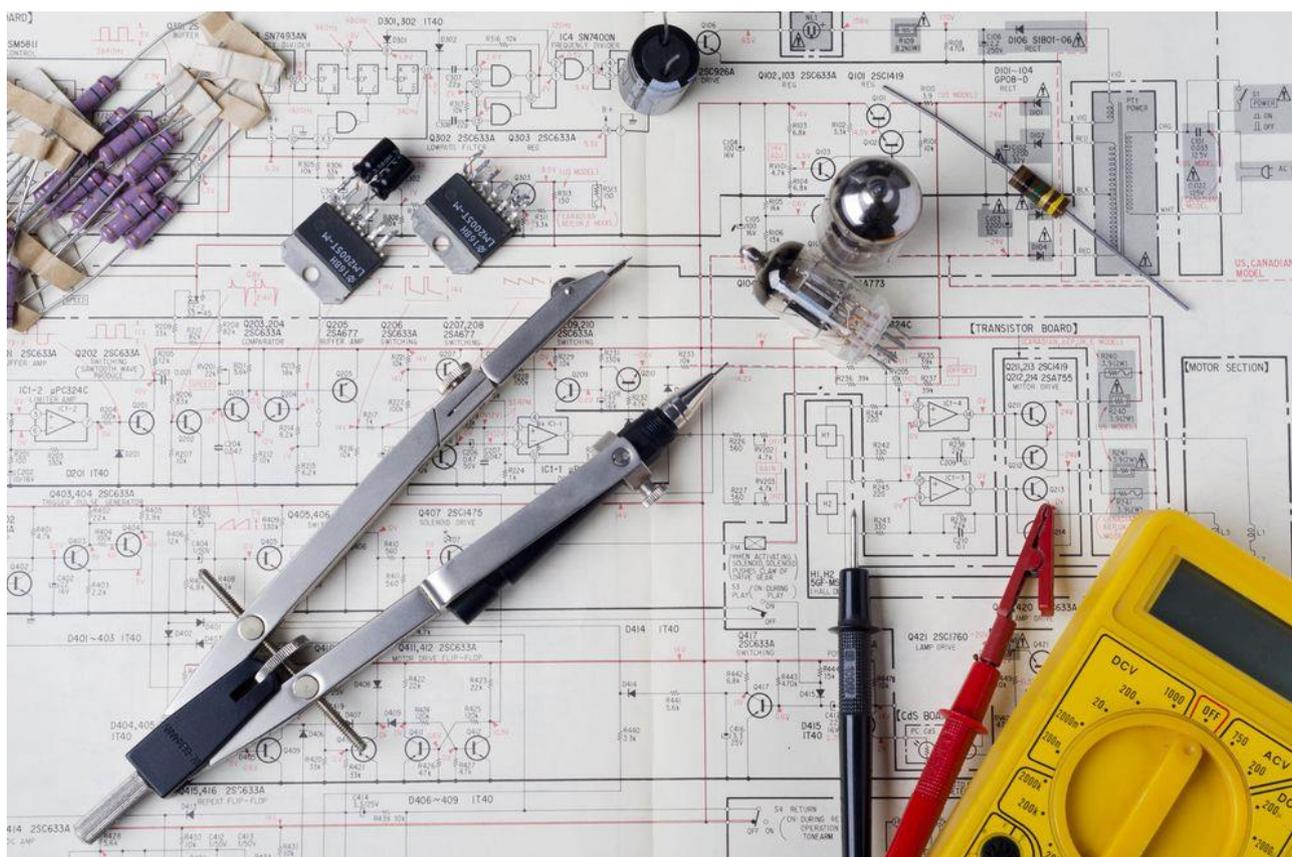


Ю. А. КОЗЛОВА, А. А. ТЕРЕХОВА

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ АППАРАТЫ



**Тамбов
Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»
2024**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Тамбовский государственный технический университет»**

Ю. А. КОЗЛОВА, А. А. ТЕРЕХОВА

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ АППАРАТЫ

Утверждено Ученым советом университета
в качестве учебного пособия для студентов 3 курса, обучающихся
по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»,
всех форм обучения

Учебное электронное издание



Тамбов
Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»
2024

УДК 621.313
ББК 31.26
К59

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе
ФГБОУ ВО «ТГТУ»
Д. Ю. Муромцев

Кандидат технических наук, исполнительный директор
АО «Объединенные региональные электрические сети Тамбова»
Ю. Н. Демин

К59 **Козлова, Ю. А.**

Электрические и электронные аппараты [Электронный ресурс] : учебное пособие / Ю. А. Козлова, А. А. Терехова. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2024. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Системные требования : ПК не ниже класса Pentium II ; CD-ROM-дисковод ; 3,4 Mb ; RAM ; Windows 95/98/XP ; мышь. – Загл. с экрана.

ISBN 978-5-8265-2741-2

Содержит два раздела, двенадцать тем, предусмотренных программой изучения дисциплины «Электрические и электронные аппараты», расчетные формулы, схемы, графики.

Предназначено для студентов 3 курса, обучающихся по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», всех форм обучения.

УДК 621.313
ББК 31.26

*Все права на размножение и распространение в любой форме остаются за разработчиком.
Нелегальное копирование и использование данного продукта запрещено.*

ISBN 978-5-8265-2741-2

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ТГТУ»), 2024

ВВЕДЕНИЕ

Данное учебное пособие написано в соответствии с учебной программой по дисциплине «Электрические и электронные аппараты» для студентов высших учебных заведений, обучающихся по образовательной программе «Электроснабжение промышленных предприятий» направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Оно также может быть полезно и для инженеров-электриков, работающих в области эксплуатации электрических аппаратов и электрооборудования промышленных предприятий, хозяйств и учреждений.

В учебном пособии использован следующий порядок изложения материала: общие сведения об электрических и электронных аппаратах, электродинамические усилия в электрических аппаратах, тепловые процессы в электрических аппаратах, контактные явления в электрических аппаратах, работа контактного соединения, горение электрической дуги, способы гашения электрической дуги, предохранители и автоматические выключатели, автоматические выключатели, коммутационные электрические аппараты низкого напряжения, электромагнитные механизмы, электромагнитные реле, электромагнитные контакторы переменного тока, электромагнитные контакторы постоянного тока.

При изложении материала главное внимание уделено основным вопросам теории и практики эксплуатации электрооборудования общего назначения.

В данном учебном пособии авторы постарались максимально доступно изложить основные термины, используемые в процессе изучения таких дисциплин, как «Введение в специальность», «Электрические и электронные аппараты», «Эксплуатация электрооборудования», «Монтаж электрооборудования».

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

1.1. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ АППАРАТОВ

1. Электрические аппараты (э/а) (ЭАП): назначение, классификация, требования.
2. Электродинамические усилия (ЭДУ) в аппаратах.
3. Электродинамическая (ЭД) стойкость аппаратов (ЭДСТ).

На всех стадиях производства и передачи распределения и потребления электроэнергии (ЭЭ) необходимо контролировать, управлять и защищать различные электрические машины, эту функцию выполняют различные э/а.

Электрические аппараты – электротехнические устройства, которые осуществляют включение и отключение электрической цепи, а также функции контроля, защиты, управления и регулирования на всех стадиях производства, передачи, распределения и потребления.

Назначение и классификация аппаратов. Наиболее полная классификация аппаратов вытекает из их назначения, согласно которым их можно разделить на пять групп:

I. Коммутационные ЭАП, распределительные устройства (РУ) (рубильники, плавкие предохранители, автоматы, выключатели высокого напряжения, разъединители, отделители, короткозамыкатели).

Для данных аппаратов характерны частые включения и выключения электрических сетей.

II. Ограничивающие ЭАП – для ограничения перенапряжения служат разрядники от токов к. з. – реакторы.

III. Пускорегулирующие ЭАП. Осуществляют пуск и остановку двигателей. Регулируют частоты вращения двигателей, тока и напряжения. К ним относятся контроллеры, контакторы, магнитные пускатели, сопротивление и реостат. Для данных ЭАП характерны частые включения и отключения, которые могут достигать 3600 раз в час.

IV. ЭАП, контролирующие заданные технологические параметры. К ним относятся датчики и реле.

V. Измерительные аппараты, к ним относятся измерительные трансформаторы. Среди них: ИТН (измерительные трансформаторы напряжения) и ИТТ (измерительные трансформаторы тока).

Относительно напряжения аппараты делят на две группы:

- низкого напряжения (до 1 кВ);
- высокого напряжения (свыше 1 кВ).

Требования, предъявляемые ЭАП. Независимо от конструкции и назначения аппаратов к ним предъявляются следующие основные требования:

а) электрическая изоляция, применяемая в аппарате, должна обладать необходимой электрической прочностью, как в нормальных условиях эксплуатации, так и при кратковременном перенапряжении;

б) токоведущие части аппарата должны неограниченно долго пропускать рабочие номинальные токи, и при этом температура токоведущих частей не должна превышать допустимую;

в) при прохождении расчетных токов короткого замыкания аппарат не должен получать механических повреждений, препятствующих его дальнейшей работе, и обладать ЭДСТ (термической);

г) аппарат во время эксплуатации должен обладать высокой надежностью, т.е. иметь минимальное число отказов;

д) по конструкции аппараты должны быть максимально просты, экономичны, иметь малое время для ухода и ремонта.

Заводы-изготовители аппаратов регламентируют ряд общих номинальных параметров, к которым относятся:

- номинальное напряжение ($U_{ном}$);
- номинальный ток ($I_{ном}$);
- ток ЭДСТ ($I_{эд}$);
- время и ток термической стойкости.

Параметры аппарата приводятся в его паспорте, справочниках и при выборе конкретного аппарата сравнивают его параметры с параметрами цепи в конкретной точке.

Общие сведения. Проводники с током взаимодействуют друг с другом через магнитное поле, возникающие усилия называются ЭДУ. Они зависят от значений и направлений токов, размеров и конфигураций взаимодействующих контуров, сечения и формы проводников.

Неправильно сконструированные технические устройства при прохождении тока короткого замыкания могут разрушиться от ЭДУ, поэтому факторы разрушения учитываются в первую очередь на стадии проектирования аппаратов с соответствующим выбором сечений и формы проводников опорных изоляторов, расстояния между проводниками и изоляторами и т.д.

Методы расчета ЭДУ. На данный момент используют два основных метода расчета ЭДУ:

- 1) силовой – основан на применении закона Ампера;
- 2) энергетический – основан на применении энергетического баланса взаимодействующих проводников.

Согласно методу (1) расчет производится, если известна магнитная индукция по напряжению и значению в каждой точке расположения проводника. Значения данной магнитной индукции определяются по закону Лапласа.

Правило Ампера – сила, действующая на проводник, пропорциональна произведению значения тока через проводник на векторное произведение элементарного проводника с током на магнитную индукцию:

$$\vec{dF} = i[\vec{dl}, \vec{B}]. \quad (1)$$

Из этого соотношения вытекает определение направления силы dF , которая определяется правилами векторного произведения. Из выражения (1) вытекает правило левой руки. Значение силы dF определяется формулой

$$dF = (idl)B \sin \beta; \quad \beta = (\vec{dl}, \vec{B}). \quad (2)$$

Направление электричества с током idl определяется заданным направлением тока через проводник. Направление вектора B определяется с помощью магнитной стрелки, или правилом Буравчика. Если требуется определить усилие через весь проводник используют формулу

$$F = \int_0^0 dF. \quad (3)$$

Метод (2) применяется в том случае, если известны функции изменения индуктивности или взаимной индуктивности от координат.

$$F_x = \frac{\partial W}{\partial x}. \quad (4)$$

Рассмотрим определенные усилия для одиночного контура, в котором индуктивность изменяется по координатам известной функции $L(x)$. В этом случае магнитная энергия:

$$W_M = \frac{i^2 L}{2}; \quad (5)$$

$$F_x dx = \frac{i^2 dL(x)}{2}; \quad F_x = \frac{i^2}{2}. \quad (6)$$

Рассмотрим два взаимодействия контура с индуктивностями L_1, L_2 , по которому протекают неизменные токи i_1, i_2 , причем L – также неизменны, но известна зависимость взаимной индуктивности $M_{1,2}(x)$:

$$W_M = \frac{i_1^2 L_1}{2} + \frac{i_2^2 L_2}{2} + i_1 i_2 M_{1,2}, \quad (7)$$

тогда при изменении расположения контуров по оси x будет изменяться только взаимная индуктивность:

$$F_x dx = i_1 i_2 = M_{1,2}; \quad (8)$$

$$F_x = i_1 i_2 = \frac{dM_{1,2}}{dx}. \quad (9)$$

Направление действия ЭДУ. В силовом методе направление ЭДУ определяется правилом левой руки. При решении плоской задачи, когда все проводники в 1-й плоскости и магнитная индукция перпендикулярна ей, то сила взаимодействия действует в плоскости проводников: токи 1-го направления притягиваются, а разного – отталкиваются.

При использовании энергетического метода направление F_x определяется приращением одинаковых знаков W и dx , т.е. F_x положительна, когда система увеличивает свою энергию при возрастании координат, поэтому если рассмотреть возникающие силы в круговом проводнике с током, то сила F_x будет положительной в радиальном направлении при увеличении радиуса кругового проводника.

ЭДСТ. Под ЭДСТ понимают способность аппарата выдерживать в течение одних нескольких периодов воздействия токов короткого замыкания (к. з.) без последствий, препятствующих нормальной работе в будущем.

Завод-изготовитель определяет по ЭДСТ два значения тока:

- $J_{\text{дин}}$ – периодичность состояния тока к. з. в начальный момент;
- $J_{\text{дин max}}$ – полного тока к. з. в начальный момент.

Эти паспортные данные по ЭДСТ не должны быть превышены сколь угодно малый отрезок времени.

При разработке аппарата производится не только его расчет по ЭДСТ, но и натурные испытания, с помощью которых уточняются расчетные параметры.

При выборе аппаратов по ЭДСТ должны соблюдаться два условия:

$$\begin{cases} J_{\text{дин}} \geq J_{\text{пр}}; \\ J_{\text{дин max}} \geq J_{\text{уд max}}, \end{cases} \quad (10)$$

где $J_{\text{пр}}$ – расчетное значение тока к. з., его периодичное состояние предполагаемой точки установки аппарата; $J_{\text{уд max}}$ – максимальное значение ударного тока в той же точке.

Завод-изготовитель конструирует аппарат таким образом, что

$$\frac{J_{\text{дин max}}}{J_{\text{дин}}} = 2,55.$$

1.2. ХИМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ ЭАП

Нагрев ЭАП

1. Общие вопросы теории нагревания.
2. Нагрев аппаратов в различных режимах.
3. Термическая стойкость аппаратов.

Режимы работы аппаратов. В проводниках и аппаратах при прохождении электрического тока наблюдаются потери мощности и энергии, которые складываются из следующих состояний:

- потери на активных сопротивлениях, пропорциональны I^2 ;
- потери в изоляции, пропорциональны U^2 ;
- потери на перемагничивании (гистерезис и вихревые токи) в сердечниках трансформаторов и электромагнитах;
- потери массивных ферромагнитных материалов, находящихся в сильном магнитном кругу от индукционных токов.

Выделяемая энергия идет на нагрев аппарата и частично рассеивается в окружающую среду, таким образом, конечная температура проводника или аппарата зависит от: режима работы, мощности потерь и условий теплообмена с окружающей средой.

Различают следующие режимы работы аппаратов:

- установившийся;
- нормальный;
- ненормальный (к. з., перегрузка недопустимой длительности).

При рассмотрении вопросов нагрева аппаратов различают продолжительные и кратковременные установочные режимы.

При продолжительных режимах аппарат находится в равновесии с окружающей средой, при прохождении через него тока и характеризуется некоторыми установочными t ($\Theta_{уст}$).

При кратковременном режиме нагрева аппарат находится в переходном тепловом режиме и его $t < \Theta_{уст}$.

Допустимые температуры. Температуры ЭАП ограничивают, чтобы обеспечить:

- 1) экологически целесообразный срок службы изоляции;
- 2) обеспечить надежную работу контактной системы;
- 3) не допустить потери механических свойств элементов конструкции аппаратов.

При рассмотрении теплового состояния аппаратов наблюдают:

- температуру (можно измерить);
- температуру в наиболее нагретых точках аппарата (непосредственное измерение в рабочем состоянии аппарата невозможно без его разрушения).

Экспериментально установлено, что разность температур в наиболее нагретых точках и наблюдаемой температуры составляет 5...15 °С, с точки зрения эксперимента нормируют наблюдаемую температуру и учитывают ее превышение в наиболее нагретых.

Нормирование температуры аппаратов может происходить исходя из предпосылок:

1) температуру аппарата ограничивают зависимости от температурного класса, нагрева стойкости изоляции или индекса нагрева стойкости, в зависимости от этого индекса различают семь классов изоляции с температурным диапазоном 90...250 °С;

2) в зависимости от режима работы элементов аппарата, алюминиевые шины в распределительных устройствах должны быть меньше 80 °С, чтобы тепловой режим сопряжимых деталей не выходил за допустимые нормы.

При рассмотрении вопросов нагревания аппаратов большое значение имеет температура окружающей среды ($\Theta_{o.c}$), при расчетах $\Theta_{o.c} = 40$ °С. В этом случае:

$\Theta_A = \Theta_{o.c} + \tau$; $t = \Theta - \Theta_{o.c}$, => превышение температуры аппарата над температурой окружающей среды.

Данный параметр является движущим фактором теплового процесса, так как все виды теплообмена (теплопроводность, конвекция, излучение) зависят от t . Чем меньше t , тем меньше обмен с окружающей средой. При снижении t необходимо уменьшать токовую нагрузку через аппарат.

Методика теплового расчета в установившемся режиме. Цель такого расчета состоит в определении допустимого значения тока через аппарат при соответствующих параметрах его токопроводящих частей и заданной температуры окружающей среды.

Уравнение теплового состояния аппарата в установившемся режиме

$$\Delta P = \Phi; \Delta P = J^2 r, \quad (11)$$

где ΔP – активные потери в аппарате; Φ – тепловой поток боковой поверхности аппарата или проводника;

$$J^2 r = \Phi; J = \sqrt{\frac{\Phi}{r}}, \quad (12)$$

где Φ , r – функции температуры.

Тепловой поток по закону Ньютона

$$\Phi = K_T S_6 \tau, \quad (13)$$

где K_T – коэффициент учитывает все виды теплообмена; S_6 – площадь боковой поверхности аппарата; τ – превышение температур; r – активное сопротивление токопроводящих частей аппарата, при его вычислении необходимо учитывать плотность ρ (плотность тока через проводник изменяется в диапазоне 2...6 А/мм²).

Большее значение плотности относится к проводникам малых сечений, так как при больших сечениях проводника ухудшаются условия теплообмена.

$$r = \rho_3 \frac{l}{F}; \quad (14)$$

для круглого

$$\rho_3 = K_{ЭБ} K_{ПЭ} \rho_0, \quad (15)$$

где $K_{ЭБ}$ – коэффициент эффекта близости; $K_{ПЭ}$ – коэффициент поверхностного эффекта.

Эффект близости заключается в изменении эффективного сечения проводника при близком расположении проводников с током из-за тока.

Поверхностный (скин) эффект заключается для переменного тока в вытеснении тока (трубок тока) из центральных его частей в периферии с увеличением частоты.

$$\rho_0 = \rho_0 [1 + \alpha(\Theta - \Theta_0)], \quad (16)$$

где ρ_0 – удельное электрическое сопротивление, отнесенное к некоей нулевой величине; α – температурный коэффициент сопротивления данного материала.

Методика расчета в переходном или кратковременном режиме. При кратковременном режиме температура его отдельных частей и аппарата в целом не достигает установленного значения, в этом случае необходимо знать функцию изменения температуры аппарата

во времени $0A(t)$, по которой можно определить значение температуры аппарата через заданный рабочий отрезок времени, а затем воспользоваться методикой предыдущего пункта.

Для однородного проводника уравнение теплового состояния данного проводника в переходном режиме имеет следующий вид:

$$\Delta P dt = Cd\Theta + \Phi dt, \quad (17)$$

где $Cd\Theta$ – учитываемый нагрев самого проводника; Φdt – энергия рассеивания с боковой поверхности проводника.

Преобразуем

$$d\Theta = d(\Theta_{o.c} + \tau) = d\tau; \quad \Phi = K_T S_6 \tau;$$

$$\Delta P dt = Cd\tau + K_T S_6 \tau dt / C dt;$$

$$\frac{d\tau}{dt} + \frac{K_T S_6}{C} \tau - \frac{\Delta P}{C} = 0; \quad (18)$$

$$\tau = \tau_{св} + \tau_{уст}; \quad (19)$$

$$\tau_{уст} = \frac{\Delta P}{K_T S_6}; \quad (20)$$

$$\frac{d\tau_{св}}{dt} - \frac{K_T S_6}{C} \tau_{св} = 0;$$

$$\tau_{св} = A e^{Pt} = A e^{-C/t}; \quad (21)$$

$$P + \frac{K_T S_6}{C} = 0;$$

$$P = - \frac{K_T S_6}{C};$$

$$T = \frac{C}{K_T S_6};$$

$$T = - \frac{1}{P};$$

$$\tau = \tau_{уст} + A e^{-C/t};$$

$$\tau(0_+) = 0; \quad 0 = \tau_{уст} + A \Rightarrow A = - \tau_{уст};$$

где T – постоянная времени нагрева; $\tau = \tau_{уст} (1 - e^{-t/T})$ – закон изменения превышения температуры.

Для современных аппаратов $T = (10 \text{ минут} - \text{несколько часов})$.

Особенности процесса нагревания при к. з. В режиме к. з. значения токов к. з. превышают номинальные в 10 – 20 раз, следовательно, мощность потерь в аппарате неоднократно возрастает, что приводит его к интенсивному нагреву. Однако, благодаря наличию устройств защиты, длительность к. з. доли секунды – единицы секунд. Для полых шин и проводников из алюминия температура при к. з. ~ 200 °С, для медных – ~ 300 °С. Этот нагрев может привести к деформации и потери упругих свойств контактной системы, оплавлению, выжиганию изоляции, потери механических свойств конструктивных элементов аппарата.

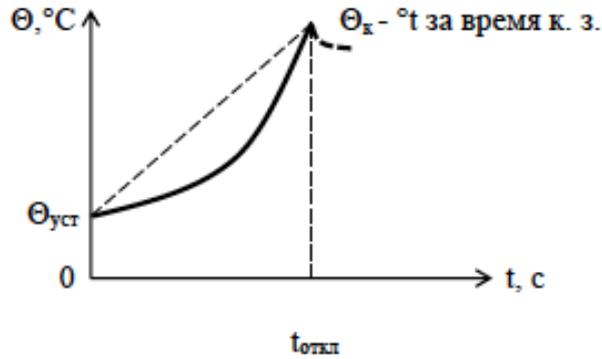


Рис. 1. Нагрев аппарата при коротком замыкании:

$t_{откл}$ – время отключения аппарата

Если $t_{откл} \ll T$, нагрев аппарата можно считать адиабатическим, т.е. без теплообмена с окружающей средой (рис. 1).

В этом случае:

$\Delta P dt = C d\Theta \Rightarrow \Theta_A = \Theta_{уст} + \frac{\Delta P}{C} t$ – линейная зависимость температуры аппарата QAt от времени.

Провисания кривой на графике – следствие изменения активного сопротивления проводника под температурой.

Чтобы избежать последствий к. з. в тепловом отношении ЭАП, необходимо на стадии проектирования учитывать форму и сечение проводника, теплопроводность частей, условия теплообмена.

Методика расчета теплового режима при к. з. Так как при к. з. нагрев происходит адиабатически, то уравнение теплового состояния

$$\Delta P dt = C d\Theta; \quad (22)$$

$$\Delta P = J^2 r = K_{доб} \rho_0 [1 + \alpha(\Theta_A - \Theta_0)] \frac{l}{F}; \quad (23)$$

$$K_{доб} = K_{ЭБ} K_{ПЭ}; \quad (24)$$

$$C = cM = c\gamma lF = c_0 [1 + \beta(\Theta_A - \Theta_0)] lF\gamma; \quad (25)$$

$$M = \gamma Fl, \quad (26)$$

где C – теплоемкость; c – удельная теплоемкость; M – масса проводника; γ – плотность; c_0 – удельная теплоемкость при некой Θ_0 ; β – температурный коэффициент теплоемкости.

$$J^2 K_{доб} \rho_0 [1 + \alpha(\Theta_A - \Theta_0)] \frac{l}{F} dt = c_0 [1 + \beta(\Theta_A - \Theta_0)] lF\gamma d\Theta; \quad (27)$$

$$\frac{J^2}{F^2} dt = i^2 dt = \frac{c_0 [1 + \beta(\Theta_A - \Theta_0)] \gamma}{K_{доб} \rho_0 [1 + \alpha(\Theta_A - \Theta_0)]} d\Theta.$$

Проинтегрируем в следующем диапазоне:

Левая часть от 0 до $t_{откл} \rightarrow t_k$.

Правая часть от $\Theta_{ном}$ до Θ_k .

$$i^2 t_k = \frac{J^2}{F^2} t_k = A_{\Theta_k} - A_{\Theta_{ном}}; \quad A_{\Theta_k} - A_{\Theta_{ном}} - \text{численные значения от правой части}$$

Для определения этих значений пользуются графиком (рис. 2).

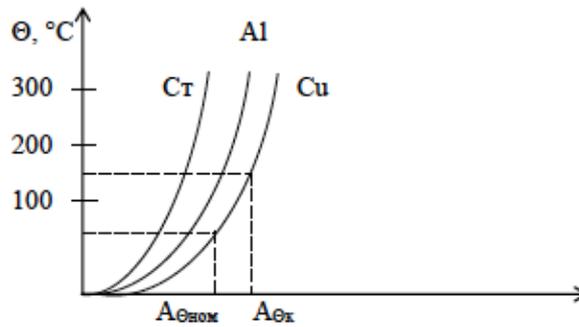


Рис. 2

Таким образом, расчет ведут по следующей схеме:

Зная $\Theta_{ном}$, при некотором номинальном режиме аппарата проецируют зависимость на материал и опускают перпендикулярно, определяя $A_{\Theta_{ном}}$.

