка-
тушки 50
— термическая стойкость 61
— уравнение теплопроводности
катушки 48
— — Фурье 39
— установившаяся температура
аппарата 45, 62
— фиктивное время 60
Однокаскадный полупроводниковый
усилитель на транзисторе $p-n-p$
365
— — — ключевой режим ра-
боты транзистора 369
— — — перенапряжения при
работе транзистора в режиме
ключа 369
Общие требования к электрическим
аппаратам 7
Отделители и короткозамыкатели
544
— — — используемая схема релей-
ной защиты и автоматики 547
— — — конструкция 546
— — — назначение и принцип дей-
ствия 544
Пакетные выключатели и переключатели 446
Постоянные магниты 179
— — оптимальная индукция 182
— — основные соотношения 179
— — поток в нейтральном сечении
183
— — — — рабочем зоре 183
— — — — прямая возврата 182
— — — — старение 185
Потери 34
— в магнитопроводах аппаратов 38
— нетоковедущих ферромагнит-
ных частях 37
— токоведущих частях при пере-
менном токе 34
— — изоляции 39
— коэффициент близости 37
— — дополнительных потерь 37
— поверхностный эффект 35
Предохранители 448
— выключатели 459
— — высоковольтные, выбор 468
— — конструкция 465
— — требования 465
— испытательные токи плавких
вставок низковольтных предо-
хранителей 455
— — нагрев вставки при длительном
режиме 448
— — и плавление вставки при ко-
ротком замыкании 451
Предохранители низковольтные, выбор по условиям пуска 459
— — — селективности 462
— — для защиты полупроводнико-
вых приборов 458
— — конструкция 454
— плавкая вставка 448
— пограничный ток 449
— полное время отключения 452
— токоограничивающие 453
Промышленная серия МУС 353
— — — основные данные 361
— — — расчет характеристик управ-
ления по каталожным данным
358, 359, 360
— — — соотношения между пара-
метрами в однофазной, трех-
фазной и реверсивных схемах
357
— — — схемы включения 354, 358
— — — характеристика управления
в относительных единицах 354
Разрядники 559
— — вентильные 562
— — вольт-секундная характеристика
228, 560
— — магнитно-вентильные 566
— — остающееся напряжение 228, 560
— — согласование характеристик раз-
рядника и оборудования 560
— — трубчатые 561
Разъединители 536
— — блокировка с выключателями 543
— — конструкция 538, 541
— — контактная система 538, 541
— — привод 539
— — с заземляющим ножом 541
— — схемы включения 537
Реакторы 548
— — индуктивность 552
— — конструкция 553
— — нагрев 554
— — основные параметры 549
— — расчетный ток динамической
устойчивости 555
— — двойные 556
Резисторы 272
— — выбор 279
— — конструкция 274
— — материалы 273
— — расчет 274
— — эквивалентный ток по нагреву 280
— — — по теплу 279
Реле 318
— — времени 341
— — моторные 350
— — с пневматическим замедлением
350
— — — электромагнитным замедле-
нием 175, 342
— — — влияние различных
факторов на работу 344, 345, 347
— — — — — схемы включения 345
— — — — — регулировка 347
— — — — — устройство 342
— — — электронные 352
— — классификация 319
— — назначение 319
— — основные параметры 319
— — — поляризованные 338
— — — м. д. с. срабатывания 340
— — — конструкция 339
— — — контактная система 340