Зная $\Theta_{к}$, можно рассчитать J, F .

Свойства или способность аппарата противостоять кратковременному тепловому воздействию от токов к. з. без последствий, препятствующих их дальнейшей исправной работе, – *термическая стойкость*.

Основной критерий – конечная температура при к. з. $\Theta_{к}$, превышение которой ведет к пробое изоляции, нарушению надежности контактной системы и потери механических свойств элементов аппарата.

Установлено, что допускаемая температура при к. з. 120...300 °С, в то время как допускаемая температура при номинальном токе 60...80 °С. Дopusкаемая температура для голых алюминиевых проводов – 200 °С, медных – 300 °С.

Столь высокие допустимые температуры по термической стойкости обусловлены кратковременностью их воздействия. Заводы-изготовители по термической стойкости регламентируют два параметра:

- 1) $J_{тет}$ – ток термической стойкости, период состояния тока к. з., действительные значения;
- 2) $t_{тет}$ – время действия тока $J_{тет} \sim (1 - 10 \text{ с})$: с увеличением тока $J_{тет}$ время сокращается.

Если необходимо определить значение допустимого тока, не лежащего в диапазоне 1...10 с, то пользуются следующим соотношением:

$$J_{тет}^2 t_{тет} = J_{x}^2 t_x. \quad (28)$$

На термическую стойкость подвергают не все аппараты, а лишь трансформаторы тока с номинальным током более 1000 А. В основном проверка идет на электродинамическую стойкость.

1.3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОНТАКТЫ

1. Сопротивление электрических контактов.
2. Нагрев электрических контактов при прохождении электрического тока.

Электрические контакты: определение и классификация. Электрические контакты – любые места соединения токопроводящих материалов, образующие замкнутый круг для тока – контакт (касание).

На сегодня в электрической энергосистеме страны применяется огромное количество контактных электрических аппаратов, и надежность работы контактной системы во многом определяет качество аппаратов.

В зависимости от назначения и условий работы контакты разделяют на две группы:

- неразмыкаемые;
- размыкаемые.

Неразмыкаемые: неподвижные, подвижные. Неподвижные – для соединения шин или проводов к электрическим аппаратам, машинам. Если присутствует перемещение первой контакт-детали относительно другой без разрыва цепи, то такие контакты подвижные неразмыкаемые.

Размыкаемые – всегда подвижны.

По характеру контактируемой поверхности (геометрический фактор) контакты можно разделить на: линейные, плоские, точечные.

Плоские реализуются при соприкосновении двух плоскостей контактируемых деталей (шина с клеммами).

Линейный контакт – при контактировании двух цилиндрических контактов с параллельными осями, цилиндрического и плоского контактов.

Точный контакт – при контактировании двух полусферических с плоским, двух цилиндрических с перпендикулярными осями.

Контактирование происходит не в первой точке и не по линиям, а по нескольким площадкам малой S (площадки контактирования).

В зависимости от тока, проходящего через контакты: слабо- и сильноточные контакты.

Слаботочные – контакты с током < 5 А, при $U \sim 10 \dots 100$ В, такие контакты в основном характерны для реле.

Сильноточные – в аппаратах низкого и высокого напряжения.

Типичным примером аппарата низкого напряжения является узкорегулируемые аппараты, характерной особенностью которых является большое число коммутаций в час: (3600 раз) и которые, следовательно, должны обладать высшей механической и электрической износостойкостью.

В аппаратах высокого напряжения, особенно выключателей, токи могут достигать сотни кА при напряжении сотен кВ, поэтому такие аппараты должны обладать высокими характеристиками по электродинамическим свойствам.

Механизм контактирования. Как бы тщательно не шлифовались контактные поверхности, они обладают всегда определенной шероховатостью и волнистостью, поэтому первый момент соприкосновения контактирующих поверхностей контакт происходит в отдельной точке (рис. 3).

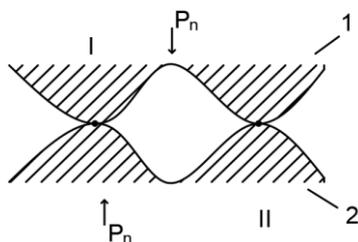


Рис. 3

И если бы материалы контакта обладали абсолютной твердостью, то такая картина была бы неизменна.

В действительности же с увеличением силы контактного нажатия P_k возникает пластическая деформация (+ упругая), которая приводит к тому, что отдельные точки контактов превращаются в небольшие площадки, число которых возрастает с увеличением давления.

В контактах различают:

- площадки, воспринимающие давление, S_d ;
- кажущуюся поверхность контактирования S_k , которую можно измерить (рис. 4).

В площадках S_d выделяют следующие зоны (рис. 5): 1 – α -пятна – чисто металлический контакт, в этих местах между контактами материалов возникает сила межмолекулярного взаимодействия, по этим пятнам возможно возникновение холодной сварки; 2 – тонкие адгезионные пленки, толщина $< 30 \text{ \AA}$ (10^{-8} от см), обладают электропроводными свойствами туннельного типа; 3 – толстые, нетокопроводящие пленки (сульфиды, оксиды и др.).

Сопротивление контактов. Нагрев происходит из-за наличия переходного сопротивления R_k . В свою очередь

$$R_k = R_c + R_{\Pi}, \quad (29)$$

где R_c – сопротивление сужения (стягивания) линий тока через площадки контактирования; R_{Π} – пленочная составляющая электрических контактов, под сопротивлением стягивания; R_c – не сопротивление контактного слоя, а именно сопротивление, обусловленное изменением S , прохождением линий тока из первой контактной детали 1 в другую 2 по сравнению с тем, если бы этого контакта не было (рис. 6).



Рис. 4

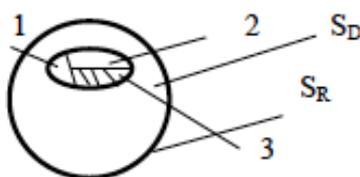


Рис. 5

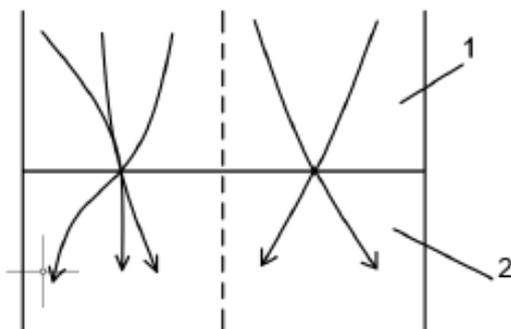


Рис. 6

Пленочная составляющая определяется третьей зоной площадок контактирования, доминирует в слаботочных контактах, где сила контактного нажатия P_k недостаточна для разрушения пленочной составляющей. В сильноточных – наоборот.

В общем случае R_k зависит от материала контактных деталей, числа площадок контактов, и главное от силы контактного нажатия P_k .

$R_k(P_k)$ в эмпирической форме:

$$R_k = \frac{\varepsilon}{R_k^n}, \quad (30)$$

где ε – коэффициент выражающий свойства контактирующих поверхностей (материал и составные поверхности); n – показатель степени, зависящий от геометрического фактора контактирующих деталей (для точечных $n = 0,5$, для плоских $n = 1$, линейных $n = 0,7 \dots 0,8$).

Рассмотрим графическую зависимость $R_k(P_k)$ (рис. 7).

При нагружении (P_k увеличивается) сплошная линия направлена вниз. R_k резко уменьшается по гиперболическому закону вследствие увеличения числа контактирующих площадок и из-за пластичной деформации, увеличения площади контактных площадок. Обозначенные явления происходят в начальный момент контакта, и по мере увеличения P_k пластичная деформация выбирает свой лимит, и в этом случае R_k стабилизируется.

При разгрузке (P_k уменьшается) кривая идет ниже нагрузочной из-за остаточной пластичной деформации. $S_{\text{конт}}$ не столь существенно влияет на R_k , по сравнению с P_k , однако увеличение площади контакта улучшает условия теплообмена и, следовательно, работу электрических контактов при длительном прохождении электрического тока.

Зависимость R_k от P_k для ЖМК гораздо ниже из-за большей поверхности контакта (смачивание жидким металлом твердых контакт-деталей).

Рассмотрим зависимость R_k от Θ (рис. 8).

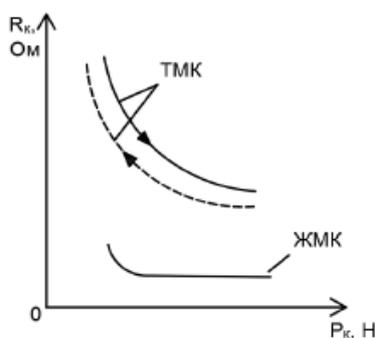


Рис. 7. Металлические контакты:

ТМК – твердые металлические контакты; ЖМК – жидкометаллические контакты

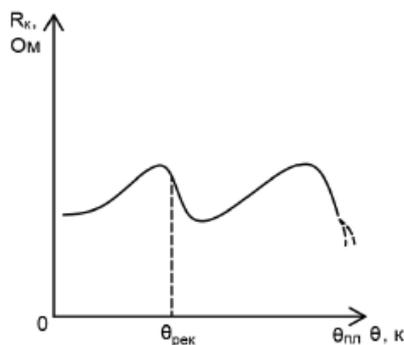


Рис. 8

Первый подъем $R_k(\Theta)$ электрических контактов определяется ростом сопротивления от температуры и при $t = \Theta_{\text{рек}}$ (рекристаллизации) происходит резкое уменьшение сопротивления. Так как при $\Theta_{\text{рек}}$ образуется равновесие структура и сопротивление которого из-за упорядоченности резко уменьшается.

Дальнейший рост обусловлен температурным ростом сопротивления материалов, и при $t = \Theta_{\text{пл}}$ из-за образующегося объема жидкого металла контактов подобно ЖМК и резкого возрастания площади контактирования сопротивление резко падает.

С понижением t сопротивление контактов должно уменьшаться, однако из-за охрупчивания материала число контактных площадок и площадь резко уменьшаются. Поэтому при охлаждении результаты непредсказуемы.

Нагрев электрических контактов при прохождении номинального рабочего тока.

Нагрев электрических контактов в номинальном рабочем режиме обусловлен внутренними источниками, т.е. наличием переходных сопротивлений электрических контактов, а также специфическими теплофизическими эффектами, которые присущи работе электрических контактов как в нормальных, так и в аномальных режимах.

Рассмотрим сначала прохождение электрического тока через контакты – слаботочные в нормальном режиме. В этом случае, помимо внутренних источников тепла, а это переходные сопротивления R_k , возникает ряд, который изменяет температурную симметрию в электрическом контакте – эффект Томсона, Пельтье, Колера.

Эффект Томсона – перенос тепла носителями заряда. Различают положительные и отрицательные эффекты. При положительном – тепло переносится в направлении электрического тока.

Эффект Пельтье возникает при контактировании разнородных металлов, и если термоЭДС совпадает с направлением тока, то происходит выделение тепла на электрическом контакте.

Эффект Колера обусловлен выделением тепла при прохождении тока за счет туннельного эффекта, и в этом случае тепло переносится в сторону анода, вызывая большой нагрев.

Обозначенные эффекты характерны для слаботочных электрических контактов, для сильноточных – они играют второстепенную роль. Для них на первое место выходят: сила самопроизвольного отброса контактов, вибрация, сваривание и т.д. Кроме того, в расчете контактов необходимо учитывать температуру в площадках контактирования как наиболее нагретая часть контактов, так как с контактными деталями сопряжены изоляционные материалы. Как известно, эти материалы разделены на классы нагревостойкости изоляции, поэтому температура контактов должна быть ограничена ГОСТом, допускается $\max \text{ } ^\circ t \leq 100 \dots 120 \text{ } ^\circ\text{C}$, и во всяком случае эта $^\circ t_{\text{конт}} < ^\circ t_{\text{рекристаллизации}}$ материала контактов, ибо это может привести к потере их механической прочности. Таким образом, при расчете контактных систем в электрических аппаратах необходимо знать допустимое значение тока через контакты, температуру на электрических контактах, температуру на контактных деталях в достаточно удаленных точках, силу контактного нажатия, при этом $t_{\text{конт}} \leq t_{\text{доп}}$.

Нагрев контактов при прохождении тока к. з. Ток к. з. намного превышает номинальный ток, в результате этого на электрических контактах наблюдается выделение тепла, обусловленное как внутренними источниками за счет наличия переходного сопротивления R_k ,

так и силами самопроизвольного отброса электрических контактов, которые также значительно превосходят аналогичные силы при номинальном режиме.

Рассмотрим состояния этой силы:

1. Электродинамическая сила отброса контактов. Связана с взаимодействием искривленных трубок тока при контактировании на площадках контактов.

Так как в трубке значение тока противоположно направлению $P_{эд}$, то стараются разорвать контакт.

2. Если $P_{эд} \geq P_k$ в определенный момент или в отдельных местах, то возникает электрическая дуга, и сила давления паров в этой дуге направлена на разрыв электрических контактов P_d .

3. За счет одинакового направления трубок тока через площадки контактов возникает сила притяжения, следовательно, стягивающая площадь контактов уменьшает диаметр возникшего металлического мостика между контактами детали, пинч-эффект, $P_{магн}$.

4. В результате возникающих сил самопроизвольного отброса: $\uparrow P_{смо} \rightarrow \downarrow P_k \rightarrow \uparrow R_k \rightarrow \uparrow \Theta_{эк}$, поэтому в отдельных точках контактов из-за высокой температуры может возникнуть явление взрывного испарения материала электрических контактов. Возникшая сила давления паров также увеличивает силу самопроизвольного отброса контактов.

5. Эта составляющая носит название «Сила отскока контактов» при включении $P_{констр}$

$$\sum P_{смо} = P_{эд} + P_d + P_m + P_{испар} + P_{констр}. \quad (31)$$

Данная задача решается различными путями:

- 1) конструкторы решают вопрос об увеличении P_k ;
- 2) используют расщепление контактной системы на ряд параллельных контакт-деталей (рис. 9);
- 3) используют компенсирующие устройства на базе электромагнитных э/д принципах (рис. 10).

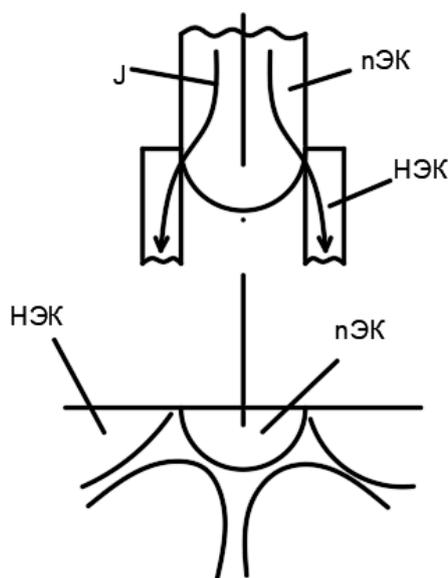


Рис. 9. Контакт-деталь

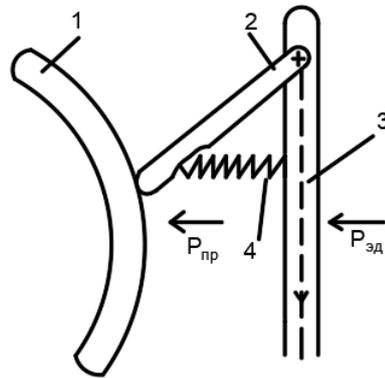


Рис. 10. Подвижный и неподвижный контакт-детали:

1 – неподвижный контакт детали; 2 – подвижный контакт детали; 3 – стойка;
4 – пружина, создающая контактное нажатие

Сваривание электрических контактов. Сваривание электрических контактов возможно при прохождении токов к. з. и токов перегрузки недопустимой длительности (горячее сваривание). Различают также и холодное (в α -пятнах).

Сваривание контактов может привести к аварийным ситуациям, так как при подаче команд на отключение цепь не разрывается. Поэтому при конструировании электрических аппаратов следует рассчитывать отрывное усилие электрических контактов при возникновении сваривания.

Этот вопрос решается экспериментальным путем.

Отрывное усилие зависит от силы контактного нажатия P_k , от амплитудного значения проходного тока и его длительности, глубины проплавления, применяемых материалов электрических контактов, состояния и обработки контактируемой поверхности.

1.4. КОНСТРУКЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ

1. Материалы электрических контактов.
2. Конструкция твердых металлических контактов.
3. Жидкометаллические контакты.

Материалы электрических контактов. На сегодня электрические контакты изготавливают из трех основных видов материалов – чистые металлы, сплавы, композиционные материалы. Материалы электрических контактов должны обладать следующими свойствами: высокой электропроводностью, теплопроводностью, достаточной прочностью, т.е. износостойкостью. Эти требования трудно сочетать в одном материале одновременно. В силовых электрических контактах из чистых металлов в основном используются медь и серебро, причем оба окисляются, но у серебра окисная пленка разрушается с повышением температуры, а у меди – наоборот, что вызывает увеличение переходного сопротивления R_k , поэтому более выгодно применять серебро (серебрение электрических контактов).

Для слаботочных контактов, которые отличаются малой силой контактного нажатия, основную роль в переходном сопротивлении играет пленочная составляющая, и поэтому,

чтобы свести ее к минимуму, в большинстве случаев используют благородные металлы (серебро, золото, палладий, вольфрам и др.).

В основном для сильноточных контактов на сегодня используются композиционные материалы, изготовленные методом порошковой металлургии. Основой конструкции таких контактов является решетка, созданная из относительно твердого износостойкого материала, а в порах такой решетки располагается материал с высокой электро- и теплопроводностью, поэтому при возникновении высоких температур электрических контактов материал-наполнитель расплавляется, но испаряется в значительно меньших объемах, чем если бы контакт изготовлялся только из этого материала, а решетка контакта защищает его от истирания при частых коммутациях. Такие композиции изготавливают из двух материалов в таком сочетании: серебро–окись кадмия, серебро–никель, серебро–графит и др.

Основные положения. Электрические контакты в ЭАП должны удовлетворять следующим требованиям:

1) в рабочем режиме (номинальном) электрические контакты должны проводить рабочий ток неограниченный отрезок времени, и при этом температура контактов не должна быть выше допустимой. Эти требования удовлетворяются выбором материала контактов, силой контактного нажатия, числом площадок контактирования;

2) при прохождении токов к. з. электрические контакты должны обладать ЭД- и термостойкостью;

3) электрические контакты должны быть стойкими по отношению к разрушающему действию электрической дуги, которая не только выжигает материал контактов, но и приводит к уменьшению комплекса их механических характеристик;

4) электрические контакты, которые осуществляют частые коммутации, должны обладать повышенной механической и электрической износостойкостью.

Механическая износостойкость электрических контактов – выдерживать заданное число циклов вкл/выкл без тока, такое число циклов достигает десятков миллионов.

Электрическая износостойкость – аналогичное мероприятие, но с электрическим током, число циклов ~ сотни тысяч – единиц миллионов.

Неразмыкаемые неподвижные электрические контакты. Такие контакты – в основном плоские, с их помощью осуществляют подключение электрических машин, трансформаторов, аппаратов к проводам, шинам, кабелям. Данные соединения на сегодня главным образом осуществляются с помощью болтовых соединений, а также сваркой. Чтобы осуществить неразмыкаемый неподвижный контакт, необходимо создать условия для сцепления контактируемых металлов электрических контактов, что достигается соответствующей обработкой поверхностей контактируемых деталей (грубым напильником, шлифовка не допускается) с последующим контролем затяжки болтовых соединений динамометрическим ключом. В результате получается монолитное соединение. Если не соблюдать условия, то контактное соединение начинает «дышать» вследствие текучести материала, особенно алюминия, в пространство между деталями поступает кислород (воздух), который вызывает окисление контактных деталей, а это приводит к увеличению R_k и последующему нагреву контакта.

Значение переходного сопротивления болтового соединения определяется числом болтов в соединении, прочностью и силой затяжки.

Чем прочнее материал болта, тем большее усилие можно создать в контактном соединении.

Соединение контактных деталей происходит после соответствующей обработки с последующей покраской.

Неразмыкаемые подвижные электрические контакты. Такие контакты применяются в аппаратах низкого и высокого напряжения.

В аппаратах низкого напряжения в качестве контакта используется «гибкая связь». Она представляет собой либо набор медных пластин толщиной 0,1 мм, собранных в пакет, либо набор медных жгутов диаметром $\leq 0,1$ мм.

С увеличением хода гибкость таких связей уменьшается, поэтому их используют при ходе ≤ 250 мм.

В аппаратах высокого напряжения связь реализуется через скользящие или роликовые контакты.

Рассмотрим конструкцию скользящих контактов (рис. 11).

Контакт детали 1 может перемещаться относительно неподвижного 2 (3, 4). Число ламелей определяется номинальным током контакта.

Основной недостаток: большие силы трения и при номинальных значениях тока требует мощного привода.

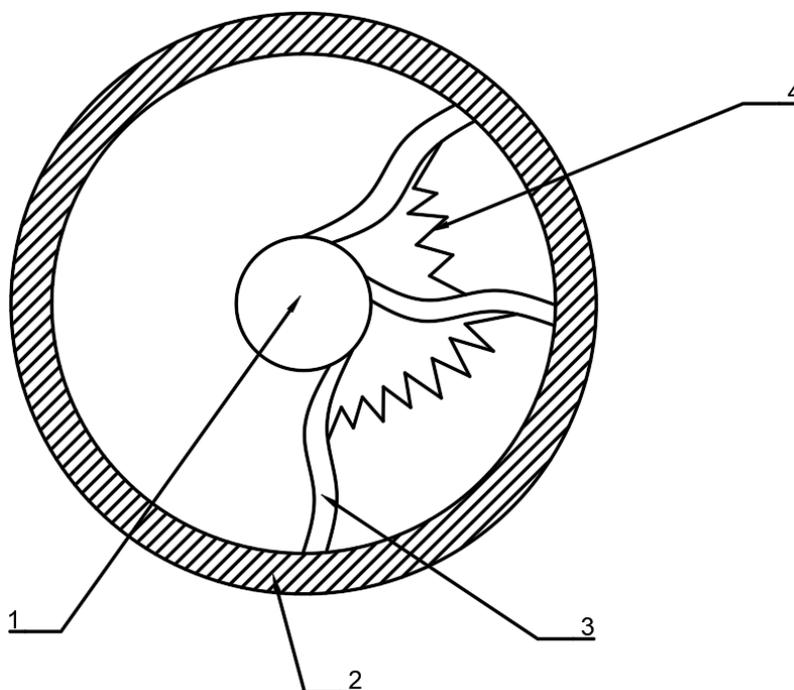


Рис. 11. Контакт:

1 – подвижный электрический контакт; 2 – латунный стакан неподвижного контакта;
3 – Z-образная ламель; 4 – контактные пружины

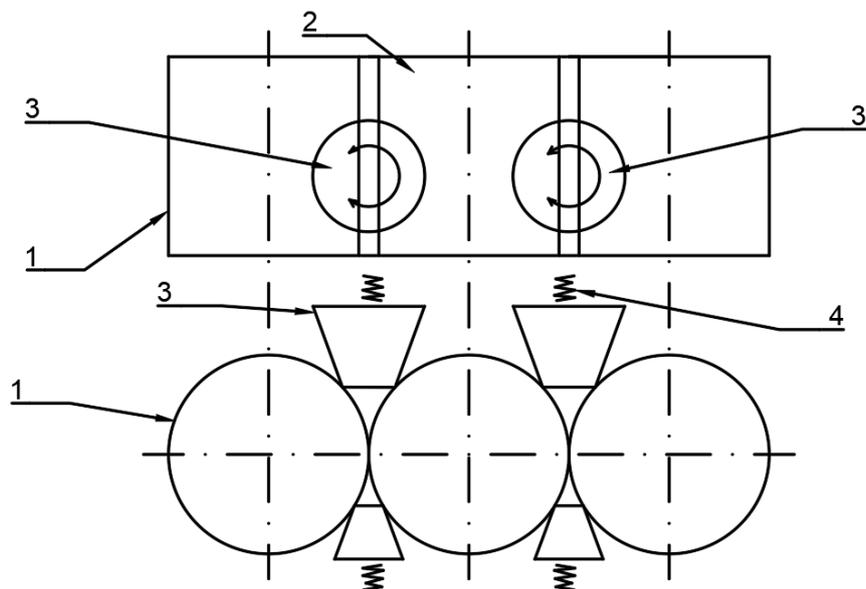


Рис. 12. Роликовый контакт:

1 – неподвижный контакт детали (направляющий); 2 – подвижный контакт детали;
3 – ролики; 4 – контактные пружины

Рассмотрим конструкцию роликового контакта (рис. 12).

Число роликов, осуществляющих точечный контакт, зависит от $I_{ном}$.

Подобная конструкция используется в маломасляных выключателях высокого напряжения.

Размыкаемые электрические контакты (всегда подвижны). Их конструкция определяется номинальным напряжением аппарата, номинальным продолжительным током, током к. з., назначением и режимом работы аппарата.

В наиболее тяжелой стадии работы контактов при их размыкании и отключении, номинальный ток обычно больше тока дугообразования.

Чтобы предотвратить действия дуги на контакты в разомкнутом состоянии, выбирают определенное расстояние между электрическими контактами с запасом. И это расстояние в исходном разомкнутом состоянии – раствор или зазор контактов.

Так как на стабильность переходного сопротивления, помимо материала и силы контактного нажатия, влияет и число контактных площадок, то электрические контакты, в которых в разомкнутом состоянии возникает максимальное число контактных площадок, – самоустановленные контакты, в противном случае – несамоустановленные.

Самоустановленные: мостиковые контакты в магнитных пускателях, контакторах и т.д.

Рассмотрим конструкцию самоустановленного мостикового контакта в магнитном пускателе (МП) (рис. 13).

При подаче напряжения на δ срабатывает электромагнит, притягивается якорь b вместе с траверсой, и при этом происходит замыкание электрических контактов 1 и 2, наряду с этим $\delta > \alpha$, где δ – ход якоря; α – зазор (раствор) контактов; $\beta = \delta - \alpha$ – провал электрических контактов; β – расстояние, которое прошли бы подвижные электрические контакты после выбора зазора, если бы отсутствовали неподвижные электрические контакты.

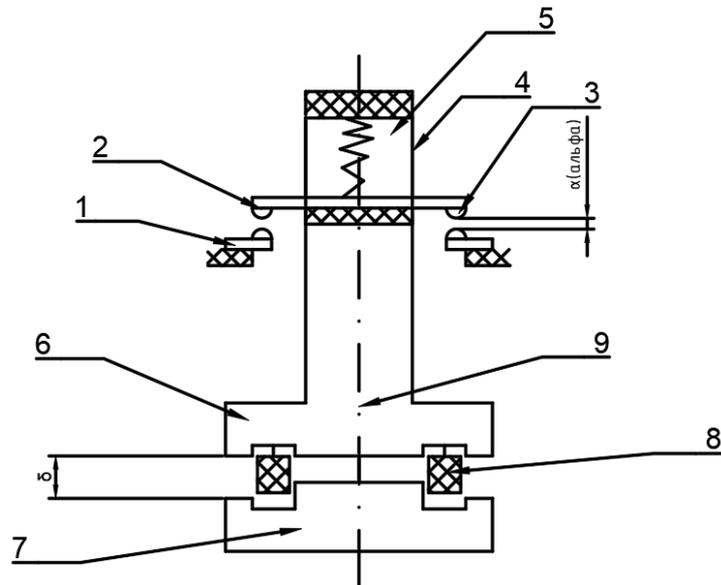


Рис. 13. Самоустановленный мостиковый контакт в магнитном пускателе:

1 – неподвижные электрические контакты первого полюса аппарата; 2 – подвижный электрический контакт (мостик); 3 – напайки (контактные площадки); 4 – траверса из диэлектрика (на полочке, которая располагается на мостике и прижимается к ней контактной пружиной); 5, 6 – якорь электромагнита, его подвижная часть; 7 – неподвижная часть; 8 – обмотка; 9 – ось, с помощью которой траверса прикрепляется к якорю

Провал – одна из важных характеристик всех контактных аппаратов и всегда присутствует в них. Выбор провала обеспечивает необходимое конечное контактное нажатие.

При работе электрических контактов происходит износ их накладок в результате трения, ударов, воздействия электрической дуги, значит, в процессе работы α увеличивается, при $\delta = \text{const}$ β – уменьшается, поэтому провал контактов постоянно контролируют, и при его уменьшении на 50% производят замену электрических контактов. У маломощных аппаратов и аппаратов низкого напряжения $\beta \sim 3 \dots 4$ мм, а в аппаратах высокого напряжения – $\beta = 8 \dots 10$ мм. В аппаратах низкого напряжения применяются конструкции контактов, представленные на рис. 14.

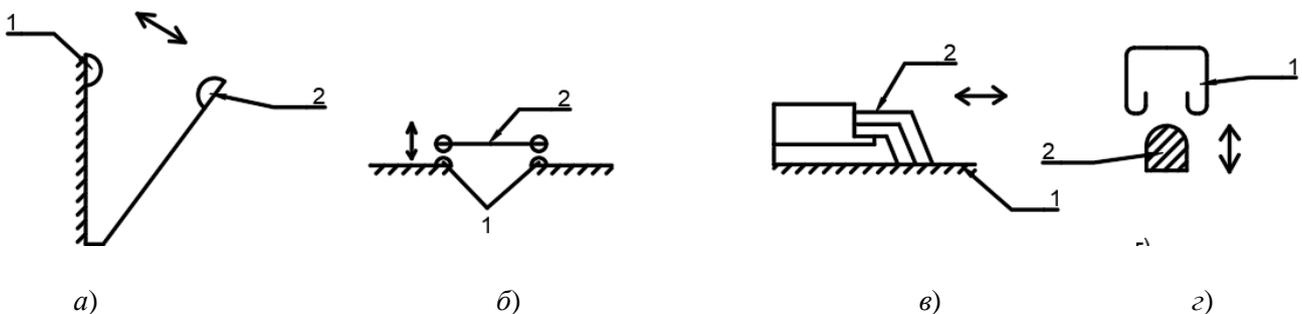


Рис. 14. Конструкции контактов:

1 – неподвижная; 2 – подвижная;
а – рычажного типа; б – мостикового типа; в – щеточный контакт; г – врубного типа

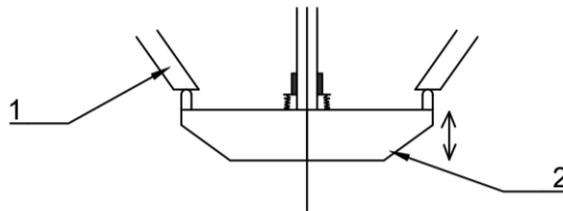


Рис. 15. Траверса с подвижными электрическими контактами

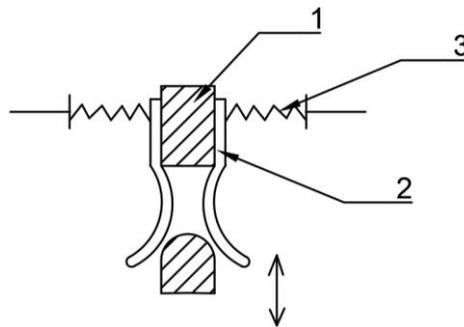


Рис. 16. Торцевые точечные контакты:

1 – рейка; 2 – ламель (палец); 3 – контактная пружина;
4 – подвижный электрический контакт или нож

Рассмотрим некоторые виды высокого напряжения. В боковых масляных выключателях используются торцевые точечные контакты (рис. 16).

В разъединителях используются многоточечные электрические контакты пальцевого типа.

Число пар ламелей определяется продолжительностью $I_{ном}$.

Пружина предназначена для создания предварительного контактного нажатия, которое необходимо для предотвращения отскоков контактов при замыкании, что уменьшает переходное сопротивление электрических контактов.

Кроме рассмотренных аппаратов высокого напряжения часто применяются электрические контакты розеточного типа (в маломасляных выключателях). Часто в контактных аппаратах применяются так называемые дугогасительные контакты, которые включаются главным электрическим контактом (рис. 17).

При замыкании первыми замыкаются дугогасительные, а затем главные. Поэтому цепь разрывают дугогасительные контакты, и они принимают на себя основную тяжесть коммутации.

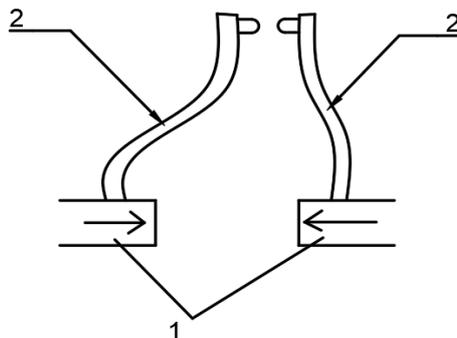


Рис. 17:

1 – главные электрические контакты; 2 – дугогасительные электрические контакты

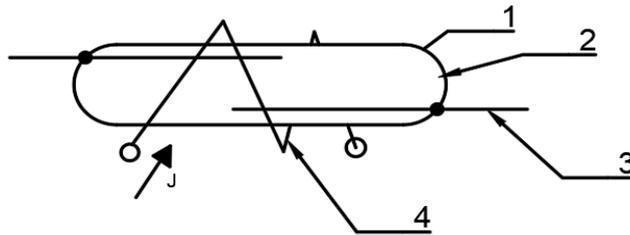


Рис. 18. Конструкция геркона:

1 – стеклянная колба; 2 – атмосфера в колбе (вакуум или инертный газ);
3 – контакт детали, впаянной в колбу; 4 – катушка, обтекающая током I , создающая магнитное поле

Герконы. Герконы – герметизированные магнитоуправляемые контакты. Силовой вариант этих контактов называется герсиконом. Рассмотрим их конструкцию (рис. 18).

В отдельных случаях вместо катушки может использоваться постоянный магнит.

При подаче напряжения на катушку контакт детали намагничивается и происходит их замыкание, после снятия напряжения за счет упругости контакт деталей, которые изготавливаются из магнитного мягкого материала, размыкаются. Достоинство герконов: малый износ, следовательно, большой срок службы, кроме того, из-за малого раствора контактов достигается их высокое быстродействие. Время срабатывания таких контактов 0,5...1,0 мс, токи не превышают 0,5...1,0 А. Для повышения стабильности переходного сопротивления применяется напыление контактов деталей благородными металлами и соответственно атмосферной колбы.

Жидкометаллические электрические контакты. Основное достоинство: увеличена контактирующая площадь, искривлены трубки тока, поэтому в таких контактах нет необходимости мощных приводов, и при удачно выбранном канале с жидким металлом вертикали достигаются за счет уменьшения габаритов и массы контактного аппарата. Обычно в качестве жидкого металла применяют галлий. Температура плавления 30 °С.

Рассмотрим один из вариантов жидкометаллического электрического контакта (рис. 19).

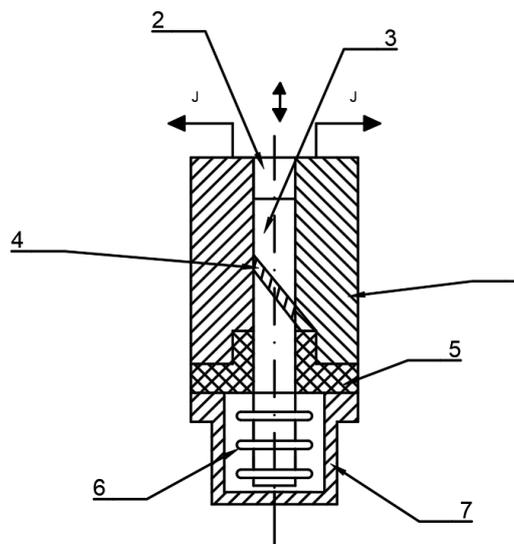


Рис. 19. Жидкометаллический контакт:

1 – контакт детали; 2 – разделяющий канал; 3 – жидкий металл в канале; 4 – перегородка из изоляционного материала с отверстием; 5 – изоляционный материал; 6 – сильфон; 7 – корпус

В замкнутом состоянии канал наполнен жидким металлом, и через контакты проходит электрический ток. Нахождение металла в канале осуществляется за счет сжатия силфона снизу. При отключении жидкий металл быстро удаляется из канала за счет отхода силфона вниз и выдувания металла из канала либо газовым путем, либо магнитным.

Основные недостатки: возможен выброс жидкого металла под воздействием электромагнитных и электродинамических сил, а также подогрев жидкого металла.

Большая площадь, а значит, переходное сопротивление жидкометаллических контактов меньше, чем у твердометаллических контактов.

Электрическая дуга и ее характеристики

Основные сведения. Все ЭАП коммутации цепи делятся на:

- контактные;
- бесконтактные.

Последние созданы на базе полупроводников.

В контактных ЭАП качество коммутации определяется временем коммутации, возникает перенаправленность глубинной коммутации, а также объемом ионизации газов, световыми и звуковыми эффектами. Время коммутации ЭАП выбирается как можно меньшим $\approx 0,01 \dots 0,10$ с.

Под глубиной коммутации понимают отношение сопротивления

$$h = R_{\text{отк}} / R_{\text{вкл}}.$$

И для контактных аппаратов

$$h = 10^{12} \dots 10^{14}, \text{ а для бесконтактных } - 10^4 \dots 10^7.$$

Наиболее тяжелой стадией работы контактных аппаратов является стадия отключения.

В этом случае при размыкании контактов возникает электрическая дуга или тлеющий разряд, в зависимости от давления окружающей среды в межконтактном промежутке. Эти виды газового разряда приводят к эрозии и выжиганию материала контактов. Что определяет долговечность и надежность работы ЭАП.

Так как в силовых аппаратах давление в межконтактном промежутке – атмосферное или более высокое, то для них характерно возникновение электрической дуги высокого давления.

Ее основные особенности:

- 1) дуга возникает при относительно больших значениях коммутируемого тока (для чистых металлов 0,5 А);
- 2) температура в центре дугового столба достигает высшей $t 6000 \dots 25\,000$ К;
- 3) плотность тока на катоде характеризуется высокими значениями, достигающими $20^2 \dots 10^3$ А/мм²;
- 4) падение напряжения при катодной области является относительно небольшим 10...20 В и не зависит от значения коммутации тока.

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) газового разряда проиллюстрирована на рис. 20.

Процесс ионизации производится самим разрядом.

Участок *abc* – коронный разряд.

Участок *авс* – слоистый тлеющий разряд.

Участок *cd* – дуговой разряд (можно получить, минуя тлеющий и коронный разряды).

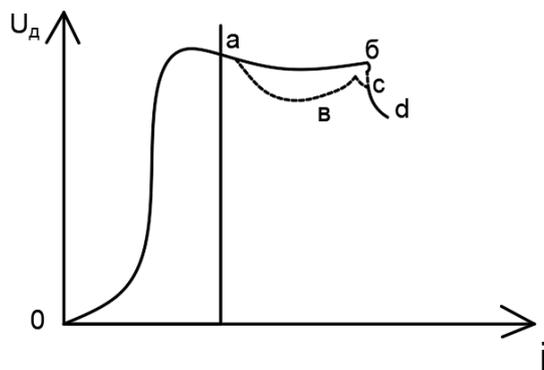


Рис. 20. ВАХ газового разряда:

участок O/a – несамостоятельный разряд и в этом случае он поддерживается энергией электрического поля и внешним ионизатором;

участок a/d – самостоятельный разряд, где он поддерживается энергией электрического поля

Течение самостоятельного разряда определяется свойствами среды, формой и видом материала электродов, распределением электрического поля в межконтактном промежутке.

При газовом разряде происходит два взаимобратных процесса: ионизация (образование положительных ионов и электронов) и деионизация (убыль носителей зарядов в газовом заряде).

Области дугового разряда. Будем рассматривать электрическую дугу высокого давления (при атмосферном и более высоком). При размыкании электрических контактов электрический ток в цепи не прекращается, а проходит через дуговой столб, который находится при очень высокой t , благодаря чему является токопроводящим. При коммутации немоощных силовых цепей в межконтактном промежутке возникает искра, которая практически не наносит разрушительного воздействия на электрические контакты.

При коммутации мощных силовых цепей возникает устойчивая электрическая дуга и в этом случае необходимо применять специальное дугогасительное устройство.

В маломощных цепях искра возникает вследствие недостаточного количества в межконтактном промежутке испаряемого материала контактов, т.е. малой концентрации носителей зарядов, хотя t на контактных площадках достигает значительных значений. Однако этой t недостаточно для испарения материалов контактов и поэтому в межконтактном промежутке возникает неустойчивый газовый разряд – искра.

При коммутации мощных силовых цепей плотности тока являются столь высокими, что возникает большая концентрация в межконтактном промежутке материалов контактов, а вместе с тем высокая концентрация носителей заряда, что способствует возникновению устойчивой дуги.

При дуговом разряде различают следующие три области:

- 1) область катодного падения напряжения;
- 2) область дугового столба;
- 3) прианодная область.

Катодная область отличается очень тонким слоем и относительно небольшим падением напряжения. Однако из-за малой его толщины напряженность электрического поля в этой области равна $10^5 \dots 10^6$ В/см, в результате чего происходит вырывание электрона с поверхности катода. Здесь возможны два варианта: либо термоэмиссия, которая характерна для тугоплавких материалов (графит, вольфрам) или автоэлектронная эмиссия – получение электрона с холодного катода за счет высокой напряженности электрического поля.

Энергия, поступающая от источника прикатодной области, идет на получение электрона. Данные электрона движутся под действием электрического поля к аноду через ток электрической дуги, и вокруг анода образуется электронное облако – некомпенсированный отрицательный заряд из-за малой концентрации положительных ионов. Это электронное облако создает вблизи анода область анодного падения напряжения, которое достигает нескольких вольт. Оно зависит от материала анода и его σt .

Процессы, происходящие в дуговом столбе

Наиболее обширной и интересной с точки зрения создания дугогасительных устройств является область дугового столба. Чтобы создать дугогасительное устройство, необходимо знать процессы, происходящие в дуговом столбе.

Сначала рассмотрим процесс ионизации (образование носителей заряда в нем).

Дуговой столб при устойчивом горении дуги представляет собой высокотемпературную плазму с очень высокой концентрацией электронов и положительных ионов, причем эта концентрация примерна.

Кроме того, в дуговом столбе, кроме носителей заряда, находится еще больше нейтральных атомов и молекул материалов окружающей среды и использованного материала контактов.

Носители заряда вместе с нейтральными частицами находятся в хаотичном тепловом движении. Кроме того, они участвуют и в направленном движении согласно воздействию электрического поля. Наиболее подвижные части этих носителей заряда – свободные электроны, однако из-за высокой плотности в межконтактном промежутке всех частиц длина свободного пробега электронов мала, поэтому при их соударениях с нейтральными атомами процесса ионизации не происходит – недостаточная кинетическая энергия носителей заряда.

Из-за большого количества соударений элементов и передачи кинетической энергии нейтральным частицам повышается их температура и увеличивается их кинетическая энергия. Таким образом, основное отличие дуги высокого давления состоит в том, что температура и кинетическая энергия как носителей заряда, так и незаряженных частиц примерно одинаковы. В такой плазме только заряженные частицы обладают высокой энергией, а нейтральные разогреты до температуры сотен градусов.

В результате высокой температуры нейтральных частиц именно при их соединении друг с другом и возникают носители заряда (электроны и положительные ионы поддерживают ток в дуговом столбе). Такой процесс ионизации – *термический*.

Удельная ионизация и температура дуг столба зависят друг от друга и взаимосвязаны. И энергия источника коммутативной цепи идет на процесс термической ионизации при дуговом разряде.

Основой для образования дугового разряда в межконтактном промежутке и поддержания указанного состояния плазмы служит именно термическая ионизация, а не процесс вырывания электрона из катода.

В дуговом столбе происходят непрерывные процессы, связанные с убылью или потерей энергии – деионизацией. Процесс деионизации может происходить с помощью двух механизмов:

- 1) за счет рекомбинации;
- 2) за счет диффузии.

Рекомбинация – образование нейтральных частиц за счет выделения заряженных частиц. Данный процесс наиболее характерен при невысоких относительно заряженных частиц друг с другом, так как радиус действия электрического поля очень мал. Поэтому процессы рекомбинации характерны для относительно невысоких температур в дуговом столбе. Так, при понижении температуры дугового столба с 10 000 до 1000 К увеличивается процесс рекомбинации в 8 – 10 раз.

Наиболее интенсивно процесс рекомбинации происходит на стенках изоляторов за счет абсорбции этих носителей зарядов. Кроме того, процессу рекомбинации способствует и низкая температура изоляции.

Другим механизмом является диффузия носителей заряда, которая обусловлена высокой разностью концентрации этих носителей в центральной части дугового столба и переформирование в радиальном направлении. Данный механизм более характерен для высоких температур, и опытом установлено, что в толщине стенки 1 мм с температурой 4000 К значение тока $I = 0,05\%$ от значения тока в центральной части, поэтому температура дугового столба в 4000 К и считается его конечной границей.

Диаметр дуги

$$d = k\sqrt{Jg}, \quad (32)$$

где k – некоторая константа; Jg – ток в дуге.

Таким образом, при горении дуги протекают два противоположных процесса: ионизации и деионизации, если их скорости одинаковы, то возникает устойчивая электрическая дуга.

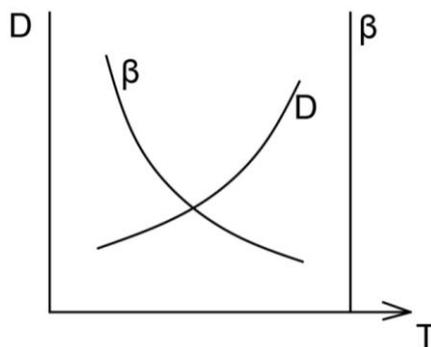


Рис. 21

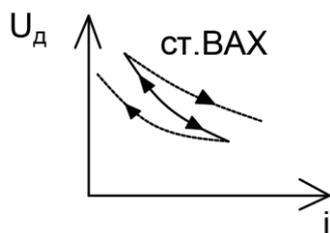


Рис. 22

ВАХ электрической дуги. С увеличением тока растет температура дугового столба и повышается степень термической ионизации. В свою очередь увеличение скорости ионизации приводит к увеличению процессов деионизации. Если ток в дуговом столбе изменяется медленно, то имеем ряд равновесных состояний, которые характеризуются равными скоростями процессов ионизации и деионизации. Такое состояние дуги при малом изменении тока характеризуется статической ВАХ.

При быстром изменении тока процессы ионизации и деионизации не совпадают. Так, при понижении тока ВАХ проходит ниже статической характеристики, ибо процессы деионизации отстают, и наоборот.

Процессы опережения или отставания зависят от условий горения дуги и характеризуются динамической ВАХ (пунктирная линия).

Условие горения дуги (свойства окружающей среды, межконтактного промежутка, состояния контактов и т.д.) характеризуется одной единицей статической ВАХ и бесконечным множеством статических ВАХ.

1.5. ОТКЛЮЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Электродуговое размыкание цепей:

- 1) отключение цепей постоянного тока;
- 2) отключение цепей переменного тока.

Отключение цепей контактными аппаратами сопровождается возникновением дуги в межконтактном промежутке между расходящимися контактами, и эта дуга должна быть быстро погашена.

Отключение цепей постоянного тока связано с уменьшением тока и от индуктивности отключения цепи, чем выше параметры, тем выше перенапряжение. При этом отключивший аппарат должен рассеивать значительную энергию возникающей дуги. Обозначенные факторы сильно осложняют процесс отключения цепей постоянного тока. Цепи переменного тока отключаются значительно легче контактными аппаратами, так как синусоидальный ток проходит через точку естественного нуля при изменении направления, и в это время дуга гаснет, поэтому основное назначение ДУ (дуговое устройство) заключается в том, чтобы не дать возможность для повторного зажигания дуги.

Если отключенная цепь характеризуется токами единиц ампер при направлении источника сотни вольт, то дуга практически не возникает. Не возникает она и в том случае, если отключить любые токи при напряжении $U = 10 \dots 20$ В.

В межконтактных промежутках ток изменяет свои свойства в процессе отключения и прохождения через них электрического тока от состояния проводника, который характеризуется малым сопротивлением R_k , до свойств диэлектрика, когда дуга погашена, а остаточный ионизационный столб между контактами рассеян. При этом направление на контактах

изменится от падения напряжения R_k до напряжения источника, а электрическая прочность, которая характеризуется направлением $U_{ПРБ}$ окружающей среды, где электрические контакты изменяются от нулевого значения в замкнутом состоянии контактов до $U_{ПРБ}$ среды.

Напряжение, характеризующее электрическую прочность среды в межконтактном промежутке, называется $U_{вп}$ – восстановительная прочность МКП (межконтактный промежуток), а напряжение, характеризующееся восстановлением значения на электрических контактах со стороны коммутационной цепи $U_{в}$, – восстанавливающееся напряжение.

Электрическая дуга в МКП будет успешно погашена, если

$$U_{вп}(t) > U_{в}(t).$$

Математическая модель продуктов горения и гашения дуги описываются системой их двух нелинейных дифференциальных уравнений, одно из которых описывает состояние дуги, а второе – электрическое состояние цепи при размыкании контактов. На сегодня эта система не имеет решения, поэтому процессы гашения и горения дуги в цепях постоянных и переменных токов рассмотрим отдельно.

Условия горения и гашения дуги постоянного тока. Процесс горения и гашения дуги нужно рассматривать как нарушение устойчивости в рассматриваемой системе, когда ток уменьшается от некоторого устойчивого значения до нуля. Рассмотрим электрическую цепь постоянного тока, содержащую некоторое эквивалентное активное сопротивление и индуктивность.

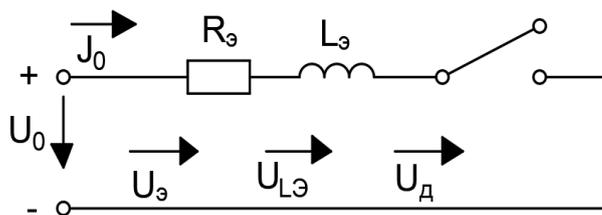


Рис. 23

АО – отключенный аппарат

$$J_{уст} = J_0 = U_0/R_э. \quad (33)$$

При размыкании установленная система нарушается

$$iR_э + L(di/dt) + U_g = U_0. \quad (34)$$

Для успешного гашения дуги на всем интервале изменения тока J_0 до 0 его производная по времени $di/dt < 0$.

Определим значения из уравнения

$$di/dt = 1/L[(U_0 - iR_э) - U_g] = 1/L(U_c - U_g); \quad U_c = U_0 - iR_э, \quad (35)$$

где U_c – направление сети, прикладываемое МКП (межконтактном промежутке) ОА со стороны сети. Оно характеризуется реостатной прямой, где $U_c < U_g$, т.е. источник не должен иметь способность поддерживать электрическую дугу, для анализа процесса гашения дуги рассмотрим ВАХ электрической дуги по отношению к реостату и характеристике.

Если ВАХ дуги касается $U_g(i)$ и $U_c(i)$, то возникает дуга, которая характеризуется некоторыми критическими параметрами: например длина дуги и др.