- Реле поляризованные, преимущественно 341
- принцип действия 338
- тепловые 333
- влияние температуры окружающей среды 337
- время-токовая характеристика 334
- конструкция 337
- принцип действия 333
- электромагнитные 322
- конструкция 328, 329, 330
- коэффициент возврата 324
- регулировка 328, 330, 332
- требования 321
- Релейная защита на бесконтактных транзисторных элементах 402
- Реостаты 261
- классификация 281
- конструкция 282
- Рубильники и переключатели 443
- Тристоры 393
- выбор 400
- регулирующий элемент на тиристоре 395
- релейный элемент на тиристоре 395
- свойства 393
- Тиристорно-контактный коммутационный элемент 399
- Тиристорный пускатель, схема 397
- работа блоков 397
- Трансформаторы напряжения 584
- векторная диаграмма 588
- зависимость погрешности от различных факторов 589
- компенсация погрешностей 591
- конденсаторные 597
- конструкция 592
- основные параметры 585
- схемы включения 592
- замещения 587
- постоянного тока 191, 405
- тока 567
- векторная диаграмма 570
- выбор 583
- зависимость погрешностей от различных факторов 570
- компенсация погрешностей 575
- конструкция 579
- основные параметры 568
- режимы работы 577
- схема включения 567
- Электрическая дуга 96
- гашение дуги переменного тока 112
- — — постоянного тока 104
- динамическая вольт-амперная характеристика 109
- в магнитном поле 111
- восстанавливающееся напряжение при неудаленном коротком замыкании 119
- восстановление напряжения на контактном промежутке при переменном токе 115
- время гашения дуги постоянного тока 107
- критическая длина 109
- мгновенное возвращающееся напряжение 118
- отключение емкостных токов 127
- Электрическая дуга, отключение короткой дуги переменного тока 122
- малых индуктивных токов 125
- цепи с повышенной частотой тока 124, 308
- перенапряжения при отключении дуги постоянного тока 107
- свойства дугового разряда 96
- скорость восстановления напряжения 117
- статическая вольт-амперная характеристика 103
- шунты для облегчения гашения дуги 120
- энергия, выделяемая при гашении дуги постоянного тока 110
- Электрический аппарат 5
- контакт 68
- вибрация 75
- включение 74
- герметизированный 93
- двухступенчатая контактная система 91
- динамическая стойкость 79
- зависимость переходного сопротивления от падения напряжения на контакте 73
- — — температуры 73
- износ при включении 76
- — — размыкании 81
- конструкция 87
- напряжения плавления 73
- рекристаллизация 73
- материалы 84
- переходное сопротивление 70
- превышение температуры в зоне стягивания 72
- работа в замкнутом состоянии при номинальном токе 77
- расчет нажатия силовых контактов 79
- — — слаботочных контактов 77
- схемы для уменьшения износа 83
- температура максимальная контактной точки 72
- формулы для переходного сопротивления 70, 71
- Электродинамические усилия (силы) 9
- в витке 21
- — — контактах 24
- — — трехфазной системе 29
- влияние формы сечения проводника 17
- действующие на дугу в деионной решетке 25
- изгибающие моменты от электродинамических сил 19
- между витками и катушками 23
- — — параллельными проводниками 13
- — — проводником и ферромагнитной стенкой 24
- методы расчета 9
- механический резонанс 32
- направление действия 9
- при наличии в токе апериодической составляющей 27

Электродинамические усилия при
 — — — — — однофазном переменном токе 26
 — — — — — расчетный ток динамической
 стойкости 31
 — — — — — и моменты в сложных конту-
 рах 20
 Электродинамическая стойкость 9,
 31
 Электромагниты 130
 — — — — — броневая магнитная система 139
 — — — — — время отпущения 169
 — — — — — электромагнита переменного
 тока 178, 256
 — — — — — постоянного тока 169, 256
 — — — — — замедление отпущения коротко-
 замкнутой обмоткой 176
 — — — — — индуктивность обмотки системы
 без насыщения 138
 — — — — — клапанная магнитная система
 136, 141, 145, 151
 — — — — — магнитная проводимость 134
 — — — — — — — — воздушных промежутков 134
 — — — — — — — — цепь переменного тока 145
 — — — — — — — — с короткозамкнутой об-
 моткой 146
 — — — — — магнитное сопротивление актив-
 ное 146
 — — — — — — — — реактивное 148
 — — — — — магнитной цепи законы 130
 — — — — — — — — расчет по коэффициентам
 рассеяния 144