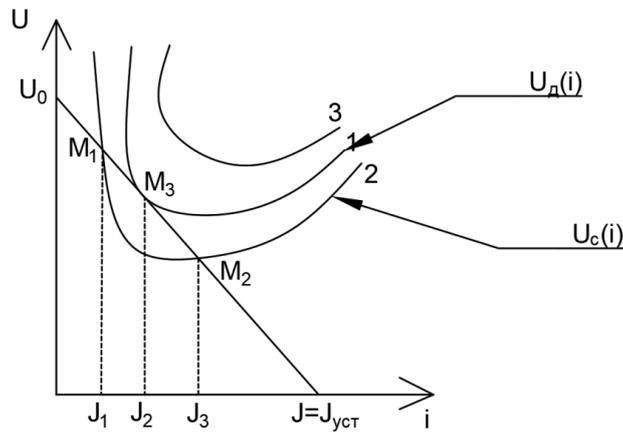


Рис. 24. Реостатная характеристика и ВАХ

Пусть ВАХ пересекает реостатную характеристику. Возникают условия для устойчивого горения дуги в точке M_1 . Пусть $J \uparrow$ на ΔJ , $U_g > U_c$, $di/dt < 0$, и ток возвращается в первоначальное значение $\rightarrow J_1$.

$J - \Delta J$, $U_g < U_c$, $di/dt > 0 \rightarrow J$ возрастет до значения J_1 .

В точке M_2 возникают условия для неустойчивого горения дуги:

– в случае возрастания тока напряжение $U_g < U_c$, и $di/dt > 0$, и ток возрастает до значения J_1 , точка M_2 перебрасывается в точку M_1 ;

– в случае уменьшения тока $U_g > U_c$ и $di/dt < 0$, ток уменьшается до 0, дуга гаснет.

Если ВАХ дуги займет положение 3, т.е. не будет пересекать $U_c(i)$, то на всем диапазоне изменения тонов $U_c < U_g$, $di/dt < 0$, следовательно, в положении 3 дуга не появится на электрических контактах. Следовательно, условия успешного гашения электрической цепи постоянного тока: если ВАХ дуги выше реостатной характеристики на всем диапазоне изменения тонов – от $J_{уст}$ до 0, то дуга будет погашена. Такие условия создает правильно сконструированное ДУ (дуговое устройство), если же ВАХ дуги пересекает реостатную характеристику, то создаются условия устойчивого горения дуги:

$$di/dt > I/L(U_c - U_g); \Delta U > L(di/dt),$$

то можно оценить время гашения дуги $\Delta U dt = L di (di/\Delta U)$, значит, чтобы уменьшить/понижить температуру гашения дуги, необходимо уменьшить индуктивность и ΔU , но с уменьшением температуры растет скорость изменения тока, следовательно, возникает перенапряжение.

Из приведенных ВАХ и реостатных характеристик следуют два основных способа реализации успешного гашения дуги постоянного тока:

1) изменение сопротивления цепи в целях увеличения наклона реостатной характеристики, чтобы она проходила ниже ВАХ-дуги;

2) поднятие ВАХ-дуги над реостатной характеристикой.

Первый способ трудно реализовать, так как за короткий промежуток времени необходимо ввести в цепь дополнительное сопротивление, равнозначное R_n . На практике используют второй способ, т.е. с помощью ДУ поднимают ВАХ. Этот способ реализуется двумя методами:

– увеличение прикатодного падения напряжения, которое равняется сумме падения напряжения;

– увеличение градиента падения напряжения в дуговом столбе.

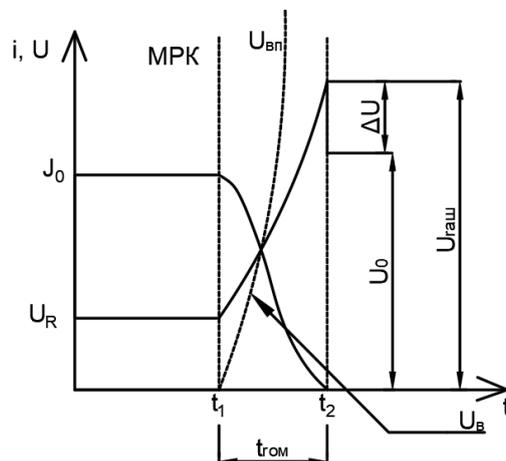


Рис. 25

Первый метод реализуется с помощью применения дугогасительных решеток, когда дуга делится на ряд коротких дуг. Второй метод реализуется с помощью охлаждения дугогасительных камер (ДК).

Перенапряжения при погашении дуги. Проанализируем изменения тока и напряжения на электрических контактах и в МКП при успешном гашении дуги. Для этого рассмотрим временные диаграммы указанных величин (рис. 25).

До t_1 контакты замкнуты, на них падает напряжение U_k , и течет ток I_0 , в момент t_1 – размыкание контактов (МПК). При усиленном гашении дуги $U_{вп} > U_в$, которая возрастает до $U_{гаш}$, и в момент t_2 ток равен нулю – наблюдается наиболее высокая скорость его уменьшения. Определим напряжение гашения дуги:

$$U_0 = iR_s + L(di/dt) + U_g, t_2, \text{ где } i = 0;$$

$$U_0 = L(di/dt) + U_{гаш} : U_{гаш} = U_0 - L(di/dt), \text{ где } di/dt < 0;$$

$$U_{гаш} = U_0 + |L(di/dt)|.$$

Возникающее напряжение, превышающее напряжение источника, называется перенапряжением в момент t_2 – оно максимально, $U_{гаш}$ и $i = 0$, для $t > t_2$ происходит утечка зарядов из емкости цепи, и напряжение восстанавливается до напряжения источника U_0 , т.е. перенапряжение определяется индуктивностью, скоростью уменьшения тока и деионизации со стороны применяемого ДУ. С уменьшением $t_{гаш}$ резко увеличивается перенапряжение, особенно у быстродействующих аппаратов, что необходимо учитывать при выборе соответственного класса изоляции.

Динамические характеристики электрической дуги переменного тока.

Так как при частоте $f = 50$ Гц токи и напряжения изменяются быстро, при исследовании процессов горения и гашения электрической дуги работают с ВАХ.

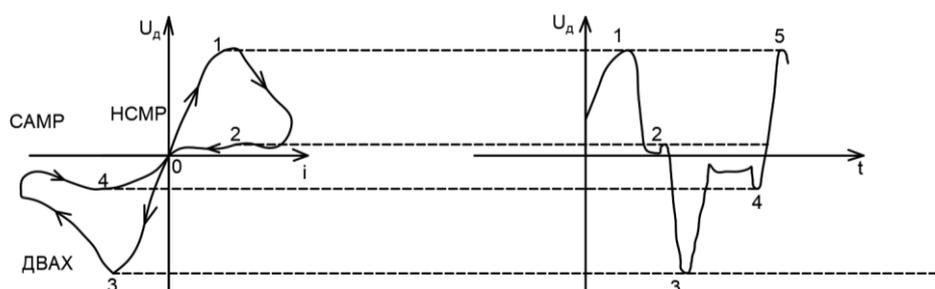


Рис. 26

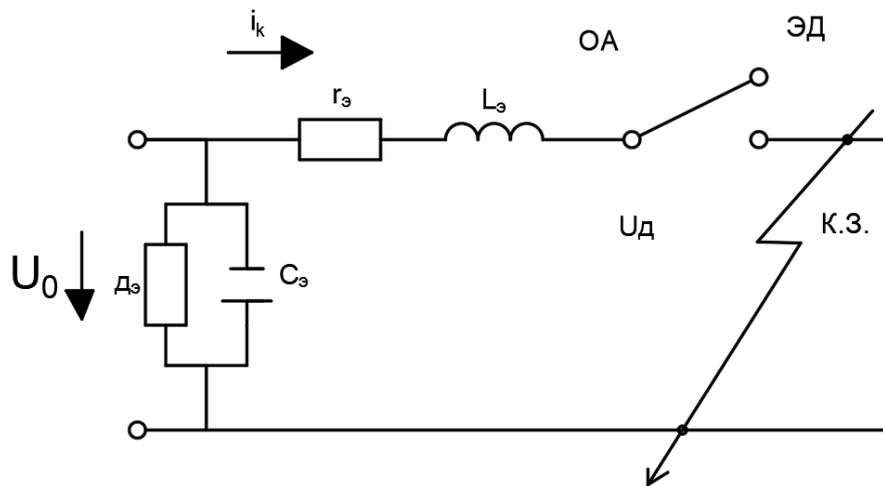


Рис. 27

При переменном синусоидном токе разряд в отключенном аппарате чередуется в следующей последовательности: сначала возникает разряд – кривая $0-1$, $0-3$ это при повышении напряжения и увеличении тока. Далее идет самостоятельный разряд $1-2$ и $3-4$, это соответствует увеличению тока по модулю и уменьшению напряжения. ВАХ расположена в первой четверти – положительно, в третьей четверти – отрицательно. Для несамостоятельного разряда характерна ударная ионизация, для самостоятельного – термическая, представлена динамической ВАХ, не совпадающей со статической (сплошная линия – динамическая) силой тока, при увеличении тока ионизации процессы отстают от деионизации, а при уменьшении – наоборот. На рисунке 26 (справа) представлен график изменения напряжения во времени и области $2-3$ и $4-5$, соответствующие несамостоятельному разряду, эти участки соответствуют возврату напряжения. В ЭАП переменного тока производят коммутацию цепи дугогасителя в момент прохождения тока через естественный 0 , так как в этот момент создаются наиболее приятные условия для ее гашения. Рассмотрим процесс отключения цепи с высокоиндуктивной нагрузкой при к. з., которое произошло за отключением аппарата. Будем рассматривать I_{ϕ} . Высокоиндукционная нагрузка соответствует наиболее тяжелому случаю отключения цепи, так как для таких цепей характерно наличие участка сдвига фаз, поэтому при прохождении тока через 0 напряжения цепи \max , а это в свою очередь определяет высокую скорость восстанавливающегося напряжения (dU_v/dt). Рассмотрим следующую цепь (рис. 27): U – изменяется по гармоническому закону; C_3 – небольшая, тем не менее играет важную роль в переходном процессе отключения образования сборными шинами, линиями, вводами переключения; g_3 – эквивалентная проводимость.

Рассмотрим временную диаграмму изменения токов и направления на контактах отключения аппарата (рис. 28).

При прохождении тока через 0 в точку 0 температура междуугового промежутка резко снижается до $50...70\%$ от температуры дуги при \max значении тока, скорость ионизации при этом падает, в результате чего концентрация носителей заряда в призме столба уменьшается, а сопротивление дугового столба возрастает. При этом восстанавливающаяся прочность увеличивается. $U_{вп}$ характеризуется пробивным напряжением той среды, которая окружает электрические контакты. Момент, соответствующий нулю, восстанавливает прочность, изменяется скачком OA и определяет состояние этого промежутка на момент равенства тока нулю,

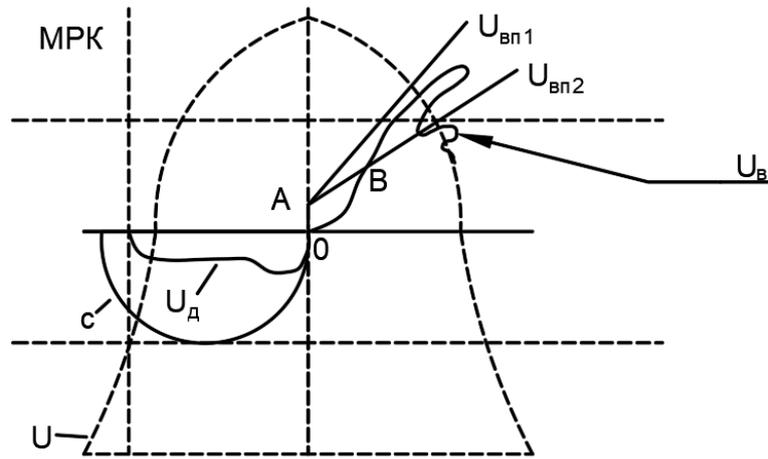


Рис. 28. Диаграмма изменения токов и направления на контактах отключения аппарата:

МПК – момент размыкания контактов

Следовательно, восстановление прочности (dU_B/dt) определяется эффективностью дугогасительного устройства ДУ, а также свойствами окружающей среды электрического контакта. На диаграмме показано два варианта восстановления прочности $U_{вп}$ и $U_{вп2}$, во втором случае скорость ниже. Одновременно с восстановлением прочности на электрических контактах восстанавливается и напряжение U_B , которое определяется постоянными токами цепи. От соотношения скорости восстановления напряжения и восстановления прочности зависит – погаснет электрическая дуга после прохождения тока через O или зажжется снова. При использовании ДУ с $U_{вп}$ электрическая дуга гаснет, так как $U_{вп}$ идет выше кривой U_B , и восстановление напряжения может измениться по варианту как на рисунке.

Во втором случае при использовании ДУ с $U_{вп2}$ в точке В происходит пересечение $U_{вп2}$ и U_B , и дуга зажигается повторно, однако при этом горение такой дуги и дальнейшее гашение облегчаются тем, что электрические контакты уже разошлись на достаточно большое расстояние друг от друга, и обычно в выключении дуга гасится в течение первых двух-трех периодов.

Описанный процесс характерен для выключателей высокого напряжения.

В разъединителях при отключении емкостных токов или намагничивания токов трансформатора (но не токов напряжения и тем более токов к. з.) может возникнуть открытая дуга, свободно горящая на открытом воздухе. Разъединители, как правило, не имеют ДУ, и погасить такую дугу сложно, достигается это только за счет растяжения дуги (несколько метров).

1.6. ОТКЛЮЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ.

МЕТОДЫ ГАШЕНИЯ ДУГИ В ОТКЛЮЧАЮЩИХ АППАРАТАХ

1. ДУ газового дутья.
2. ДУ с узкой щелью.
3. ДУ с разделением дуги на ряд коротких дуг.

Методы гашения дуги в отключающих аппаратах (ОА).

Для облегчения и ускорения гашения дуги переменного тока необходимо, чтобы скорость восстановления прочности в МКП после прохождения тока через него было бы

возможно большей. В ЭАП, предназначенных для отключения тока в нагрузке и тока к. з. (выключатели, плавкие предохранители), это достигается с помощью применения ДУ, которое искусственно ускоряет процессы деионизации в дуговом столбе. Применение ДУ в ОА можно разделить на три группы.

ДУ газового дутья. ДУ газового дутья могут быть выполнены с автодутьем (газогенерирующие ДУ) и с принудительным (импульсные ДУ). Первый вариант применяется в плавких предохранителях при выключениях нагрузки в масляных выключателях. Вторым вариантом применяется в воздушных выключателях.

Газогенерирующие ДУ: электрические контакты размещаются в устройствах, которые окружают возникшую электрическую дугу. Эти устройства могут быть изготовлены либо из твердых диэлектрических материалов (органический стеклофибровинилпласт), либо может быть использовано трансформаторное масло.

За счет энергии возникающей дуги происходит выделение газов из указанных материалов, в камере, где возникает дуга – высокое давление с последующим истечением этих газов, вследствие чего и возникает газовое дутье. Оба этих фактора создают условия для быстрой деионизации дугового столба и последующего гашения дуги. При этом используется энергия самой дуги. Отсюда и название. Интенсивность гашения дуги в газогенераторе ДУ определяется энергией дуги, а, следовательно, значением отключающего тока, чем он больше, тем быстрее гашение дуги. В импульсных ДУ газ подается в зону горения дуги под высоким давлением от внешнего источника (компрессорные станции), следовательно, в этом случае газовое дутье не зависит от значений отключающего тока. В момент расхождения контактов специальными устройствами подаются под высоким давлением импульсы газа (воздуха) в зону горения дуги.

Рассмотрим механизм газового дутья. При больших скоростях газа и его высоком давлении, действующем на дугу, имеет место беспорядочное вихреобразное (турбулентное) движение частиц газа. Эта турбулентность повышает эффективность гашения дуги. Если при ламинарном газовом дутье наблюдается устойчивый исток дуги с рассмотренным выше распределением заряженных частиц и процессами ионизации и деионизации при турбулентном воздействии газового дутья, дуговой ток расходится на ряд каналов и нитей с различной концентрацией заряженных частиц, в результате чего еще более активизируются процессы диффузии, а при низких температурах – процессы рекомбинации, т.е. механизм деионизации. После прохождения тока через ноль, когда интенсивность деионизации падает, концентрация заряженных частиц в столбе быстро выравнивается, и интенсивно активизируется рекомбинирование процессов. В результате чего увеличивается скорость восстановления прочности ($dU_{вп}/dt$), и дуга практически гаснет после первого прохождения тока через ноль. Одним из способов увеличения номинального напряжения установок и допустимых токов к. з. является применение более прогрессивных средств ОА, к таким средам относятся электротехнический газ (элегаз SF₆) – это инертный газ с очень высокими дугогасительными свойствами, практически не опасен, является первым из наиболее тяжелых газов. Такие среды – в элегазовых выключателях высокого напряжения (≥ 110 кВ).

ДУ с узкой щелью. Если дуга горит в канале малого диаметра или узкой щели, образованной стенками из дугостойкого изоляционного материала, то пробивной градиент МКП оказывается значительно выше пробивного градиента открытой дуги. Поэтому при прочих равных условиях дуга в узкой щели гаснет легче, чем открытая дуга. При этом ширина щели или диаметр канала должны быть меньше диаметра открытой дуги. С уменьшением ширины щели пробивной градиент возрастает (рис. 29).

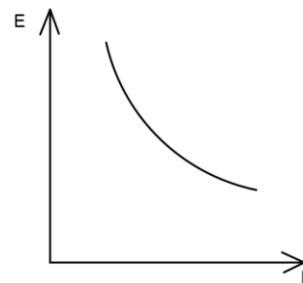


Рис. 29

Наиболее характерными формами дугогасительных камер с узкой щелью являются следующие виды (рис. 30).

Данные камеры изготавливаются из дугостойкого изоляционного материала и состоят из следующих зон: 1 и 2 – зоны наиболее интенсивного охлаждения дуги, 3 – щель, 4 – расширение, благодаря которому электрическая дуга попадает в щель. В первом и втором случаях электрическая дуга гасится только за счет охлаждения при соприкосновении с холодными стенками камер. В третьем случае, кроме соприкосновения с холодными стенками, дуга гасится и за счет ее удлинения (дуга приобретает змеевидный характер).

Процесс деионизации в таких камерах происходит более интенсивно, чем для открытой дуги, но слабее, чем при газовом дутье при прочих равных условиях щелевых камер. Большая длина дуги означает повышение сопротивления дуги и падение напряжения на ней. Большое активное сопротивление дуги облегчает ее гашение за счет:

- 1) уменьшения тока дуги;
- 2) уменьшения сдвига между током дуги и напряжением на ней, тем самым уменьшается скорость восстановления напряжения в МКП dU/dt .

Гашение дуги в узкой щели успешно применяют в ОА переменных и постоянных токов – в автоматах, плавких предохранителях с засыпкой, выключателях магнитного дутья с лабиринтно-щелевой камерой и т.д. То есть такие дугогасительные камера (ДК) применяют в аппаратах низкого напряжения (НН).

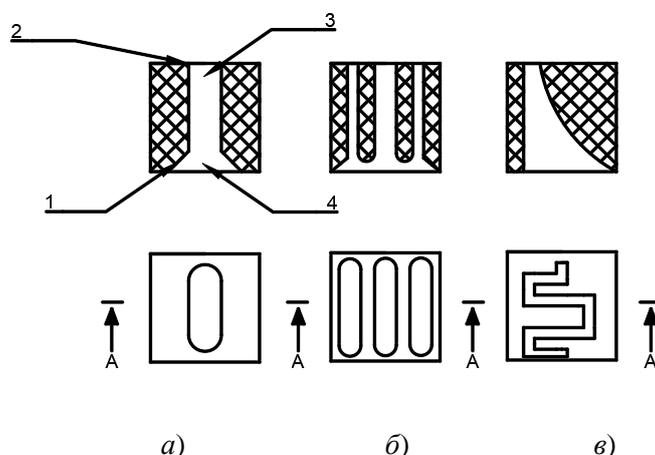


Рис. 30. Дугогасительные камеры:

- а – обычная узкощелевая камера с одной щелью; б – с несколькими щелями;
в – лабиринтно-щелевая камера

Недостатки ДУ с узкой щелью:

- трудности в отключении малых токов, когда интенсивность магнитного дутья уменьшается;
- трудности в обеспечении необходимой изоляции в МКП.

ДУ с разделением дуги на ряд коротких. Впервые применено Доливо-Добровольским, основано на использовании гашения дуги при электродном падении напряжения. Рассмотрим открытую дугу и распределения на ней напряжения электрического поля и распределения потенциала.

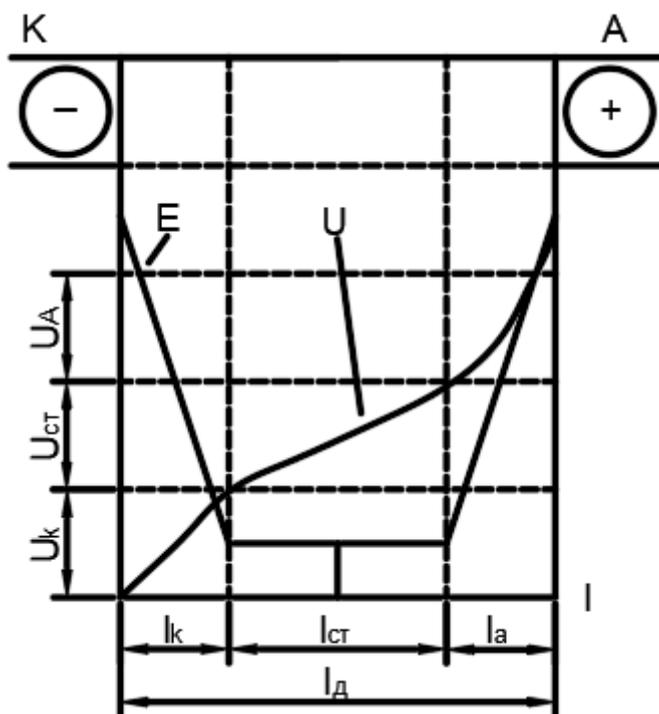


Рис. 31

Распределение напряжения электрического поля – U – характерно наивысшей диаграмме E вблизи катода и анода, обусловлено меньшей концентрацией носителя заряда, чем в дуговом столбе. Распределение напряжения отличается нелинейно, вблизи электродов за счет наличия объемных зарядов, вблизи электродов противоположного знака, а на дуговом столбе из-за неравномерного распределения зарядов разного знака распределяется напряжение разного характера.

Для длинных дуг характерно

$$U_{ст} \gg U_a + U_k = U_э - \text{приэлектродное падение напряжения.}$$

Для коротких

$$U_{ст} < U_э,$$

поэтому если электрическую дугу разделить на ряд коротких, для которых будет справедливо это отношение, то электрическая дуга должна погаснуть. Действие такого гашения реализуется на дугогасительных решетках, которые изготавливаются из пластичных металлов.

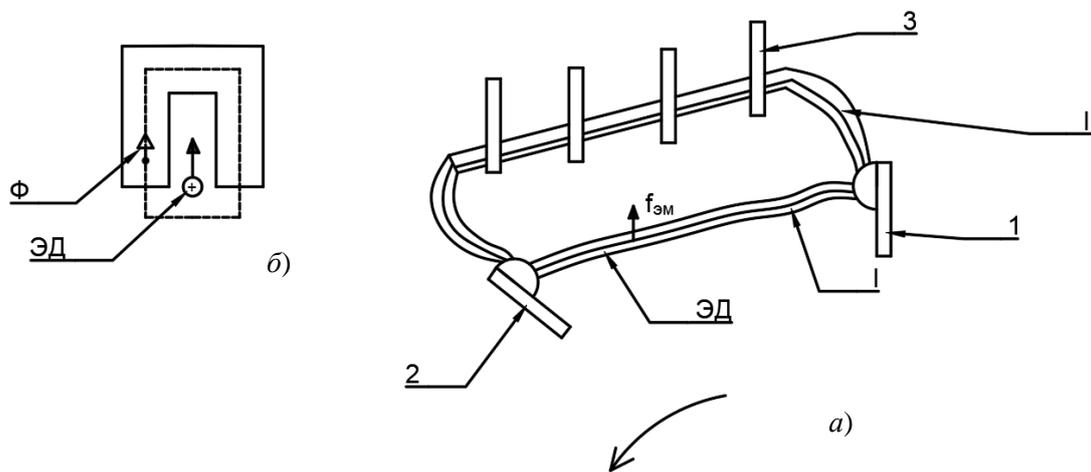


Рис. 32

За счет возникновения электродвижущей силы дуга затягивается.

II – дуга при затягивании на дугогасительную решетку 3 (пластина) (рис. 32).

Пластины покрывают электролитической смесью или изготавливают из меди. В последнем случае должны быть специальные катушки для создания магнитного поля воздействия на дугу.

Дугогасительные решетки применяются в аппаратах постоянного и переменного тока, причем более эффективно во втором случае, это связано с появлением добавочного падения напряжения вблизи электродов при смене полярности, обусловлено разной подвижностью носителей заряда (e и «+»-ионов). Действительно, при изменении знака электродов свободные e гораздо быстрее покидают приэлектродную область, чем «+»-ионы и вблизи нового катода практически не остается ни одного носителя заряда, что резко увеличивает сопротивление этой области (на сотни вольт).

Дугогасительные решетки до 15 кВ в основном применяются в аппаратах НН (автоматы, магнитные пускатели). Ограниченное напряжение связано с возрастающими габаритами камеры.

1.7. ЭЛЕКТРОМАГНИТЫ. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ

1. Электромагниты – конструкционные схемы, принципы действия.
2. Расчет магнитных проводимостей воздушных промежутков.