Электромагниты, магнитной цепи
 расчет с учетом магнитного со-
 противления стали 141
 — — — — — магнитные материалы 155
 — — — — — обмотки 151
 — — — — — паразитный воздушный зазор 138
 — — — — — пересчет обмоток с одного напря-
 жения на другое 152, 155
 — — — — — потоки в магнитной системе без
 насыщения 136
 — — — — — рабочий магнитный поток 131
 — — — — — рассеяния магнитный поток 131
 — — — — — сила тяги броневой системы по-
 стоянного тока 163
 — — — — — — — — электромагнитов перемен-
 ного тока 164
 — — — — — — — — постоянного тока 159
 — — — — — сравнение тяговых характеристик
 электромагнитов постоянного и
 переменного тока 168
 — — — — — удельные магнитные сопротивле-
 ния стали на переменном токе
 150
 — — — — — уменьшение вибрации якоря
 электромагнитов переменного
 тока 166
 — — — — — ускорение и замедление срабаты-
 вания электромагнитов постоян-
 ного тока 172
 — — — — — формула Максвелла для расчета
 силы тяги 159

Оглавление

	Стр.
Предисловие	3
Введение. Классификация электрических аппаратов и требования, предъявляемые к ним	5
1	
ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ	
Глава первая. Электродинамические силы в электрических аппаратах	9
1-1. Общие сведения	9
1-2. Методы расчета электродинамических усилий (э.д.у.) и направление их действия	9
1-3. Силы между параллельными проводниками	13
1-4. Силы и моменты, действующие на перемычку	16
1-5. Силы, действующие в витке, катушке и между катушками	21
1-6. Электродинамические усилия в месте изменения сечения проводника	24
1-7. Электродинамические усилия при наличии ферромагнитных частей	24
1-8. Электродинамические усилия при переменном токе. Механический резонанс	26
1-9. Пример расчета электродинамических сил	33
Глава вторая. Нагрев электрических аппаратов	34
2-1. Общие сведения	34
2-2. Активные потери энергии в аппаратах	34
2-3. Способы передачи тепла внутри нагретых тел и с их поверхности	39
2-4. Установившийся процесс нагрева	45
2-5. Нагрев аппаратов в переходных режимах	50
2-6. Нагрев аппарата при коротком замыкании	57
2-7. Допустимые температуры для различных частей аппаратов при длительной работе и при коротком замыкании. Термическая стойкость аппаратов	60
2-8. Некоторые сведения об опытным определении температуры в электрических аппаратах	62
2-9. Примеры теплового расчета элементов аппарата	64

	Стр.
Глава третья. Электрические контакты	68
3-1. Общие сведения	68
3-2. Режимы работы контактов	74
3-3. Материалы контактов	84
3-4. Конструкция контактов	87
3-5. Примеры расчета контактов аппарата	94
Глава четвертая. Электрическая дуга	96
4-1. Общие сведения	96
4-2. Дуга постоянного тока	103
4-3. Электрическая дуга в магнитном поле	111
4-4. Процессы горения и гашения дуги переменного тока при отключении активной цепи	112
4-5. Отключение индуктивной цепи на переменном токе. Процесс восстановления напряжения	115
4-6. Скорость восстановления напряжения. Собственная частота отключаемой цепи. Зависимость скорости и частоты от параметров оборудования и схемы короткого замыкания	117
4-7. Облегчение отключения цепи с помощью шунтов	120
4-8. Отключение короткой дуги переменного тока	122
4-9. Особенности отключения цепи с повышенной частотой тока	124
4-10. Отключение малых индуктивных токов	125
4-11. Отключение емкостных токов конденсаторных батарей и длинных линий	127
4-12. Пример расчета скорости восстановления напряжения	128
Глава пятая. Электромагниты	130
5-1. Общие сведения о магнитных цепях аппаратов	130
5-2. Магнитная цепь электромагнитов постоянного тока	136
5-3. Магнитная цепь электромагнитов переменного тока	144
5-4. Обмотки электромагнитов	150
5-5. Магнитные материалы для электромагнитов постоянного и переменного тока	155
5-6. Сила тяги электромагнитов	156
5-7. Динамика и время срабатывания электромагнитов	169
5-8. Магнитные цепи с постоянными магнитами	179
5-9. Пример расчета электромагнита постоянного тока	185
Глава шестая. Магнитные усилители	189
6-1. Общие сведения	189
6-2. Усилитель с самонасыщением (МУС)	191
6-3. Двухполупериодные схемы МУС	199
6-4. Статические и динамические параметры МУС	204
6-5. Влияние различных факторов на работу МУС	209
6-6. Быстродействующие магнитные усилители	211
6-7. Реверсивные усилители	213
6-8. Материалы и магнитопроводы, применяемые для усилителей. Расположение обмоток	219
	643

	Стр.
Глава седьмая. Изоляция электрических аппаратов	222
7-1. Условия работы изоляции и требования, предъявляемые к ней	222
7-2. Кратности коммутационных и атмосферных перенапряжений	227
7-3. Испытательные напряжения аппаратов. Испытание изоляции	230
7-4. Минимальные изоляционные расстояния и пути утечки	235
7-5. Контроль состояния изоляции высоковольтных аппаратов	240
Глава восьмая. Механизмы электрических аппаратов	243
8-1. Требования, предъявляемые к механизмам аппаратов	243
8-2. Отключение механизма аппарата	246
8-3. Включение механизма аппарата	256

2

АППАРАТЫ УПРАВЛЕНИЯ

Глава девятая. Контроллеры, командоаппараты и реостаты	261
9-1. Общие сведения	261
9-2. Контроллеры	261
9-3. Командоаппараты	266
9-4. Резисторы пусковых и пускорегулирующих реостатов	272
9-5. Реостаты	281
Глава десятая. Контактторы	286
10-1. Общие сведения	286
10-2. Устройство контактора с управлением от сети постоянного тока	288
10-3. Контактторы переменного тока	301
10-4. Магнитные пускатели	313
Глава одиннадцатая. Реле напряжения и тока	318
11-1. Общие сведения	318
11-2. Электромагнитные реле	322
11-3. Конструкция электромагнитных реле тока и напряжения	328
11-4. Тепловые реле	333
11-5. Поляризованные реле	338
Глава двенадцатая. Реле времени	341
12-1. Общие сведения	341
12-2. Реле с электромагнитным замедлением	342
12-3. Реле с механическим замедлением	350
12-4. Электронные реле времени	352

	Стр.
Глава тринадцатая. Бесконтактные аппараты управления и автоматики	353
13-1. Промышленные серии магнитных усилителей с самонасыщением	353
13-2. Бесконтактные магнитные реле (БМР) на базе МУС	362
13-3. Принцип действия и основные соотношения полупроводниковых реле	365
13-4. Влияние параметров схемы на характеристики полупроводниковых реле	375
13-5. Логические элементы	378
13-6. Логические элементы на бесконтактных магнитных реле (БМР). Магнитно-полупроводниковые логические элементы	383
13-7. Полупроводниковые логические элементы	385
13-8. Полупроводниковые функциональные элементы	390
13-9. Применение тиристоров в аппаратах управления	393
13-10. Транзисторные элементы релейной защиты для высоковольтных распределительных устройств и низковольтных автоматических выключателей	402
Глава четырнадцатая. Датчики неэлектрических величин	406
14-1. Общие сведения	406
14-2. Резистивные и контактные датчики	409
14-3. Индуктивные датчики	413
14-4. Индукционные датчики	421
Глава пятнадцатая. Муфты с электрическим управлением	424
15-1. Общие сведения	424
15-2. Электромагнитные фрикционные муфты	427
15-3. Ферропорошковые муфты	433
15-4. Гистерезисные муфты	438

3

АППАРАТЫ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ НИЗКОГО И ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Глава шестнадцатая. Рубильники и переключатели	443
16-1. Общие сведения	443
16-2. Конструкция рубильников	445
16-3. Пакетные выключатели и переключатели	446
Глава семнадцатая. Предохранители	448
17-1. Общие сведения	448
17-2. Нагрев плавкой вставки при длительной нагрузке	448
	645