Конструкционные схемы исполнения электромагнитных механизмов. Электромагнитное устройство (ЭМУ) – такой ЭАП, который создает магнитное поле в заданном объеме с помощью катушек, питаемых электрическим током.

Если в ЭАП, в котором создано магнитное поле, создаются электромагнитные усилия воздействия на подвижные части аппарата, то они совершают определенную работу при движении под воздействием этих сил по заданным траекториям. При этом они преодолевают механические силы сопротивления, определяемые механической характеристикой. Такие устройства, в которых существуют подвижные части, называются электромагнитными механизмами (ЭММ). ЭММ делятся на группы:

1. Без магнитной системы.
2. С магнитной системой.

Под магнитной системой (цепью) понимают совокупность ферромагнитных и неферромагнитных тел и сред, в которой при заданной магнитодвижущей силы (МДС) создается ориентированный магнитный поток.

ЭММ с магнитной силой – электромагниты. На сегодня существует огромное количество разнообразных конструкционных схем электромагнитов и различных способов питания обмоток электромагнитов. Рассмотрим наиболее распространенные варианты электромагнитов постоянных и переменных токов (рис. 33, 34).

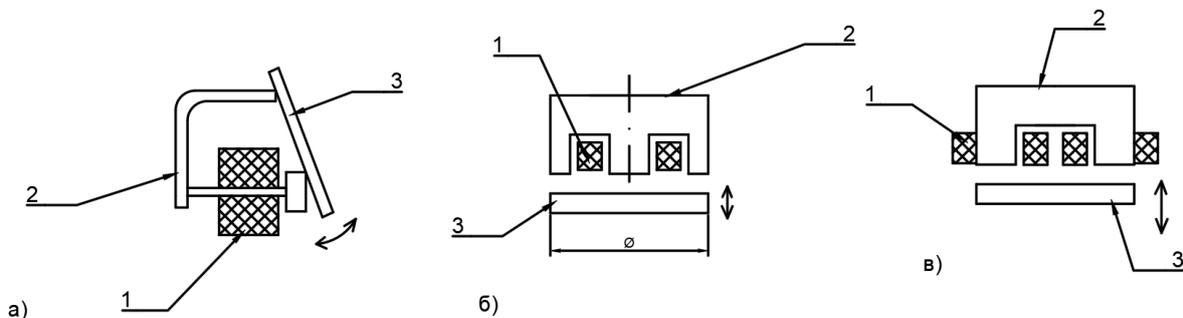


Рис. 33. Электромагниты с постоянным током

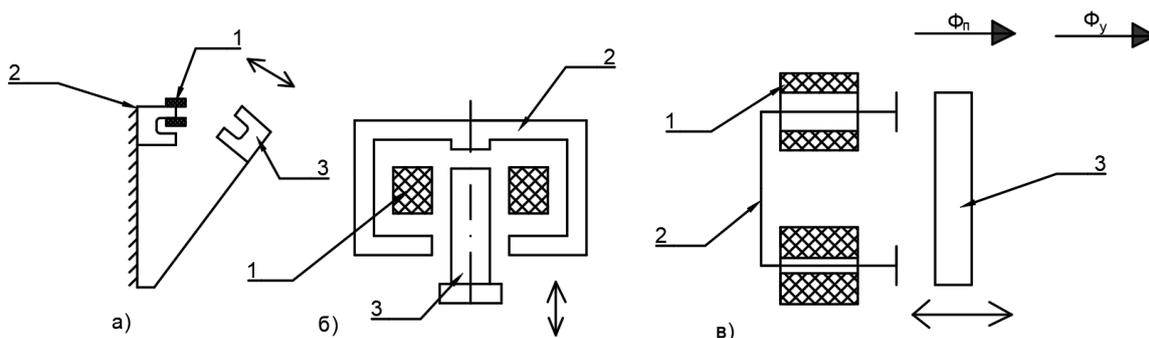


Рис. 34. Электромагниты с переменным током

В каждом варианте электромагнитов можно выделить следующие элементы:

I – обмотка, обтекаемая током (управления). При подаче напряжения на нее создается рабочий магнитный поток, который проходит по магнитному проводу электромагнита, который состоит из подвижной части 2 (именно на ней располагается обмотка управления) и 3 подвижная часть магнитного провода – якорь, стенка – направление движения.

При создании магнитного потока якорь приходит в движение и вместе с ним сопряжения детали (контакты) *I_a*, *II_a* – электромагнит клапанного типа, *I_б*, *I_в*, *II_б* – прямоходовые электромагниты, *II_б* – электромагнит с втягивающимся якорем.

III – поляризованный электромагнит, работающий на постоянном токе. В нем, помимо перечисленных элементов, имеется дополнительная катушка 4 (поляризующая), создающая в воздушном промежутке дополнительный магнитный поток Φ_n . В этом механизме якорь имеет два равнозначных устойчивых положения, а поляризующая катушка постоянного падающего напряжения и подача сигнала на катушку 3 создают Φ_y , который усиливает или ослабляет Φ_n . В этом случае якорь или остается в прежнем положении или меняется на новое.

Таким образом, данный механизм реагирует на направление тока и может работать в импульсном режиме (импульсы подаются на катушку управления). Основные преимущества III: высокое КПД, большая чувствительность, более высокое быстродействие.

Основные понятия и термины. Рассмотрим основные понятия и термины на примере электромагнита клапанного типа (рис. 35).

Электромагнит состоит из двух основных частей – магнитопровода и обмотки (совокупность катушек). В свою очередь магнитопровод состоит из: сердечника, на котором находится обмотка; наконечник 2 служит для улучшения распределения магнитного поля между ярком и сердечником. Сердечник вместе с ярмом 3 – неподвижная часть магнитопровода (ярмо – часть без обмотки), ярко – подвижная часть, которая приходит в движение при обтекании обмотки током и возвращающаяся в исходное состояние под воздействием пружины 5. На ярке расположена напротив наконечника намагниченная прокладка, которая позволяет ярку вернуться в исходное состояние при обесточивании катушки или обмотки и протекании по магнитопроводу остаточного магнитного потока $\Phi_{ост}$, т.е. предотвращает залипание ярка.

Обмотка электромагнита служит для создания заданного ориентированного магнитного потока и состоит из медного провода определенного сечения, каркаса из диэлектрических материалов и выводов 8, которые подключены к источнику постоянного или переменного напряжения. Конструкция электромагнита содержит заданный воздушный зазор, на котором рассчитывается определенный магнитный поток Φ_{δ} , который предназначен для выполнения электромагнитных заданных свойств, направленных для коммутации электрических цепей. И в этом случае контактная система соединена с ярком (подвижные электрические контакты). Катушка создает в сердечнике суммарный магнитный поток Φ_{Σ} , который содержит, помимо магнитного потока – Φ_{δ} , поток рассеивания.

$$\Phi_{\Sigma} = \Phi_{\delta} + \Phi_{\delta}$$

которые замыкаются через воздушные промежутки, но не через воздушный зазор δ .

Таким образом, в конструкции электромагнита различают рабочий воздушный зазор – специальный созданный, и воздушные промежутки, обусловленные конструкцией электромагнита.

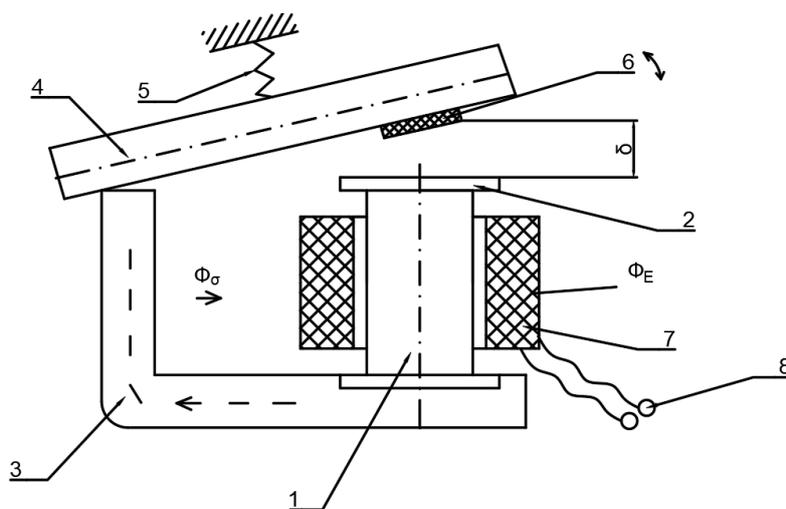


Рис. 35. Электромагнит клапанного типа:

1 – сердечник; 2 – наконечник; 3 – ярмо; 4 – ярко; 5 – возвратная пружина;
6 – намагниченная прокладка; 7 – обмотка электромагнита; 8 – выводы обмотки электромагнита

Кроме обозначенных, в магнитной системе могут быть «паразитные» воздушные зазоры, которые создаются по технологическим соображениям. Их количество необходимо сводить к минимуму.

Основные величины, используемые при расчете магнитных цепей. Используются следующие магнитные величины:

1. МДС F (А);

2. Магнитный поток Φ (Вб);

3. Магнитная индукция B (Тл) – характеризует интенсивность магнитного поля $B = \Phi/S$;

4. Напряженность магнитного поля характеризует падение МДС на единицы длины магнитной цепи H (А/м). H – расчетная величина, характеризующая магнитное поле, созданное макротоками. B – определяется как макроток и микроток, т.е. зависит от свойств среды, где распространены магнитные поля;

5. Абсолютная магнитная проницаемость $\mu_a = \mu_0\mu_r = В/н$ (Генри).

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – постоянная;

$\mu_r = 1$ для немагнитов – относительная.

При расчете магнитных цепей материала: магнит $\mu_r \gg 1$ и не магнит $\mu_r = 1$.

Основные законы магнитных цепей. Для расчета магнитных цепей по аналогии с электрическими вводят законы Кирхгофа, Первый и Второй законы Ома, однако Ом и Кирхгоф не имеют никакого отношения, кроме формального, т.е. их структура для магнитных цепей аналогична структуре для электрических.

Первый закон Кирхгофа:

Алгебраическая сумма магнитных токов в узле цепи равна 0:

$$\sum \Phi_k = 0.$$

Данный закон выражает тот факт, что магнитный поток через замкнутую поверхность равен 0.

При составлении уравнения также задаются положительные и отрицательные напряжения магнитного потока.

Второй закон Кирхгофа для магнитных цепей. Фактически это закон полного тока, адаптированного к магнитным цепям, состоящим из дискретных элементов $\oint Hdl = \Sigma I$.

Циркулирование H по замкнутому контуру в магнитном поле равно алгебраической сумме токов, охватывающих этим контуром.

Направление вектора H определяется по правилу правого винта, который вращается по направлению тока. Dl -элемент контура.

Контур обвода в магнитных цепях выбирается по впадающей с центра линией магнитной цепи центров сечения магнитопровода, в этом случае угол между векторами H и dl равен 0, а косинус – 1.

Магнитная цепь состоит из отдельных участков с определенным значением сечения, в которых напряжение магнитного поля H остается постоянными, тогда интеграл превращается в сумму $\Sigma Hl = \Sigma I$, так как МДС создают катушки с определенным числом витков, а произведение тока в отдельной катушке на число витков и есть отдельный МДС, окончательное выражение Второго закона Кирхгофа $\Sigma Hl = \Sigma I$, $Hl = U_m$ – магнитное напряжение $\Sigma U_m = \Sigma F$.

Закон Ома для магнитной цепи. Рассмотрим участок магнитного провода некоторой длины l и сечения S , на который действует:

$$U_m B = \mu a H;$$

$$BS = \mu a HS;$$

$$BS = \Phi \Phi = \mu a HS = Hl / (1/\mu a) (l/s) = Um/Rm \Phi = Um/Rm;$$

$$Rm = (1/\mu a) (l/s).$$

Магнитная проводимость $\Delta = 1/Rm = \mu = S/l$.

Для ферромагнитных материалов, у которых μa нелинейно зависит от H , закон Ома имеет ограниченное применение. Он справедлив только для линейной части. Для немагнитных материалов закон Ома справедлив всегда.

Индуктивность катушки электромагнита. Индуктивность катушки – коэффициент пропорциональности

$$\psi = LY; \quad L = \psi/Y, \quad (36)$$

где ψ – поток сцепления; L – выражает индукционные свойства катушки, которые зависят от геометрии контура, сечения провода и т.д.

$$\psi = \Phi_1 + \Phi_2 + \dots + \Phi_w.$$

Если магнитопровод катушки не замкнут, т.е. магнитное сопротивление достигает больших значений, то в этом случае магнитные потоки Φ_1 , Φ_2 и т.д. не равны из-за наличия потоков рассеивания, при замкнутом же магнитопроводе (якорь притянут к сердечнику) $\psi = W\Phi$, то

$$L = W\Phi/Y = (W^2) \Phi/Y = (W^2) \Phi/F = (W^2)/Rm = (W^2) \Delta, \quad U_m = H_b = F. \quad (37)$$

Индуктивность при притяннутом якоре, т.е. при отсутствии воздушного зазора, когда проводимость достигает максимума, характеризуется максимальным значением, и наоборот, когда R_m – максимальная, то и индуктивность катушки электромагнита – минимальное значение. Это справедливо и для насыщенного магнитопровода.

Магнитная проводимость воздушных зазоров. При расчете электромагнита необходимо знать значение магнитного сопротивления как воздушных зазоров, так и зазоров с немагнитным материалом, так как $\mu p = 1$, то расчет этих значений не вызывает особых трудностей. Электромагниты характеризуются одинаковым значением магнитного потенциала, т.е. являются эквипотенциальными.

Между полюсами в идеальном случае возникает однородное магнитное поле, т.е. когда вектор B или $H = \text{const}$. Однако в реальных электромагнитах такие условия трудно создать, так как магнитный поток, выходящий из полюса при достаточно большом значении δ , имеет два состояния (рис. 36).

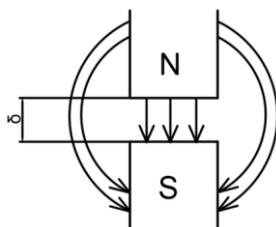


Рис. 36. Магнитный поток, выходящий из полюса:

1 – выходящий из полюсов электромагнитный основной рабочий поток; 2 – краевой магнитный поток

Чем больше δ и меньше корень из S , тем больше поток Φ , и в этом случае увеличивается магнитная проводимость. Однородное магнитное поле можно создать, если выполняются условия $a, b > \delta$, как минимум в 20 раз либо $\Theta > \delta$, и тогда $R_s = (1/\mu a) (l/s)$; существует ряд формул и аналитических выражений, которые определяются магнитным сопротивлением таких малых воздушных зазоров, если же условия не выполняются, то краевые магнитные потоки могут достигать 50% от основного рабочего потока, в этом случае для расчета магнитных проводимостей воздушных промежутков используют два метода:

- 1) метод наиболее вероятных путей магнитного поля или разбивки поля на геометрически правильные объемы;
- 2) метод расчета или определения картины магнитного поля (построение магнитного поля).

Первый метод используется при инженерных расчетах.

Второй – наиболее трудоемкий – используется при расчете магнитных систем наиболее ответственных электромагнитных механизмов.

Магнитные материалы. Для изготовления магнитопроводов электромагнита применяются магнитные материалы: феросплавы (на основе железа) и фериты (с помощью металлургии и представляющие собой смесь железа, никеля, свинца, цинка и т.д.). Среди феросплавов выделяют электротехнические стали (стали с большим содержанием S : от 0,5 до 4,8%) и пермаллой (сплав железа с никелем). Основное их достоинство – большое сопротивление токам и высокие магнитные свойства.

Основные требования к магнитным материалам в электромагните:

1. Высокая магнитная проницаемость $\mu_p \gg 1$, значит магнитное сопротивление этих материалов имеет низкое значение, следовательно, малые габариты обмоток, создающих МДС, и невысокая их температура.
2. Высокое значение магнитной индукции насыщения B_s , что позволяет создавать большое тяговое усилие в электромагните.
3. Малое значение коэрцитивной силы H_p , что предотвращает залипание якоря в электромагните.
4. Динамическая петля гистерезиса должна иметь малую площадь, что уменьшает потери в магнитном проводе на перемагничивании.
5. Должны иметь стабильные магнитные свойства, т.е. не изменяются.

1.7.1. Сила тяги в электромагнитах

1. Общие сведения по расчету магнитных цепей электромагнита.
2. Тяговые силы в электромагните.
3. Динамика работы электромагнита.

При расчете таких магнитных систем в основном решаются две задачи: прямая и обратная, в зависимости от значений воздушного зазора. При решении прямой задачи необходимо при известном магнитном потоке Φ в сечении магнитного провода рассчитать МДС для его

создания. При решении обратной задачи по известным значениям МДС рассчитывается магнитный поток Φ . Кроме магнитного потока и МДС, рассчитывается поток сцепления ψ . Таким образом, знания магнитного потока, потока сцепления, МДС при различных значениях δ позволяют рассчитать тяговые усилия в рабочем воздушном зазоре и получить тяговую характеристику электромагнита.

Для расчета магнитных цепей используются два метода:

1. Полевые методы, основаны на расчете картины магнитного поля, и такие задачи определяются большой трудоемкостью; применяются для наиболее ответственных электромагнитов.
2. Метод, основанный на решении по расчету цепей (цеповые методы)

При таком методе магнитная цепь рассматривается в виде схемы замещения (СХ) сосредоточенными параметрами. В ней источники и приемники как электроконтакты в электрической цепи, но с параметрами магнитной цепи (магнитным сопротивлением и электрической проводимостью, источником МДС). Составив СХ замещения, производится ее расчет.

Сила тяги в электромагните постоянного тока. Тяговые усилия в электромагните постоянного тока рассчитываются с помощью формулы, полученной из рассмотренного энергетического баланса и имеет вид

$$P_{эм} = (-1/2) ((F\delta) \cdot 2) d \lambda \delta / d \delta, \quad (38)$$

где данная формула соответствует первому воздушному зазору в магнитной системе; $F\delta$ – МДС, приходящиеся на рабочий воздушный зазор; $d \lambda \delta$ – первая производная проводимости воздушного зазора.

Знак «-» указывает на разные знаки тягового усилия, усиливается $P_{эм}$ – δ уменьшается.

Из данной формулы можно получить формулу Максвелла, которая характерна или применима к однородным магнитным полям при максимальном значении δ . В этом случае

$$\Delta = \mu_0 (S/\delta); \quad (39)$$

$$P_{эм} = 1/2 (\Phi\delta) \cdot 2 \delta / \mu_0 S \delta = 1/2 (\Phi\delta) \cdot 2 \cdot 1/\mu_0 S = 1/2 (B\delta) \cdot 2 S/\mu_0.$$

Из промежуточных выводов следует, что $P_{эм} \sim 1/\delta^2$; $\Phi\delta \sim 1/\delta$, таким образом, в электромагните постоянного тока тяговые усилия обратно пропорциональны значению воздушного зазора; магнитный поток пропорционален обратной величине δ , а ток в обмотке электромагнита постоянного тока не зависит от δ , а определяется лишь сопротивлением Y :

$$P_{эм} = f(S), \quad I = \text{const.}$$

Статическая тяговая характеристика имеет гиперболический вид (рис. 37).

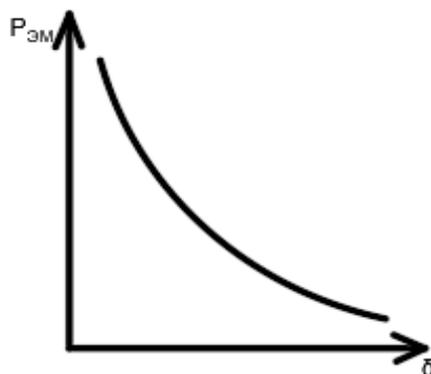


Рис. 37

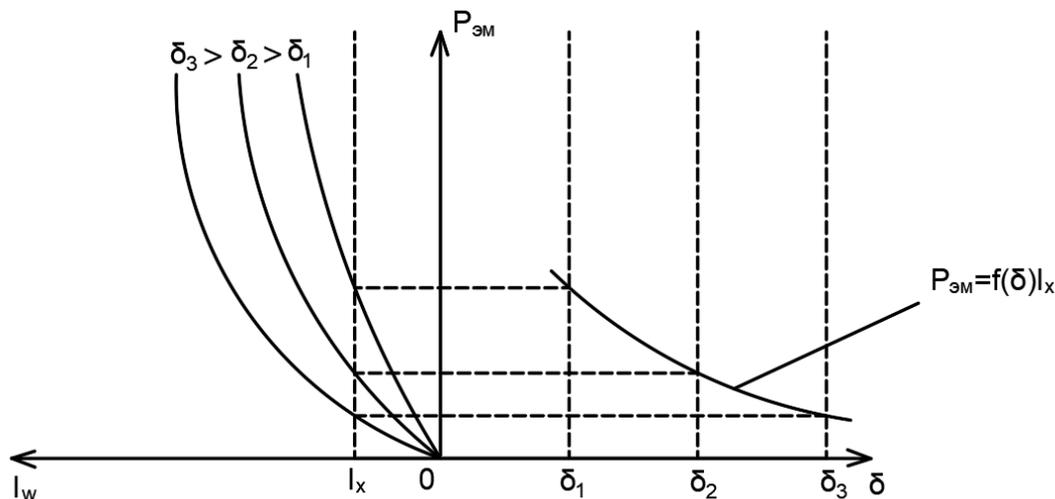


Рис. 38

Данную характеристику экспериментально получают с помощью нагрузочной характеристики $P_{эм} = f(I)$ или $f(Iw)$.

Данные характеристики снимают при обратном значении δ . При заданном значении тока I строят тяговую характеристику (рис. 38).

Тяговые характеристики могут значительно видоизмениться в зависимости от типа магнитной системы (клапанного, прямоходовые и т.д.). Изменяя конструкцию магнитной системы можно подобрать соответствующий электромагнит, который будет соответствовать концентрации, т.е. будет согласован с механической характеристикой ЭАП, где применяется электромагнит, $P_m = f(\delta)$, P_m – все силы, которые имеют неэлектромагнитное происхождение (сила трения и т.д.)

Сила тяги в электромагните переменного тока. При подключении обмотки электромагнита к сети переменного напряжения в обмотке возникает трансформаторное ЭДС, которое плавно уравнивается.

Напряжение сети

$$U_c = E_{тр} = U_1 U U \Phi_m B_w F, \quad (40)$$

$\Phi_m = U_c / U_1 U U \Phi_w$, т.е. магнитный поток в магнитопроводе электромагнита переменного тока при отсутствии потоков рассеяния $\Phi_\delta = 0$ не зависит от значений воздушного зазора δ , в действительности при магнитной системе Φ_δ не равно 0 (рис. 39).

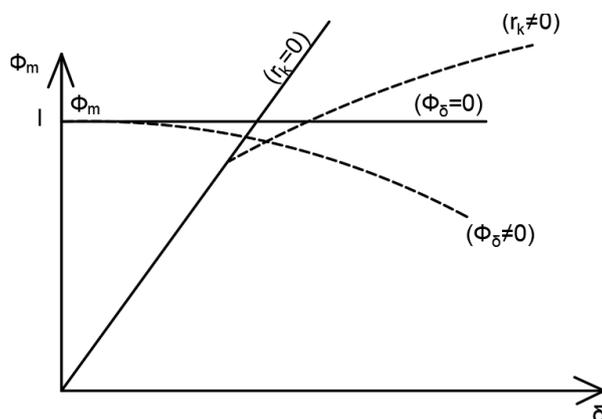


Рис. 39

Рассмотрим зависимость тока от δ :

$$I = U/X_{обм} = U/\omega L = U/\omega w^2 \lambda; \quad (41)$$

$$I = U/X_{обм} = U/\omega L = U/\omega w^2 \lambda;$$

$$I = Uc/\omega w \cdot 2 = \delta/\mu_0 S = U_0 \delta/\omega w^2 \mu_0 S = kI\delta.$$

Следовательно, ток в обмотке пропорционален δ , значит, в первый момент включения электромагнита в обмотке возникает пусковой ток, который в 15 раз превосходит номинальный ток обмотки, поэтому любые задержки при движении якоря при срабатывании могут способствовать появлению большого тока в обмотке и выходу ее из строя.

Проанализируем зависимость тягового усилия в электромагните переменного тока при изменении магнитного потока по гармоническому закону.

$$P_{эм} t = 1/2(\Phi t)^2 \cdot 1/\mu_0 S + 1/2 \cdot 1/\mu_0 S (\Phi_m)^2 \sin^2(\omega t) = 1/2 (\Phi_m)^2/\mu_0 S;$$

$$P_{эм} t = 1/2(\Phi_m)^2/\mu_0 S(1 - \cos 2\omega t).$$

Следовательно, тяговые усилия в электромагните переменного тока содержат как постоянное значение, так и переменную составляющую, которая изменяется с удвоенной частотой.

Тяговое усилие в электромагните переменного тока характеризует среднее значение этого усилия за период, т.е. постоянная составляющая, и при сравнении ее с электромагнитом постоянного тока при $\Phi_m = \Phi$ данное усилие оказывается в 2 раза меньше тягового усилия электромагнита постоянного тока (рис. 40).

Из-за наличия переменной составляющей мгновенное тяговое усилие изменяется от 0 до удвоенного значения постоянной составляющей. Такое изменение вызывает специфический шум и вибрации в магнитопроводе электромагнита. Что при наличии контактной системы вызывает повышенный износ контактов. Для уменьшения этого нежелательного явления в однофазном электромагните применяют короткозамкнутые демпферные витки, которые охватывают часть полюса (рис. 40).

Наиболее успешное гашение вибраций происходит, если короткозамкнутый виток охватывает $2/3$ площади полюса.