	Стр.
17-3. Нагрев плавкой вставки при коротком замыкании	451
17-4. Конструкция предохранителей низкого напряжения	454
17-5. Выбор предохранителей	459
17-6. Высоковольтные предохранители	465
Глава восемнадцатая. Автоматические воздушные выключатели (автоматы)	470
18-1. Общие сведения	470
18-2. Токоведущая цепь и дугогасительная система автоматов	473
18-3. Приводы и механизмы универсальных и установочных автоматов	477
18-4. Расцепители автоматов	479
18-5. Основные серии универсальных и установочных автоматов	481
18-6. Быстродействующие автоматы	484
Глава девятнадцатая. Выключатели переменного тока высокого напряжения	487
19-1. Общие сведения	487
19-2. Баковые масляные выключатели	494
19-3. Маломасляные выключатели	498
19-4. Приводы масляных выключателей	503
19-5. Воздушные выключатели. Принцип действия	510
19-6. Конструкция воздушных выключателей	515
19-7. Элегазовые выключатели	521
19-8. Электромагнитные выключатели	525
19-9. Вакуумные выключатели	527
19-10. Синхронизированные выключатели	530
19-11. Выключатели нагрузки	532
19-12. Выбор выключателей	535
Глава двадцатая. Разъединители, отделители и короткозамыкатели	536
20-1. Общие сведения	536
20-2. Конструкция разъединителей и приводов к ним	538
20-3. Блокировка разъединителей и выключателей	543
20-4. Отделители и короткозамыкатели	544
Глава двадцать первая. Реакторы	548
21-1. Общие сведения	548
21-2. Конструкция реакторов	553
21-3. Сдвоенные реакторы	556
Глава двадцать вторая. Разрядники	559
22-1. Назначение разрядников и требования к ним	559
22-2. Трубчатые разрядники	561
22-3. Вентильные разрядники	562
22-4. Разрядники постоянного тока	566

	Стр.
Глава двадцать третья. Трансформаторы тока . .	567
23-1. Общие сведения	567
23-2. Зависимость погрешностей от различных факторов	570
23-3. Компенсация погрешности	575
23-4. Режим работы трансформаторов тока	577
23-5. Конструкция трансформаторов тока	579
23-6. Выбор трансформаторов тока	583
Глава двадцать четвертая. Трансформаторы напря- жения	584
24-1. Общие сведения	584
24-2. Конструкция трансформаторов напряжения	592
24-3. Емкостные делители (конденсаторные трансформато- ры напряжения)	597
Глава двадцать пятая. Комплектные распределитель- ные устройства (КРУ) и комплектные станции управле- ния (КСУ)	601
25-1. Общие сведения	601
25-2. Комплектное распределительное устройство высокого напряжения	603
25-3. Герметизированные элегазовые распределительные устройства (ГРУ)	607
25-4. Комплектные распределительные устройства низкого напряжения	609
25-5. Комплектные станции управления (КСУ)	611
Приложение I. Расчет и выбор параметров МУС	614
Приложение II. Нагревостойкость электроизоляционных мате- риалов (по ГОСТ 8865-70)	626
Приложение III. Допустимые превышения температуры для аппаратов низкого напряжения (по ГОСТ 12434-73) . . .	627
Список литературы	629
Алфавитный указатель	637

Александр Адольфович Чунихин

Электрические аппараты

Редактор *А. Г. Годжелло*
Редактор издательства *И. В. Антик*
Переплет художника *В. И. Карпова*
Технический редактор *О. Д. Кузнецова*
Корректор *И. А. Володяева*

Сдано в набор 19/III 1975 г. Подписано к печати 12/IX 1975 г.
Т-13180. Формат 84×108¹/₃₂. Бумага типографская № 2.
Усл. печ. л. 34,02. Уч.-изд. л. 37,34. Тираж 26 000 экз. Зак. 108.
Цена 1 р. 54 к.

Издательство «Энергия», Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Владимирская типография Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
Гор. Владимир, ул. Победы, д. 18-б.

А. А. ЧУНИХИН

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