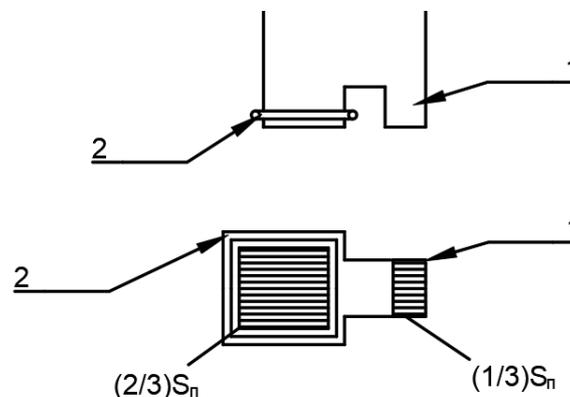


Рис. 40. Однофазный электромагнит:

1 – полюс электромагнита; 2 – короткозамкнутый виток

Сравнение тяговых характеристик элементов постоянного и переменного тока.

При равенстве магнитных потоков у электромагнита (эл/м) постоянного тока и амплитудных значений магнитных потоков переменного тока при одинаковых тяговых характеристиках работы воздушных зазоров сила тяги у эл/м постоянного тока выше в 2 раза.

Недостатком эл/м переменного тока является наличие вибрации якоря, что приводит к более высокому износу электрических контактов в соответствии ЭАП, а также уменьшению тяговых характеристик работы магнитопровода системы.

Тяговая сила у эл/м переменного тока характерно отличается более пологим характером, что способствует лучшему согласованию тяговых механических характеристик.

У эл/м переменного тока начальное значение тока (пусковой ток) \gg номинального тока обмотки в резисторе, из-за чего в начальный момент срабатывания эл/м в нем развивается большое тяговое усилие (больше, чем у эл/м постоянного тока).

Поэтому эл/м переменного тока более рационально использовать при больших значениях работы воздушных зазоров.

Динамика эл/м постоянного тока. Весь процесс работы электромагнита можно разбить на три стадии после подачи напряжения на его обмотки (рис. 41):

- 1) стадия срабатывания (I);
- 2) включенное состояние эл/м (II);
- 3) стадия возврата в исходное положение (III).

В указанной стадии изменение тока в обмотке находят с помощью временных диаграмм.

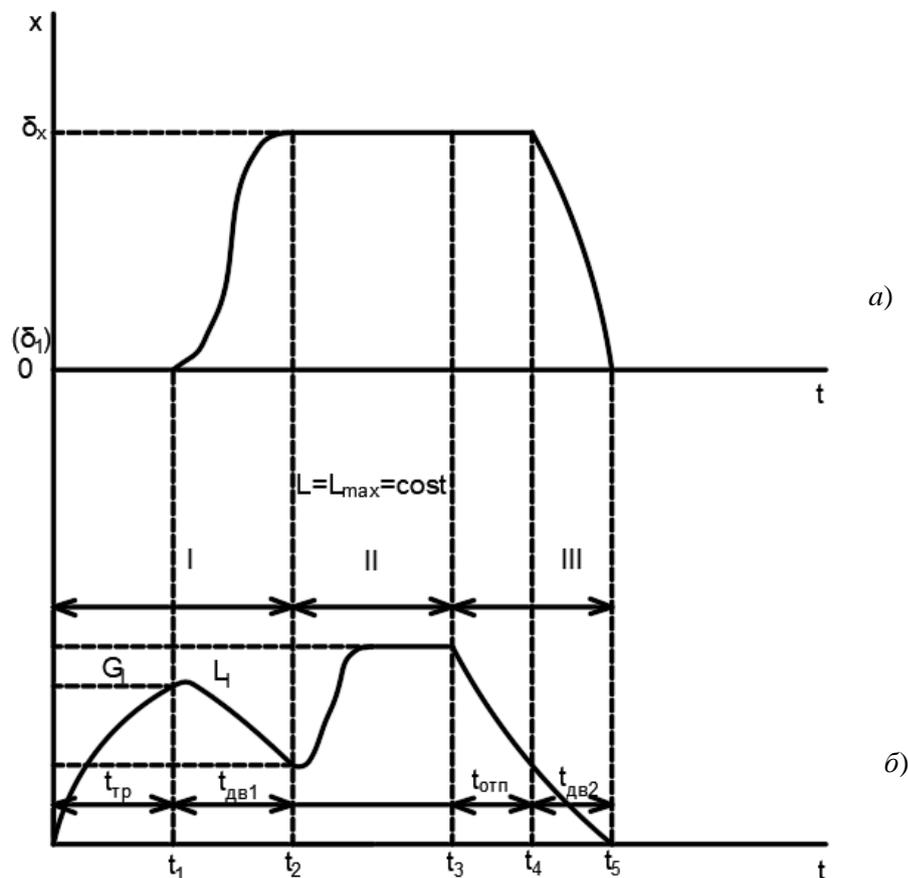


Рис. 41

Пусть в момент времени $t = 0$ на обмотку эл/м подано постоянное напряжение U_0 . Согласно 1-му закону коммутации ток в индуктивном поле не может изменяться скачком и нарастает с определенной скоростью. На отрезке времени $(0 - t_1)$ индуктивность катушки постоянна, а поле минимально своим значением, так как это соответствует максимальному значению работающего воздушного зазора (max магнитное сопротивление). С ростом тока растет МДС катушки \Rightarrow магнитный поток, воздействующий на якорь эл/м.

Уравнения электрической составляющей будут иметь вид:

$$U_0 - iR + L \frac{di}{dt}; \quad L_1 = \text{const}; \quad i = I_{уст}(1 - e^{\frac{-t}{T}}). \quad (42)$$

В момент времени t_1 электромагнитная сила уравновешивания начнет превышать противодействующую силу – якорь приходит в движение в момент времени t_1 , значение тока $i - I_{тр}$ – ток трогания. Из уравнения электрической составляющей можно получить изменения тока на отрезке $(0 - t_1)$, где $I_{уст}$ – устанавливает значение тока; $I_{уст} = \frac{U_0}{R} T$ – постоянная времени.

Из полученного уравнения изменения тока во времени можно определить время трогания эл/м $t = t_{тр}$:

$$t_{тр} = Tl \frac{I_{уст}}{I_{уст} - I_{тр}} = Tl \text{к.з.}; \quad (43)$$

$$\text{к. з.} = \frac{I_{уст}}{I_{тр}}.$$

После момента времени t_1 якорь приходит в движение на этом отрезке времени $(t_1 - t_2)$, σ уменьшается, индуктивность катушки увеличивается, так как растет магнитная проводимость, а значение тока уменьшается.

Из сравнения уравнений эл. сост. при движении якоря и на отрезке времени $(0 - t_1)$ видно, что при равенстве первых частей напряжение меньше на $i \frac{dLl}{dt}$, поэтому при уменьшении напряжения за счет изменения индуктивности ток при движении якоря уменьшается.

Чтобы определить отрезок времени $(t_1 - t_2)$, т.е. время движения якоря, необходимо 2-е уравнение электрического состояния дополнить уравнением динамики якоря эл/м

$$m \frac{d^2 \sigma^2}{dt^2} = P_{эм} - P_{тр}. \quad (44)$$

На практике можно использовать следующую формулу:

$$t_{дв1} = \sqrt{\frac{2m(\sigma_0 - \sigma_k)}{(P_{эм} - P_{тр})_{ср}}}, \quad (45)$$

где m – масса движущихся частей; σ_0 – начальное значение воздушного зазора.

Динамика эл/м переменного тока.

Отличительные моменты:

1) эл/м переменного тока находятся под воздействием синусоидального изменяющегося напряжения;

2) в эл/м переменного тока наибольшее значение магнитного потока, следовательно, и тяговой силы будет иметь место в начале включения обмотки. За счет этого обеспечивается такое время трогания, и не надо применять специальных мер для ускорения движения якоря.

2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ УПРАВЛЕНИЯ

2.1. КОНТАКТОРЫ И МАГНИТНЫЕ ПУСКАТЕЛИ

1. Контакторы и магнитные пускатели (МП). Основные сведения.
2. Контакторы.
3. МП.
4. Выбор контакторов и МП.

Назначение контакторов и МП. Основные конструкционные особенности. Для управления электроприводом и технологическими процессами служат аппараты управления, к которым относятся контакторы, МП и реле.

Контактор – ЭАП двухпозиционный, с самовозвратом и электромагнитным приводом. Данный аппарат имеет два установочных положения при коммутации, которой соответствует «вкл» и «откл». Самовозврат в исходное положение осуществляется с помощью либо возвратной пружины, либо под силой тяжести возвратных частей. Они относятся к аппаратам НН. Хотя есть и на 3, и на 6 кВ.

Данные аппараты применяются для управления электродвигателями как постоянного, так и переменных токов. На переменный ток – трехполюсные, на постоянный – один и двухполюсные. Коммутацию они производят в нормальных режимах и не защищают объект управления от токов перегрузки и от токов к. з. Эти функции возлагаются на другие аппараты: плавкие предохранители, автоматы.

МП – разновидность контакторов, которые служат для управления работы АД. Он изготавливается трехполюсный (и пятиполюсный).

МП – простейший аппарат дистанционного действия, в который могут быть вмонтированы кнопочная станция и аппараты защиты от токов перегрузки недопустимой длительности. В качестве таких аппаратов защиты используют реле. МП также не защищают АД от токов к. з., но защищают от токов перегрузки (в зависимости от маркировки и от снижения или потери до 60...65% от $U_{ном}$ напряжения).

Термическая и электродинамическая стойкость контакторов не нормируется.

Особенности контактной системы контакторов и МП.

1. Контактная система обладает высокой механической и электроизносостойкостью, невысокой коммутационной способностью, т.е. отношение тока коммутации I_{max} к $I_{ном} \leq 10$.
2. Контактная система рассчитана на проведение $I_{ном}$ в предназначенном режиме (повторный и т.д.).
3. Принимаются меры для уменьшения вибрации при срабатывании (наличие контактных пружин).

Категории основного применения контакторов и МП. Условия работы контакторов и МП определяются условиями работы объекта управления, их характеристиками и постоянной коммутируемой цепью.

В зависимости от этих условий ГОСТом определяются категории основного применения контакторов в зависимости от $U_{ном}$ и значения отключения тока. Ток для контакторов переменного тока имеет четыре категории (АС – 1, ..., АС – 4) и пять категорий по постоянному

(ДС – 1, ..., ДС – 5). Для контакторов переменного тока, кроме $U_{\text{ном}}$ и тока отключения, категория применения характеризуется $\cos\phi$, чем он меньше, тем тяжелее условия работы, а для цепей постоянного тока, чем больше постоянная времени, тем тяжелее условия работы контакторов.

Категории контакторов по переменному току:

АС – 1: относится к коммутации активной нагрузки (наиболее легкие условия работы контакторов).

АС – 2: служат для управления АД с фазным ротором.

АС – 3: для управления АД и с короткозамкнутым ротором, когда двигатель во вращательном состоянии (откл).

АС – 4: для откл. либо неподвижного, либо слабовращающегося двигателей, для торможения противовкл.

Контакторы постоянного тока:

ДС – 1: наиболее легкие условия работы – коммутация малоиндукционной цепи.

ДС – 2; ДС – 3: служат для управления двигателем постоянного тока с параллельным возбуждением.

ДС – 4; ДС – 5: для управления двигателями с последовательным возбуждением.

МП рассчитаны для работы категории АС – 3.

При нечастых вкл. используется категория применения, в которой ток может быть повышен в 1,5 раза.

Основные технические данные контакторов и МП:

- 1) $I_{\text{ном}}$;
- 2) $I_{\text{отк}}$ – предельный ток откл.;
- 3) $U_{\text{ном}}$;
- 4) механическая и электрическая износостойкость;
- 5) количество срабатываний в единицу времени (в час);
- 6) собственное время вкл. и откл.

Под номинальным током понимают продолжительный рабочий ток, пропускаемый через контактную систему в течение 8 ч без откл., и при этом температура контактов и сопряженных частей должна быть \leq допустимой. Значение токов для контакторов или МП выбирают по пятому нормальному ряду чисел, т.е. с коэффициентом увеличения $\sqrt[5]{10} : 10, 16, 25, 40, 63$ и т.д.

Предельный ток отключения – это наибольший амплитудный ток, который может отключать контактор или МП без повреждений, препятствующих его работе.

$U_{\text{ном}}$ – предельное значение напряжения, по которому рассчитан аппарат.

Для переменного тока: 36, 127, 220, 380, 660 В.

Для постоянного тока: 24, 48, 110, 220, 440, 750 В.

Механическая износостойкость определяется числом циклов коммутации без тока $\sim 10 \dots 20 \cdot 10^6$ циклов. Электрическая – $\sim 2 \dots 3 \cdot 10^6$. Количество срабатываний исчисляются сотнями раз и тысячами раз в час.

Собственное время вкл. контакторов и МП аналогично, как и при срабатывании э/м, складывается из времени нарастания магнитного тока или тока до момента трогания + время движения якоря $t_{\text{дв}}$, и для контакторов постоянного тока $\sim 0,1 \dots 0,4$ с. Время откл. практически

совпадает со временем спада магнитного потока или тока до значения отпущения. Временем $t_{дв}$ пренебрегают.

Для постоянного тока $\sim 0,07 \dots 0,25$ с.

Основные узлы контактора (МП):

- 1) контактная система;
- 2) дугогасительное устройство;
- 3) электромагнит (привод);
- 4) система вспомогательных контактов.

При подаче напряжения на обмотки электромагнитного контактора или МП возникает магнитный поток в магнитопроводе, электромагнит срабатывает, и при выборе хода якоря (определяются значения воздушного зазора между наконечником сердечника и якоря) происходит замыкание электрических контактов. При откл. дуга гасится в ДУ. Вспомогательные контакты – для согласования работы контактора или МП с другими ЭАП.

Схема включения контакторов. При подаче напряжения на катушку электромагнитного привода происходит срабатывание контактора и удержание его в замкнутом состоянии. Таким образом, электромагнит в контакторе выполняет две функции: 1) приводит в движение якоря и 2) удерживает его и подвижные контакты в замкнутом состоянии.

В контакторах не применяются удерживающие механизмы (зашелки), которые присутствуют в автоматических воздушных выключателях.

Рассмотрим схему вкл. контактора (рис. 42).

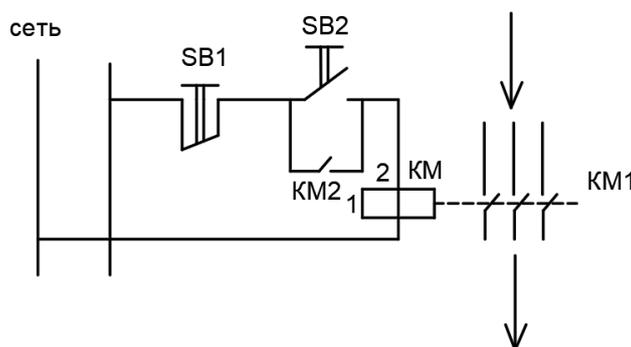


Рис. 42. Схема включения контактора:

KM-МП или контактор; KM 1 – главные контакты;  – обмотка электромагнитного привода контактора; KM 2 – вспомогательный контакт контактора

При нажатии на кнопку $SB2$ подается напряжение на KM, и контактор срабатывает, замыкая силовые контакты KM 1, одновременно срабатывает KM 2 (блок-контакты). Поэтому после отпущения кнопки $SB2$ цепь замкнута, так как контакты KM 2 шунтируют кнопку пуск. Цепь должна быть рассчитана при подаче переменного напряжения на KM. Элементы схемы должны быть рассчитаны на пропускание пускового тока.

Рассмотрим цепь – цепь управления работой контактора. Поэтому характеризуется низкими значениями $I_{ном} = 2$ А. Чтобы отключить контактор и силовую цепь, нажимают на $SB1$ (стоп), при этом катушка обесточивается. Аналогично – при снижении сетевого напряжения (меньше $60 \dots 65\%$ от $U_{ном}$).

Сеть может быть сетью постоянного и переменного тока. Цепь управления изображается тонкими линиями, в отличие от силовой.

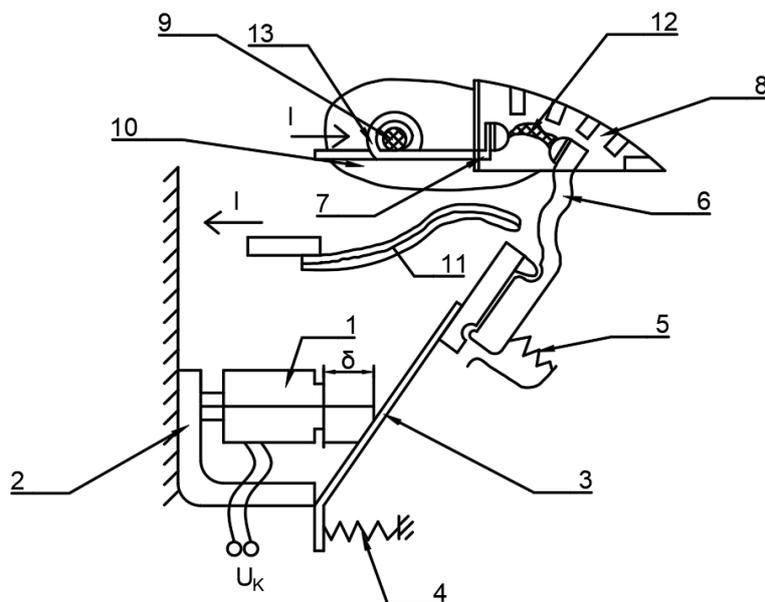


Рис. 43. Контактор КПВ-600:

1 – катушка, обмотка электромагнита; 2 – магнитный привод (ярмо); 3 – якорь; 4, 5 – пружины; 6 – подвижный контакт; 7 – неподвижный контакт; 8 – ДУ; 9 – сердечник электромагнита магнитного дутья; 10 – металлические пластины, которые служат полюсами электромагнита; 11 – гибкая связь; 12 – электрическая дуга; 13 – обмотка электромагнита магнитного дутья

Конструктивные схемы контакторов. Рассмотрим схему контакторов постоянного тока на примере контактора КПВ-600 (рис. 43).

Представленная схема относится к контакторам рычажно-поворотного типа. На рисунке изображен момент сразу после отключения, когда между контактами возникла электрическая дуга.

Рассмотрим основные стадии работы контактора КПВ-600. После подачи напряжения на обмотку электромагнита контактора происходит его срабатывание, т.е. якорь приходит в движение. После момента соприкосновения подвижных и неподвижных контактов, подвижные перекатываются по неподвижным, в результате разрушается пленка на контактах, а новое положение указанных контактов относительно друг друга после перематывания дает новые контактные площадки, которые не подвергались воздействию электрической дуги в момент замыкания. Все указанные факторы приводят к значительному уменьшению переходного сопротивления контактов. Предварительное контактное нажатие со стороны контактной пружины устраняет вибрацию контактов при срабатывании и способствует уменьшению переходного сопротивления R_k . Электрические контакты соприкасаются еще до того момента, как якорь будет полностью притянут к наконечнику, т.е. после соприкосновения якорь продолжит движение, происходит выпад провала контактов.

Провал гарантирует надежное срабатывание электрических контактов за счет их механического электрического износа, а также эрозионного воздействия электрической дуги. Контактные накладки изготавливают из специальных материалов (металлокерамика) или серебра. Гибкая связь обеспечивает надежное прохождение электрического тока при движении якоря.

Во включенном состоянии контакты характеризуются определенным значением расстояния контакта от 1 до 20 мм. Его значение выбирается: чрезмерное значение провала приводит к увеличению МДС электромагнита, т.е. увеличению его габаритов и перерасходу активных материалов за счет увеличения магнитного сопротивления. Малое значение провала может не обеспечить успешного гашения дуги после отключения. Поэтому его выбирают из оптимизации указанных факторов.

Для перемещения возникающей электрической дуги и после отключения системы магнитного дутья (см. рис. 43) используется система с последовательной катушкой магнитного дутья, так как она последовательно включается с электроконтактами и через нее проходит ток нагрузки.

Возникшее магнитное поле от указанной катушки через металлические пластины 10 подводится в зону горения дуги.

Подобная конструкция используется и в контакторах переменного тока, причем такая конструкция с одним разрывом на полюс используется обычно для тяжелых условий работы контакторов – АС – 4, АС – 5 ~ ДС – 4, ДС – 5. В случае переменного тока на полюсах электромагнита устанавливаются демпферные витки. Это отличительный признак электромагнита переменного тока. Кроме рассмотренной конструкции, часто используются прямоходовые электромагнитные системы с мостиковыми контактами.

Контактные системы и ДУ. В контакторах используются системы рычажно-поворотного типа и мостиковые контакты. Во втором случае на полюс получают два разрыва в электрической цепи, тем самым увеличивается суммарная длина электрической дуги. В этом случае отличаются условия успешного гашения.

В рычажно-поворотной системе, хотя и имеет один разрыв на полюс, – электромагнит создает тяговую силу лишь в одном разрыве, поэтому используется электромагнит с меньшей МДС, а если с равной МДС по отношению к мостиковому контакту, то в среднем увеличивается тяговое усилие, следовательно, сила контактного нажатия.

Возникающую дугу в плоских предохранителях гасят с помощью ДУ, различают ДУ с автогазовым дутьем, чисто в сжиженном канале, образованным плавкой вставкой в наполнителе. При относительно малоимпульсных цепей ДУ не применяются. Присущее перегорание плавкой вставки состоит из трех стадий:

- нагрева ее до температуры плавления;
- плавления;
- гашения электрической дуги.

Различают три времени:

- время нагрева;
- время плавления;
- время гашения.

При наиболее длительном времени нагрева он и определит время срабатывания плавкого предохранителя. Основной характеристикой плавкой вставки и предохранителя является время тока или защитная характеристика.

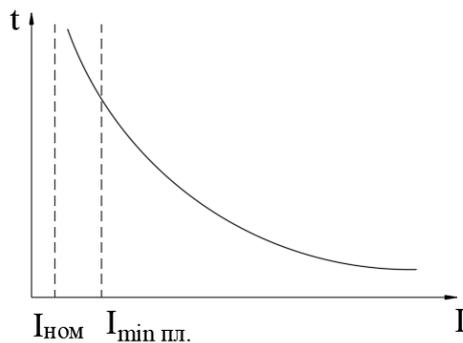


Рис. 44

На этой характеристике различают два значения тока. Под *I минимальной плавки* понимают такое максимальное значение тока, при котором плавка вставка должна перегореть за быстрый отрезок времени. На практике она должна перегореть за 1...2 часа.

Наименьший ток плавкой вставки выбирают в 1,3–1,5 раза меньше, чем *I минимальной плавки*, это надо для исключения ложного срабатывания предохранителя, которое возможно по следующим причинам:

- 1) окисление плавкой вставки (изменяющимся положением защитной характеристики);
- 2) за счет окисления ножей предохранителя;
- 3) за счет тока деформации плавкой вставки;
- 4) за счет выгорания предохранителя.

Температура плавления меди равна 1080 °С, а серебра – 310 °С, что при рабочих токах немного меньше, чем *I минимальной плавки*.

Если использовать легкоплавные материалы, то в этом случае температура плавких предохранителей в 3–4 раза меньше, словно перед срабатыванием предохранитель не подвергается столь высокому тепловоздействию, но из-за низких проводимостей свойство плавкой вставки оказывается массивным. При перегорании плавкой вставки возникает высокая концентрация паров материалов плавкой вставки, что затмевает процесс гашения дуги.

Для улучшения температуры перед срабатыванием плавких вставок из серебра и меди используют металлургический эффект, который заключается в следующем:

В средней части нити из серебра или меди плавкой вставки наплавляют шарик либо из олова, либо из сплава кадмия с оловом, которые имеют гораздо низкую температуру плавления – меньшую или равную 300 °С.

При прохождении токов опасных значений через такую нить легкоплавный материал расплавится и диффундирует в глубь металла плавкой вставки, возникает эвтектика с температурой плавления, меньшей температуры наименьшей легкоплавкого материала (шарика).

Словно в месте расположения такого шарика происходит перегорание плавкой вставки, после чего электрической дугой выжимается основной материал плавкой вставки.

Для оперативного включения и выключения цепей зашумленных плавкими вставками применяются аппараты типа рубильников (низкая нагрузка) и разъединители (высокая нагрузка), выключатели нагрузки (высокая нагрузка).

Основные достоинства плавкого предохранителя:

1. Простота конструкции, низкая стоимость.
2. Компактность изделия.

Недостатки:

1. Селективное срабатывание плавкого предохранителя осуществляется только в радиальных и под-магистральных линиях.
2. Для восстановления электроснабжения после перегорания плавкой вставки нужно осуществить вторичную замену предохранителей.
3. Нельзя осуществить АПВ (автоматическое повторное включение) в сетях.

В силу указанных достоинств и недостатков плавкий предохранитель наиболее широкое распространение получил в цепях низкой нагрузки, так как достоинства перекрывают недостатки.

В цепях и установках высокой нагрузки плавкие предохранители имеют ограниченное применение и используются в маломощных цепях (до 35/110 кВ) для защиты маломощных силовых трансформаторов, транзисторов напряжения и т.д.

Конструкции плавкого предохранителя напряжения менее 1 кВ. Плавкие предохранители с закрытыми фибровыми трубками. В сетях низкой нагрузки (в распределительном устройстве) нашли применение плавкие предохранители двух вариантов с:

- закрытыми фибровыми трубками;
- мелкозернистым наполнителем.

В плавких предохранителях с закрытыми фибровыми трубками эффективное гашение дуги достигается за счет давления закрытых фибровых трубок. Рассмотрим конструкцию такого плавкого предохранителя серии ПР (рис. 45).

При прохождении электрического тока по фигурной плавкой вставке наиболее нагретыми элементами являются уплотнения на плавкой вставке, которые изготавливаются из легкоплавких материалов, и при прохождении тока короткого замыкания плавкая вставка перегорает именно в этих местах. С помощью указанных уплотнений достигается облегчение при гашении дуги, так как перегорает не вся вставка, а лишь место сужений, тем самым достигается низкая концентрация паров материала плавкой вставки.

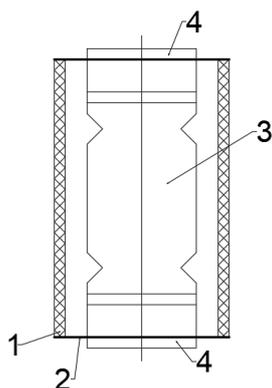


Рис. 45. Конструкция плавкого предохранителя серии ПР:

- 1 – патрон плавкого предохранителя из фибровой трубки, на концах имеет медные кольца с резьбой;
- 2 – медные колпачки, навинченные на патрон;
- 3 – фигурная плавкая вставка;
- 4 – ножи плавкого предохранителя, к которым крепится внутренняя плавкая вставка – сменный элемент

Гашение дуги в таком предохранителе происходит при высоком давлении (до 10 МПа) за счет интенсивного выделения газов из фибры (водород, углекислый газ, пары материала), в результате чего интенсивно происходят процессы деколонизации, и дуга практически мгновенно гасится после прохождения тока через кислород.

Оба типа предохранителей относятся к токоограничивающему плавкому предохранителю. В настоящее время заводы изготавливают плавкие предохранители с фибровыми трубками на переменном напряжении до 600 В и номинальной силе тока до 1000 А. Эти плавкие предохранители компактны, надежны и обладают высокой отключающей способностью (до 23 кА при напряжении, равном 380 В).

Плавкий предохранитель с мелкозернистым наполнителем. В плавких предохранителях электрическая дуга гасится в узком канале, который образован плавкой вставкой в наполнителе.

В качестве такого наполнителя используют мелкозернистый кварцевый песок определенной дисперсности.

К наполнителям предъявляется ряд требований:

- должны обладать высокими изомерными свойствами;
- быть негигроскопичными.

Эти два свойства определяют электрическую прочность плавкого предохранителя.

Наполнитель должен быть определенной дисперсности – крупные зерна увеличивают канал, в котором горит дуга; слишком мелкие зерна приводят к сплавлению предохранителя.

Рассмотрим осциллограммы изменения тока и напряжения во времени при срабатывании плавкого предохранителя с мелкозернистым наполнителем при коротком замыкании (рис. 46).

Ток короткого замыкания протекает через плавкую вставку и нарастает по экспоненциальному закону (отрезок 0-1). В точке 1 плавкая вставка перегорает, и сопротивление в плавком предохранителе резко возрастает из-за мгновенного испарения материала плавкой вставки. В точке 1 перегорание, и в точке загорается электрическая дуга. В это время до точки 1 напряжения нет. Во время резкого снижения тока за счет индуктивного характера нагрузки идет резкий рост напряжения, который приводит к напряжению зажигания.

Длина дуги достаточно большая, что уменьшает угол сдвига между током и напряжением.

В точке 3 ток через дуговой промежуток равен 0, а значение напряжения спадает до значения напряжения сетевого. Таким образом, в точке 2 из-за мгновенного срабатывания плавкого предохранителя возникает значительное перенапряжение, которое может превышать фазное в 4–5 раз, что опасно как для плавкого предохранителя, так и сопряженных деталей, для обслуживающего персонала.

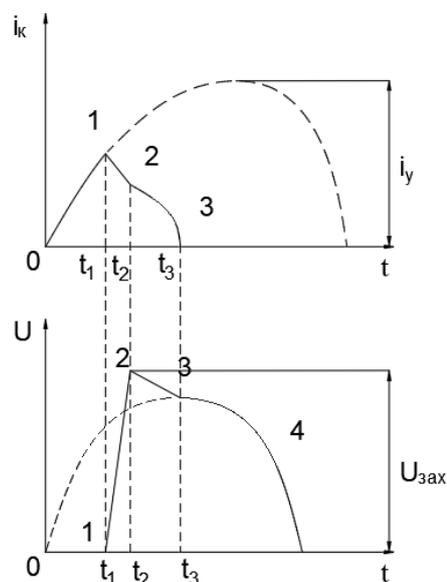


Рис. 46

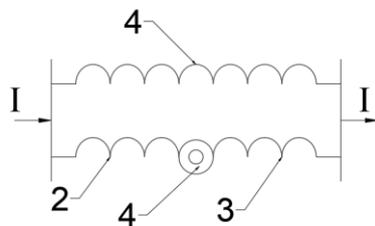


Рис. 47. Плавкий предохранитель:

- 1 – основная плавкая вставка плавкого предохранителя;
- 2 – вспомогательная плавкая вставка с сечением $F1$;
- 3 – параллель с сечением $F2$ ($F1$ не равно $F2$);
- 4 – фарфоровое колечко

вставку проходит электрический ток, и одновременно мгновенно перегорает плавкая вставка с меньшим сечением. Далее перегорает плавкая вставка с большим сечением, следовательно, вспомогательная вставка по всей длине перегорает не сразу, а частями, отсюда следует, что возникающее перенапряжение становится значительно меньше, если в предохранителе была одна рабочая вставка.

Плавкие предохранители с кварцевым наполнителем отечественные заводы изготавливают на переменном напряжении, примерно равном до 660 В, типов НПН с неразборным патроном на номинальном токе, равном 15; 60 А, и серии ПН с разборными патронами на токах 100...600 А – предохранители низкого напряжения. И на высокое напряжение с кварцевым наполнителем до 35 кВ включительно типов ПК для защиты силовых цепей и серий ПКТ для защиты трансформаторов напряжения.

Рассмотрим конструкцию кварцевого предохранителя низкого напряжения типа ПН-2 (рис. 48).

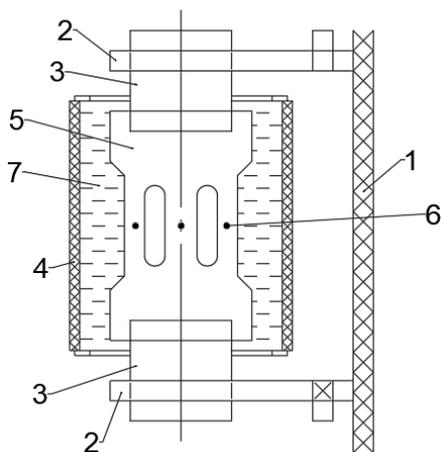


Рис. 48. Конструкция кварцевого предохранителя низкого напряжения типа ПН-2:

- 1 – цоколь (основание, накаливается в распределительном устройстве низкого напряжения);
- 2 – пружинящие контакты; 3 – ножи предохранителя;
- 4 – фарфоровый корпус прямоугольной формы;
- 5 – плавкая вставка полосовой меди специальной формы;
- 6 – напал из олова в средней части;
- 7 – кварцевый наполнитель

Конструкция плавкого предохранителя высокой нагрузки. В цепях с напряжением больше, чем 1 кВ, применяются плавкие предохранители двух типов: газогенерирующие плавкие предохранители с выхлопом газа (стреляющие предохранители) и кварцевые плавкие предохранители.

Газогенерирующие плавкие предохранители предназначены для наружной установки в распределительное устройство до 35 и 110 кВ.

Рассмотрим конструкцию газогенерирующего плавкого предохранителя серии ПВТ-35 (рис. 49).

В корпусе предохранителя помещены винипластовые вставки и проставки, которые в момент срабатывания предохранителя под воздействием дуги вентилируют газы, и давление резко повышается.

При расплавлении плавкой вставки с помощью пружины 5 наконечник выбрасывается, нож 4 отсоединяется, и образуется видимый разрыв цепи. Образовавшаяся дыра успешно гасится за счет интенсивного газового дутья и высокого давления в корпусе предохранителя. Отверстие в патрубке 3 защищено в нормальном состоянии медными мембранами, и в случае создающегося высокого давления они разрушаются, и появляются дополнительные отверстия для выхода газов. Срабатывание плоского предохранителя сопровождается специфическим звуковым эффектом, напоминающим выстрел. Номинальный ток описанного данного предохранителя составляет 3,2 кА. Рассмотрим кварцевый плавкий предохранитель на напряжение, равное 10 кВ.

При срабатывании перегорают плавкие вставки 7 и одновременно стальная проволока.

Выбор плавкого предохранителя. Плавкий предохранитель характеризуется номинальным током и напряжением и наименьшими отключениями.

Следует различать номинальную силу тока плавкого предохранителя и номинальную силу тока плавкой вставки.

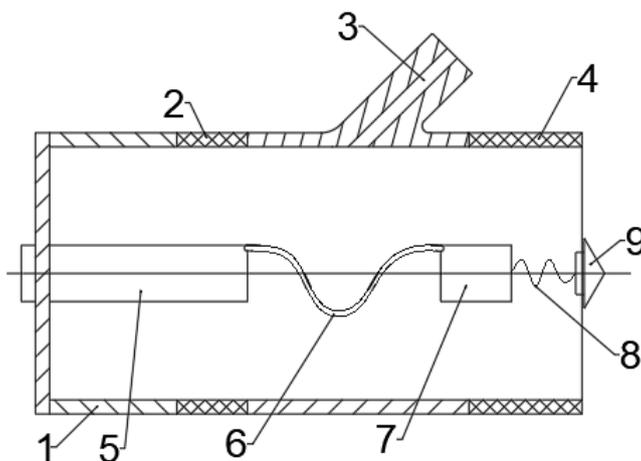


Рис. 49. Предохранитель серии ПВТ-35:

- 1 – корпус предохранителя; 2 – проставка из винипласта; 3 – металлический патрубок с окном;
- 4 – винипластовый патрубок; 5 – контактная деталь; 6 – плавкая вставка;
- 7 – связующее звено; 8 – гибкий проводник;
- 9 – наконечник

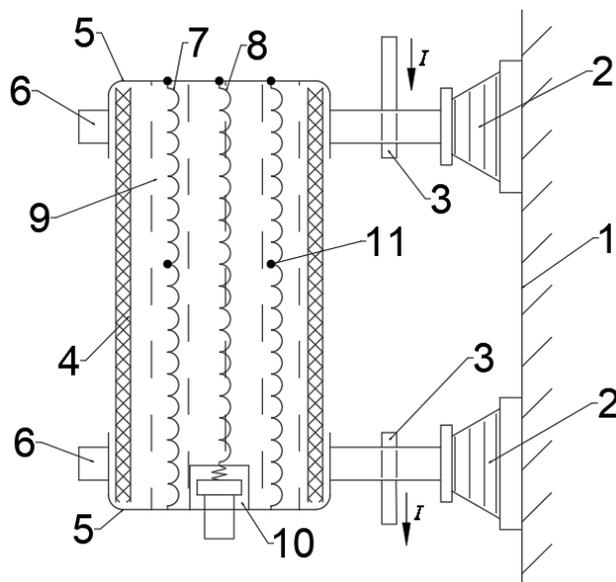


Рис. 50. Плавкий предохранитель:

1 – цоколь (на распределительном устройстве); *2* – опорный изолятор; *3* – шины распределительного устройства; *4* – фарфоровый корпус с мощными наконечниками; *5* – колпачки из меди, которые навинчиваются на корпус; *6* – пружинящие контакты; *7* – медные плавкие вставки с напоями; *8* – стальная нить спиралевидная; *9* – кварцевый наполнитель; *10* – указатель срабатывания; *11* – напой

В открываемых распределительных устройствах 10...110 кВ рекомендуется применение выхлопных или стреляющих плавких предохранителей, при этом мощность защищаемых силовых трансформаторов составляет порядка 4000...6000 кВА, в закрытых помещениях устанавливают кварцевые предохранители (рис. 50).

Номинальные токи плавкой вставок плавкого предохранителя типа ПК следует выбирать так, чтобы не возникало ложное срабатывание предохранителя вследствие толчков тока при включенном трансформаторе на небольшую нагрузку, также при включении ЭДС и батареи конденсаторов.

Для выполнения этого условия ток плавкой вставки выбирается в 1,2–2,5 раза больше номинального тока защищаемого электрического приемника.

При выборе плавкого предохранителя нужно соблюдать следующие условия:

1. Напряжение проводника больше или равно напряжению номинальному.
2. Сила тока проводника больше или равна силе тока номинальной.
3. Сила тока отключения больше или равно силе тока периодического состояния тока короткого замыкания.
4. Шины/шинной конструкцией называют неизолированные проводники или системы проводников, укрепленных с помощью изоляторов и предназначенных для электрической связи между отдельными элементами электроустановки.

В распределительном устройстве шины используют для соединения составов включения ряда цепей (работающих) (сборные шины (Ш- поперечные связи)) и наряду с силовыми кабелями для присоединения к распределительному устройству электрических машин (генераторов, синхрометров, трансформаторов).

Неизолированные проводники дешевле изолированных, обладают большей нагревательной способностью, проще в монтаже и эксплуатации.

Токоведущие части распределительного устройства монтируют из полос (шин).

Шины чаще всего алюминиевые марки АБ выключателя плоские и устанавливают либо плашмя, либо на ребро.

Размеры шины определяются рабочими токами, а расстояние между шинами (фазами) и опорными изоляторами токами (короткого замыкания).

Соединения шин между собой и с электрическими аппаратами или машинами могут быть неразъемными и разъемными.

К разъемным соединениям относят болтовые и винтовые соединения, к неразъемным – сварка, пайка, опрессовывание.

Слабым местом данных частей является конечное соединение – из-за повышенного переходного соединения. Температура конденсаторов может достигать 80 °С в длительном режиме, при коротком замыкании температура 200...300 °С.

Соединения алюминиевых шин с выводами электротехнического оборудования выполнены плоскими с двумя отверстиями под болты при токах больше 400 А.

При соединении проводников из алюминия и меди во избежание электрохимической коррозии используют переходные медноалюминиевые пластины марки МА.

Во избежание перегрева контактного соединения нельзя рассверливать отверстия в выводах аппарата.

Однополярные шины устанавливают обычно плашмя и закрепляют обычно на изолятор так, чтобы была возможность свободного перемещения полос. С этой целью отверстия в соединениях делают овальными.

Шины окрашивают с тремя целями:

1. Защита от коррозии.
2. Удобство при монтаже.
3. Окраска улучшает их теплопередачу с уменьшением нагрева при длительном рабочем режиме.

ПУЭ рекомендует: А – желтый; В – зеленый; С – красный.

Опорные изоляторы предназначены для крепления токоведущих частей и изоляцией их друг от друга и от заземленных частей.

Переходные изоляторы предназначены для прохождения токоведущих частей через стены и преграды.

2.2. АВТОМАТИЧЕСКИЕ ВОЗДУШНЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ (АВТОМАТЫ)

1. Автоматы: назначение, устройство, принцип работы, параметры.
2. Обзор основных модификаций автоматов.
3. Выбор автоматов.

Назначение автоматов. Автомат – электрический аппарат, применяемый в цепях нормального напряжения, предназначен для автоматического отключения электрических цепей

при различных аварийных режимах (перегрузочный, короткое замыкание), а также для ручного включения и отключения электрической цепи.

Нормальным рабочим положением автомата является их включенное состояние, когда через контактную систему проходит номинальный ток, и при этом температура аппарата находится в допустимых пределах, в электрических цепях автоматического включения – последовательно в разрыв цепи.

В аварийных режимах автомат должен обеспечивать многократное отключение электрических цепей. Гашение дуги в автомате происходит в воздушной среде, отсюда и название. В зависимости от величины, различают автоматические воздушные выключатели максимальных или минимальных токов, максимальное или минимальное напряжение, направление потоков мощности и так далее. Автоматы предназначены для осуществления селективной защиты электрических цепей, должны иметь регулировку по току и времени срабатывания. Автоматы, осуществляющие одновременно по максимальному току и минимальному напряжению, называются универсальными.

Автоматические воздушные выключатели, имеющие защиту корпуса и устанавливаемые в общедоступных местах, называются установочными.

Автоматы для переменного тока изготавливаются одно- и трехполюсными на напряжение, меньше или равное 660 В, на постоянный ток – одно- и двухполюсные на напряжение, меньше или равное 440 В. Максимальные рабочие токи достигают 4 кА через автоматы. Токи отключения в автоматах переменного тока составляют до 100 кА, в постоянном токе – до 200 кА.

В любом автомате различают следующие конструктивные узлы:

- контактная система;
- ДУ-устройство;
- привод;
- механизм передачи усилия;
- механизм свободного расцепления;
- элементы защиты – расцепители.

Основными параметрами автоматов являются: номинальное напряжение, номинальный ток, номинальный ток отключения, время полного отключения, время отключения.

Собственное время срабатывания автомата – время с момента достижения тока срабатывания до момента расхождения электрических контактов.

После расхождения контактов дуга должна быть погашена за минимальный отрезок времени, и при этом перенапряжение в цепи не должно быть выше допустимого.

Рассмотрим временные диаграммы изменения тока и напряжения при коротком замыкании цепи (осциллограммы) (рис. 51).

Пусть в $t = 0$ в цепи произошло короткое замыкание, током нагрузки пренебрегаем, так как он много меньше тока короткого замыкания. С $t = 0$ ток в цепи нарастает.

При достижении тока срабатывания в t_1 срабатывает механизм автомата. Отрезок времени $(0; t_1)$ зависит от токоустановки автомата по току и скорости нарастания тока короткого замыкания.

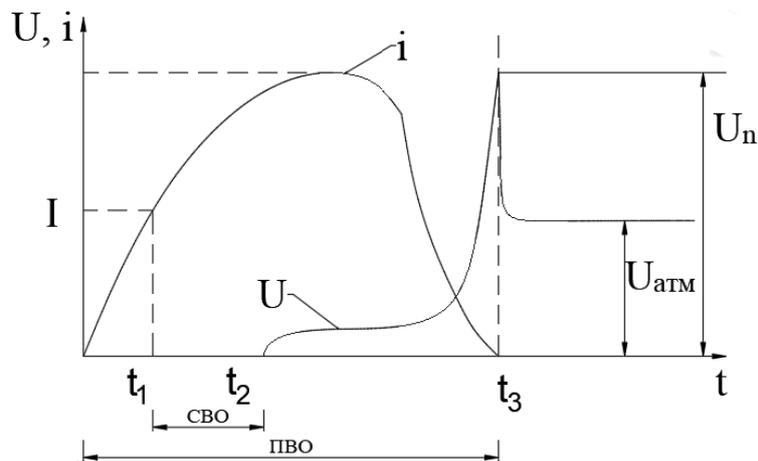


Рис. 51. Осциллограммы

В момент времени t_2 контакты начинают расходиться, и отрезок времени ($t_1; t_2$) определяется конструкцией автомата и массой подвижных частей автомата, конструкцией и способом расцепления и это свободное время отклика. С t_2 после расхождения контактов возникает электрическая дуга, при которой сопротивление резко возрастает.

Полное время отклика автомата (ПВО). Если свободное время отклика больше полупериода тока промышленной частоты (или 0,01 с), такой автомат называется обыкновенным небыстродействующим и в таком автомате ток короткого замыкания успевает достичь своего максимального значения, следовательно, отсюда следуют и конструктивные особенности такого автомата.

Если свободное время отклика меньше 0,01 с и составляет примерно 0,002...0,008 с, то такой автомат называется быстродействующим, и через его контактную систему проходит ток короткого замыкания значительно меньше, чем у тока короткого замыкания максимального, следовательно, в таких автоматах контактная система и остальные узлы рассчитываются не на максимальный ток короткого замыкания.

С увеличением скорости нарастания тока короткого замыкания быстродействие автомата уменьшается, и эффект тока ограничен, но, чтобы автомат был быстродействующим, в этом случае автомат конструируют таким образом, чтобы отключение устройства автомата реагировало не на значение тока короткого замыкания, а на скорость его нарастания.

Основные узлы автомата. Токпроводящая цепь. Наиболее существенной частью токпроводящей цепи автомата является его контактная система. При токах 200 А применяется одна пара электрических контактов на полюс. При больших токах применяются варианты главных контактов и ДУ, включенные параллельно.

Одним из вариантов применения дугогасительных контактов является перекатывающиеся контакты.

Основные контакты облицовываются серебром или металлокерамикой (серебро, никель, графит), дугогасительные неподвижные контакты покрываются металлокерамической марки СВ-50 (серебро, вольфрам); подвижные – СН-29ГЗ.

Применение металлокерамических и других марок.

В автомате на большие номинальные токи применяется несколько параллельных главных контактов на полюс.

В быстродействующих автоматах в целях уменьшения свободного времени отклика применяются целостные торцевые контакты, имеющие малый провал. Изготавливаются из меди, покрытой серебром.

Устойчивость контактирования при включении на короткое замыкание зависит от скорости нарастания контактного накаливания.

При амплитуде включаемого тока более 30...40 кА применяются автоматы молниеносного действия, у которых скорость движения контактов и контактное нажатие не зависят от скорости включающего механизма.

В универсальных автоматах, работающих императивно, создается определенная выдержка времени при протекании тока короткого замыкания, и размыкание контактов в этот отрезок времени недопустимо во избежание приваривания контактов.

Дугогасительная система автоматов.

В качестве дугогасительной системы в автоматах применяются:

- лабиринтно-щелевые камеры из дугогасительных материалов;
- камеры со стальными пластинами (металлическая решетка);
- камеры комбинированного типа, в которых используются конструктивные элементы первых двух типов.

Для устранения выброса пламени из дугогасительного устройства применяется пламегасительная решетка, состоящая из металлических пластин, размещенных поверх дугогасительного устройства.

Приводы и механизмы универсальных и установочных автоматов. Привод в автомате должен обеспечивать его включение в самых тяжелых условиях, т.е. на существующее короткое замыкание. В зависимости от номинального тока в автоматах применяются следующие виды приводов:

- ручной (до 200 А);
- электромашинный (особенно свыше 1 кА);
- электродвигательный привод (свыше 1,5 кА).

Электрический двигатель обеспечивает плавное нарастание контактного нажатия и движение электрических контактов в отключение от электрического магнита, который сопровождается ударными нагрузками.

Для передачи движения от привода к электрическим контактам служит механизм передачи усилия, выполняющий следующие функции:

- 1) передачи движения от привода к электрическим контактам;
- 2) удерживает контакты во включенном состоянии;
- 3) при отключении освобождает контакты и сообщает необходимую скорость движения для успешного гашения электрической дуги;
- 4) фиксирует контакты в отключенном состоянии;
- 5) подготавливает автомат к последующему включению.

Рассмотрим действие механизма передачи усилия и механизм расщепления для наиболее простой конструкции автомата с ручным приводом (рис. 52).

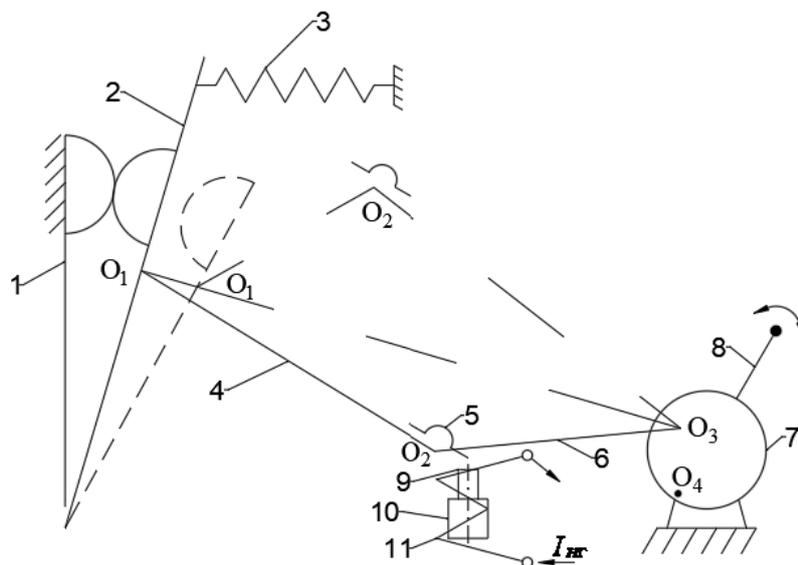


Рис. 52. Механизмы передачи усилия и расцепления:

- 1 – неподвижный электрический контакт; 2 – подвижный электрический контакт; 3 – отключающая пружина; 4, 6 – звенья механизма передачи усилия; 5 – упор, жестко связанный со звеном 6; 7 – эксцентрик ручного привода; 8 – ручка привода; 9 – боек расцепителя; 10 – сердечник электрического магнита расцепителя; 11 – обмотка электрического магнита, по которому идет ток нагрузки

При движении рукоятки 8 против часовой стрелки звенья 4 и 6 благодаря упору 5 образуют жесткую конструкцию, так как ось вращения шарнирно-связанных звеньев O_2 находится ниже прямой, соединяющей оси O_1 и O_3 .

Звенья 6 и 4 образуют механизм передачи усилия. Если в цепи возник ток короткого замыкания, который проходит по обмотке 11, то это вызовет втягивание сердечника 10, и через боек 9 усилие передается на звено 6 – рычаг ломается. То есть O_2 станет выше прямой $O_1 - O_3$, и в этом случае при перемещении ручки 8 против часовой стрелки замыкание электрических контактов не произойдет. O_4 – ось вращения эксцентрика. Для повторного включения после срабатывания автомата нужно отвести ручку 8 по часовой стрелке до упора, звенья 4 и 6 займут исходное положение – автомат готов к включению.

Данная конструкция применяется при относительно небольших токах, так как увеличение токов короткого замыкания потребует более жесткой пружины 3 и большего усилия со стороны привода.

Звенья 4, 6 и боек 9 образуют механизм свободного расцепления.

Наличие в автоматах механизма свободного расцепления позволяет:

- мгновенно разрывать электрическую цепь при возникновении тока короткого замыкания;
- предотвращать удержания электрических контактов в замкнутом состоянии при наличии в цепи тока короткого замыкания.

Расцепители. По функциональному признаку различают следующие виды расцепителей:

- 1) минимальных и максимальных токов;
- 2) минимальных и максимальных напряжений;
- 3) независимые.

По принципу действия: тепловые (биметаллические), электромагнитные расцепители.

В автоматах могут быть установлены тепловые расцепители, время срабатывания в которых зависит от тока нагрузки, т.е. данные расцепители срабатывают с определенной выдержкой времени и имеют защитную коробку. В автомат могут устанавливаться несколько электромагнитных расцепителей. Имеют комбинированный тип расцепителя: и тепловой, и электромагнитный.

Комбинированные расцепители имеют наибольшее распространение. Электромагнитные расцепители срабатывают при токах короткого замыкания, тепловые – при токах перегрузки. Установки тока и время выдержки, т.е. установка по времени срабатывания, в таких автоматах имеют определенные значения изменения. Так, установка тока перегрузки (замедление срабатывания) может быть изменена от 0,8 до 1,5 кратного тока номинального, а установка тока короткого замыкания (быстрое срабатывание) – в пределах от 3 до 15 кратного значения номинального тока.

Время срабатывания автомата при перегрузках составляет от 5 до 100 с (в зависимости от тока). Время срабатывания при коротком замыкании составляет от 0,1 до 0,4 с. Обмотку электромагнитного расцепителя включают в цепь последовательно непосредственно в разрыв цепи, либо через трансформатор тока, либо с помощью шунта. То есть расцепитель того или иного принципа действия воздействует через механизм расцепления на механизм передачи усилия, и происходит автосрабатывание автомата.

Расцепитель минимального напряжения электромагнитного типа срабатывает при понижении напряжения ниже значения напряжения установки (обычно 70%-ного номинального напряжения).

Во избежание ложного срабатывания такого расцепителя (при включенных Ас Дв) расцепители типа напряжения изготавливают с замедленным срабатыванием. Замедленное срабатывание может быть воздушное, либо гидравлическое, либо амперным.

Новые автоматы серии АЗ700 «Электрон» имеют предохранителем приставки, позволяющие изменять токи срабатывания и время выдержки. Токи приставки позволяют более точно вводить установки по току и напряжению, но такие автоматы имеют высокую стоимость и подвержены воздействию температуры окружающей среды.

Эти приставки подключаются с помощью трансформаторов тока.

Обзор основных модификаций универсальных и установочных автоматов. На сегодня в распределительном устройстве низкого напряжения и отдельно используются автоматы с расцепителями (тепловые, электромагнитные, комбинированные). Так, автоматы «Электрон» предназначены для электроустановок постоянного тока до 400 В и переменного тока – до 660 В.

Существуют два типа установочных автоматов:

- замедленный (селективный);
- мгновенного действия.

П/п расцепитель имеет:

- 1) зону регулирования от перегрузки от 0,8 до 2,0 значений номинального тока и время действия защиты 100...200 с;
- 2) зону при коротком замыкании по току в пределах 4 – 8 номинальных значений тока и время действия защиты 0,25...0,70 с.

Выключатели «Электрон» Э06 на токи 250...630 А устанавливаются с ручным или электромагнитным приводом включения на напряжение 110, 220, 380 В, а выключатели Э16-Э40 – на токи 1600...4000 А. Изготавливают их с дистанционным электродвигательным приводом на напряжение 110...220 В.

Выключатели «Электрон» стационарного и выкатного исполнения с использованием их в комплектах с трансформаторами ПС КТП выпускают следующих типов:

- Э06, Э16 – для трансформаторов мощностью до 630 кВА;
- Э16, Э40 – для трансформаторов мощностью 1000...2500 кВА.

Автоматы серии А3700 выпускают в следующих исполнениях:

1. Токоограничивающие (А3710Б – А3740А) с плавким предохранителем и электромагнитным расцепителем максимального тока (40...630 А) с динамической устойчивостью (18...100 кА). На плавком предохранителе расцепителя имеется зона регулирования тока при перегрузке с уставкой тока трогания 1,25 от значения номинального тока. Время срабатывания регулировок – в диапазоне 4,8...16,0 с. Зона регулировок при коротком замыкании с уставкой тока трогания 3 – 10 значения номинального тока. Выключатель срабатывает при коротком замыкании без выдержки времени на электромагнитный расцепитель, ток трогания устанавливается на значениях 10 номинальных токов.

2. Токоограничивающие (А3711Б – А3724Б) с электромагнитным расцепителем максимального значения тока на 160...630 А: не имеют п/п расцепителей и регулирование тока трогания и времени срабатывания. При электромагнитном расцепителе ток трогания составляет 10 номинальных токов.

3. Селективные (А3733С – А3744С) с п/п расцепителями максимального тока 250...630 А. На п/п расцепителя имеются:

- зона регулирования тока при перегрузке с уставкой тока трогания и регулированием времени срабатывания 4, 8, 16 с;
- зона регулирования при коротком замыкании с уставкой тока трогания 3 – 10 номинальных значений тока и регулировкой времени срабатывания 0,1; 0,25; 0,4 с;
- электромагнитный расцепитель отсутствует.

Маркировка автоматов серии А3700. Эта маркировка указывает на различное исполнение автоматов:

- А – АВВ;
- 37 – передовой номер разработки;
- 4-й знак – значение или величина выключателя, определяется номинальным током главной цепи. 1 – 160 А, 2 – 250 А, 3 – 400 А, 4 – 630 А;
- 5-й знак – число полюсов и исполнения максимальной токовой защиты.

(Для 3-полюсных выключателей: 2 – исполнение токоограничивающих с электромагнитным расцепителем; 4 – токоограничивающий с п/п и электромагнитным расцепителем; 6 – с электромагнитным и тепловым расцепителем; 8 – неавтоматические; 1, 3, 5, 7 – двухполюсные автоматические различного исполнения.

После указанных цифр могут быть знаки обобщенного исполнения по виду защиты.

Б – токоограничивающие;

С – селективные;

Н – неавтоматические.

Еще могут быть климатические и камерные размещения.

Автомат АЗ700Ф выпускают в фенопластовых корпусах с термометаллом и электромагнитным расцепителем и применяются вместо АЗ700.

Быстродействующие автоматы. Данные автоматы применяются для отключения электрических цепей постоянного тока. Быстродействие автоматов может быть повышено двумя способами:

– сокращение собственного времени отключения;

– сокращение времени гашения электрической дуги, при этом возникающие перенапряжения должны быть в допустимых пределах.

Время гашения дуги доведено сегодня до значения 0,015 до 0,020 с, и дальнейшее является неэффективным.

Основные усилия по увеличению быстродействия направлены на сокращение свободного времени отклика. Для этого принимается ряд конструктивных решений:

1) электрические контакты изготавливают только торцевыми;

2) уменьшают провал электрических контактов (8...10 Н·м);

3) уменьшают раствор (18...22 мм) на номинальном напряжении до 3 кВ.

Образование дуги и ограничение тока за счет ее сопротивления начинаются при расстоянии между расходящимися контактами 1,5...2,0 мм. Для уменьшения наплавки электрических контактов и разрушения возникающего металлического мостика применяют магнитное дутье.

Для уменьшения свободного времени отклика надо максимально сократить время от момента достижения. При этом кинематическая схема упрощает, не применяются ломающиеся рычаги, а электромагнитные расцепители связывают с подвижными электрическими контактами. По характеру исполнения автоматы делятся на: линейные, катодные, анодные.

Из существующих конструкций быстродействующими автоматами являются автоматы серии ВАБ 28 на номинальные токи от 1,5 до 6 кА и номинальным напряжением от 0,25 до 3300 В. Время срабатывания измеряется несколькими сотыми долями секунд (0,01...0,03).

Быстродействующие автоматы устанавливаются в преобразующих установках.

Автоматические воздушные выключатели для гашения магнитного поля для мощных генераторов. Для предотвращения развития аварии при коротком замыкании в обмотке генератора нужно устранить причину возникновения ЭДС в этих обмотках, т.е. отключить источник магнитного поля.

Ввиду того, что индуктивность возбуждения достаточно большая, то при быстром отключении обмотки возбуждения (ОВ) появятся значительные перенапряжения, которые приводят к пробое изоляции. Поэтому для быстрого отключения ОВ и уменьшения возникающего перенапряжения применяются автоматы гашения поля серии АГП, которые имеют специальные дугогасительные устройства на базе металлической решетки с мощным изогнутым дутьем, которые заставляет вращаться столб по пластинам решетки.

Основные параметры автомата АГП:

- номинальный ток – 10 000 А;
- номинальное напряжение – 2...3 кВ;
- число полюсов равно двум.

Рассмотрим принцип действия такого автомата (рис. 53).

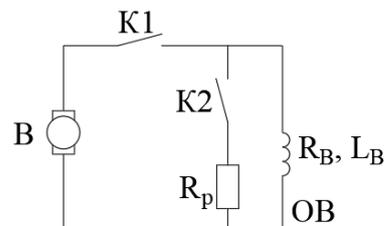


Рис. 53. АГП:

B – возбудитель;

K1 K2 – ключи;

R_p – разрядное сопротивление

При возникновении аварии замыкается ключ *K2*, в цепь включаются сопротивления *R_p*, и *OB* шунтируется этим резистором. Накопленная магнитная энергия в *OB* выделяется на подключение резистора, и уменьшается ток через *OB*. После этого отключается ключ *K1*, условия коммутации которого значительно облегчаются включением резистора *R_p*.

При гашении дуги ток стремительно уменьшается от возбуждения и, чтобы скорость максимально нарастала *R_p*, должно быть нелинейным напряжение, и по мере спада тока его сопротивление должно расти.

Для главной цепи автомата должны соблюдаться следующие соотношения:

- номинально напряжение автомата больше или равно номинальному напряжению сети;
- номинальная сила тока автомата больше или равна номинальной силе тока сети.

Для автоматической защиты двигателя, работающего в повторно-кратковременном режиме, сила тока цепи принимается равной в режиме ПВ 25%. Для защиты двигателя с коротким замыканием – роторный ток установки электромагнитного расцепителя

$$Y_{y \text{ ном}} \geq (1,5 - 1,8)Y_{\text{пуск}}$$

Для двигателя с фазным ротором

$$Y_y \geq (2,5 - 3)Y_{\text{ном}}$$

Для электрических двигателей, работающих в тяжелом или повторно-кратковременном режиме, номинальная сила тока теплового или комбинированного расцепителя должна быть не ниже 1,5 значений номинальной силы тока двигателя.

Предоставляемый ток отключения

$$Y_{\text{откл}} \geq Y \text{ расчетного тока короткого замыкания в цепи.}$$

2.3. ВЫКЛЮЧАТЕЛИ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

1. Выключатели высокого напряжения.
2. Масляные выключатели.

Назначения и требования, предъявляемые к выключателям высокого напряжения.

Основным коммутирующим аппаратом, применяемым на электростанциях и подстанциях, является выключатель высокого напряжения, устанавливаемый в распределительном устройстве высокого напряжения (высшего) и низкого напряжения (низшего).

Выключатели высокого напряжения предназначены для автоматического выключения и включения электрических цепей (сетей) высокого напряжения в любых режимах (как в нормальных, так и в аварийных случаях). Наиболее тяжелой стадией работы является отключение электрических цепей.

Выключатели высокого напряжения должны удовлетворять ряду требований.

1. Надежное отключение токов любого значения от 0 до десятков кА, т.е. до аварийных токов короткого замыкания.
2. Быстродействие, т.е. наименьшее время отключения.
3. Пригодность для осуществления АПВ (автоматического повторного включения). То есть после первого отключения выключатель должен обеспечивать надежное включение на существующем коротком замыкании, и если оно не устранено, то он должен повторно отключить цепь.
4. Удобство ревизии и обслуживания выключателя.
5. Взрывобезопасность и пожаробезопасность.

Выключатели, особенно наружного применения, должны срабатывать при любых погодных условиях и противостоять агрессивной воздушной среде. Конструкция должна иметь меньшие габариты, так как выключатель в общем случае определяет площадь подстанции.

Основные параметры силовых выключателей. Выключатель представляет собой законченное изделие вместе со своим приводом. Различают в качестве параметров: электрические величины и временные интервалы. Электрические величины: номинальное напряжение, номинальный продолжительный ток, номинальный ток отключения. Номинальная мощность отключения (дополнительный параметр):

$$S_{\text{откл}} = \sqrt{3U_{\text{ном}}Y_{\text{ном}}}. \quad (46)$$

Временные параметры: собственное время отключения, полное время отключения, время включения, бестоковая пауза выключателя:

собственное время отключения $t_{\text{откл}}$ – время, исчисляемое от момента подачи команды на отключение до момента расхождения электрических контактов;

$t_{\text{откл}}$ (полное) – время с момента подачи команды на отключение до прекращения электрического тока на всех полюсах выключателя (до гашения дуги);

$t_{\text{вкл}}$ – время от подачи команды на включение до появления тока на каком-либо из полюсов, определяемое пробоем воздушного промежутка при движении контактов навстречу друг другу и пробоем этого промежутка;

$t_{\text{п}}$ – бестоковая пауза, время от момента погасания дуги на всех полюсах, т.е. прекращение тока до момента возникновения тока на одном из полюсов (используется при автоматическом повторном включении).

Выключатели включают последовательно в цепь. Расхождение электрических компонентов в масляных выключателях (МВ) происходит в объеме масла, и если отключение происходит при прохождении токов к. з. через его контакты (тяжелый случай), то в этом случае под воздействием электрической дуги, возникающей между расходящимися контактами, вокруг нее образуется газовый пузырь, состоящий примерно из 50% продукта разложения масла, среди которых до 70% – это водород и остальное 50% – пары масла. Все эти фракции горючие, но горение не происходит из-за отсутствия контакта с кислородом. При каждом акте отключения испаряется небольшое количество масла, хотя объемы масла достаточно велики. Усиленное гашение электрической дуги в МВ идет с применением дугогасимых камер, которые ограничивают зону горения дуги, повышают давление в зоне горения дуги, способствуют газовому дутью.

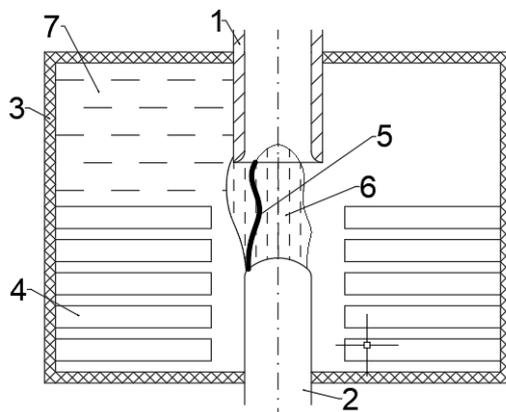


Рис. 54. Масляный выключатель:

- 1 – полый неподвижный электрический контакт (розеточного типа);
 2 – подвижный электрический контакт в виде стержня («вниз» направление при отключении);
 3 – дугогасительная камера, жестко закрепленная с неподвижным контактом и изготовленная из прочного диэлектрического материала; 4 – перегородка дугогасительной камеры с центральным отверстием для ПЭК; 5 – электрическая дуга; 6 – газовый пузырь; 7 – масло в дугогасительной камере

Увеличиваются отключающая способность выключателя и надежность его срабатывания. Рассмотрим гашение дуги в МВ (рис. 54).

При отключении токов к. з. подвижный контакт 2 с большой скоростью выходит из зацепления, образуется электрическая дуга, горящая в газовом пузыре. Давление в камере резко увеличивается до больших значений (3...7 МПа), что смещает столб дуги и способствует увеличению скорости восстанавливающейся электрической прочности между компонентами после прохождения тока через ноль. Эти факторы способствуют успешному гашению дуги. В первый момент расхождения, когда подвижный электрический контакт в зоне перегородок дугогасительной камеры, движение горячих и холодных потоков газового пузыря происходит радиально, давление в камере резко увеличивается. Гашение дуги идет при некотором значении расстояния между контактами, которое зависит от значения отключаемого тока и восстанавливающегося напряжения на контактах. После выхода подвижного контакта из камеры, газовый пузырь вырывается из камеры и возникает интенсивное газовое дутье, направленное вдоль столба дуги. Интенсивность газового дутья и возникающее большое давление в камере практически пропорциональны отключенному току, но такая камера может отключать токи к. з. до определенного значения, что связано с механической прочностью камеры. При отключении малых значений тока к. з. возникают проблемы с давлением в камере и скоростью газового дутья, поэтому для увеличения отключающей способности выключателей при малых токах к. з. применяется ряд конструктивных решений:

- увеличивают скорость движения электрических контактов;
- применяют принудительное направленное движение масла в зону горения дуги.

Масляный выключатель относится к категории газогенерирующих или автогазовых выключателей, в которых газовое дутье возникает от энергии электрической дуги, возникающей между расходящимися электрическими контактами, чем больше энергия дуги, тем успешнее ее горение.

На сегодня в эксплуатации находятся два основных вида масляных выключателей:

- 1) баковые (большеобъемные);
- 2) горняковые (маломасляные).

Принцип гашения дуги в этих выключателях одинаков, различие состоит в том, как осуществляется изоляция токоведущих частей, и объемах используемого масла.

Классификация силовых выключателей. В настоящее время разработано большое количество модификаций силовых выключателей, применяемых как на внутренних, так и на наружных распределительных устройствах. Основным признаком классификации выключателей основывается на принципах гашения дуги при различных дугогасящих средах, которые и определяют название применяемых выключателей. Поэтому различают следующие виды силовых выключателей:

- масляные;
- воздушные;
- элегазовые;
- вакуумные;
- электромагнитные.

Силовые выключатели выключают цепь в любом режиме, в отличие от выключателей нагрузки, которые компенсируют токи не выше номинального продолжительного тока (не защищают от к. з.).

Многообъемные (баковые) выключатели. Такое название получили масляные выключатели, в которых масло выполняет две функции:

- является газогенерирующим веществом;
- является изоляцией токоведущих частей.

Эти выключатели до недавнего времени использовались на всех уровнях, применяемых U , но в последнее время они вытесняются более прогрессивными воздействиями, элегазовыми, вакуумными выключателями.

Хорошим признаком этих выключателей является наличие бака, в котором либо все три полюса, либо каждый из полюсов и бак заземляется. Данный выключатель имеет значительные габаритные размеры, собственную массу выключателя и массу масла. Так, У-220 имеет 27 т собственной массы и 28 т масла. При ремонте такого выключателя нужны резервуары для слива масла, в баке должны быть предусмотрены лазы, через которые осуществляется доступ к контактной системе выключателя. Основные достоинства:

1. Высокая надежность.
2. Простота конструкции камер и механизма.
3. Высокая механическая прочность электрической конструкции.
4. Возможность использования встроенных приборов тока.
5. Не требуется высококвалифицированный обслуживающий персонал.

Основные недостатки:

1. Большие габариты и масса.
2. Требуется регулярная очистка масла, особенно после срабатывания.
3. Сложность и трудоемкость ремонта и ревизии выключателя.
4. Взрывоопасность и пожароопасность.

Малообъемные (горшковые) выключатели. В данных выключателях масло является только газогенерирующим веществом. Изоляция в них осуществляется с помощью дугогасительной камеры, изготовленной из высокопрочного изоляционного материала: стеклопластик и т.д.

Контактная система и дугогасительная камера помещаются в малый объем (горшок) относительно небольшого размера, и вся конструкция выключателя изолирована от металлического основания.

Рассмотрим конструкцию горшка выключателя типа ВМП-10 (рис. 55).

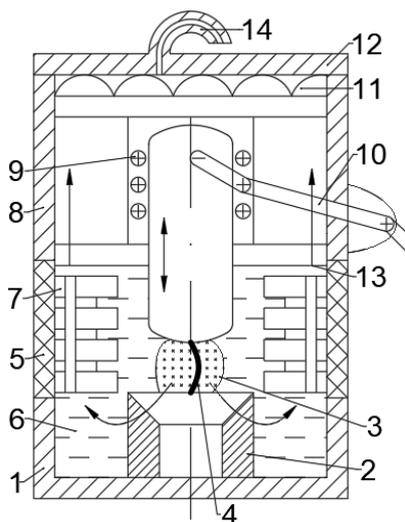


Рис. 55. Конструкция 1-го выключателя:

1 – нижняя металлическая часть выключателя со встроенным неподвижным электрическим контактом позитивного типа 2; 3 – газовый пузырь; 4 – электрическая дуга; 5 – дугогасительная камера; 6 – масло; 7 – подвижный электрический контакт; 8 – верхняя металлическая часть; 9 – контакты; 10 – механизм отключения выключателя; 11 – маслоотделитель; 12 – крышка; 13 – уровень масла (чуть выше ДК); 14 – отверстие для выхода газов из горшка при отключении

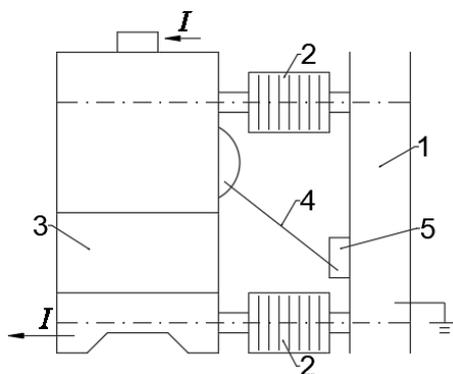


Рис. 56. Расположение выключателя в РУ:

1 – рама выключателя (заземляют); 2 – опорные изоляторы; 3 – выключатель; 4 – изолирующая тяга; 5 – привод выключателя с общим валом на три полюса

Маломасляный выключатель состоит из трех основных частей:

- нижней металлической со встроенным неподвижным электрическим контактом розеточного типа;
- средней из прочного диэлектрического материала с дугогасимой камерой;
- верхней металлической со встроенным подвижным электрическим контактом.

Во включенном состоянии подвижный электрический контакт находится в зацеплении с неподвижным. При подаче команды на отключение цепи подвижный электрический контакт начинает движение вверх. Образуется дуга с газовым пузырем, и пока подвижный контакт не вышел за пределы ДК, газовый пузырь распространяется в щели дугогасимой камеры радиально и частично распространяется в верхнюю часть выключателя. Давление в газовом пузыре достигает 3...7 МПа, и после выхода контакта из камеры возникает интенсивное газовое дутье. Продукты распада масла, его пары устремлены в верхнюю часть, газы выходят через верхнюю крышку, а масло отделяется маслоотделителем и стекает вниз бочка. Уровень масла в выключателе находится чуть выше ДК. Ход контакта составляет 245 мм. На рисунке 56 изображен внешний вид выключателя, каждый из бочков через опорные изоляторы крепится к заземленной раме, в которой находится буферное устройство вместе с пружинным приводом и общим валом на все три полюса. Движение от вала к каждому полюсу передается через изоляционную штангу. Масса масла составляет всего 4,5 кг. Ток отключения $I_{\text{ном}} = 630...3200$ А; $t_{\text{отк}} = 0,14$ (7 триодов).

Основные достоинства малообъемных горшковых выключателей (ГМВ):

- 1) имеют меньшую массу и габариты, а также меньший объем используемого масла;
- 2) в отличие от воздушного выключателя, масляные всегда готовы к работе. Для них не строят отдельно компрессорные установки, как для воздушных;
- 3) осмотр и ремонт ДК и электрических контактов возможен без слива масла, что удобно при эксплуатации;
- 4) можно создавать МВ с U до 500 кВ.

Основные недостатки:

- 1) менее надежны в работе, чем баковые, так как изоляционные материалы, из которых изготавливается камера, а также опорные изоляторы при отключении испытывают значительные механические перегрузки;
- 2) $I_{\text{отк}}$ ниже, чем у баковых;
- 3) маломасляные выключатели, как правило, не имеют встроенных трансформаторов тока.

2.4. ВОЗДУШНЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ

1. Воздушные выключатели с камерами определителями.
2. Воздухонаполненные воздушные выключатели.

ДК воздушные выключатели с камерами определителями. В воздушных выключателях в ДК используются как поперечное, так и продольное воздушное дутье. Поперечное дутье имеет ограниченное применение, так как в этом случае используется ДК из изоляционных материалов, и при $U = 35$ кВ и выше выключатели и камеры имеют значительные габаритные размеры, поэтому свыше 35 кВ не применяются.

$I_{\text{отк}}$ – до 120 кА, и $U = 10...20$ кВ.

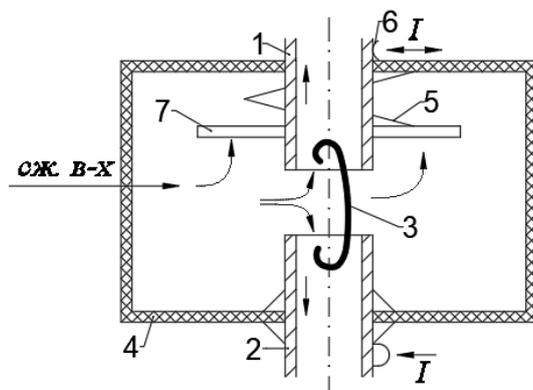


Рис. 57. Принцип гашения дуги в воздушном выключателе:

I – подвижный электрический контакт; 2 – неподвижный электрический контакт, жестко скрепленный с ДУ 4; 3 – электрическая дуга; 5 – возвратная пружина; 6 – токосъем с подвижного электрического контакта; 7 – поршень

В основных типах воздушных выключателей применяется продольное воздушное дутье вдоль столба дуги. Воздушные генераторы применяются на всех уровнях U . Даже до 1150 кВ. Рассмотрим принцип гашения дуги в воздушном выключателе (рис. 57).

После подачи команды на отключение под высоким давлением воздух подается в камеру и воздействует на поршень 7 подвижный электрический контакт, между торцами контактов образуется электрическая дуга, которая мгновенно сдувается в полости полых электрических контактов. Таким образом, торцы контактов не подвергаются эрозионному действию электрической дуги, что повышает их срок службы и уменьшает переходное сопротивление в замкнутом состоянии. После прохождения тока через O создаются необходимые условия для высокой устанавливаемой прочности межконтактного промежутка, и за счет высокого давления и интенсивного воздушного дутья через полости контактов создаются условия для успешного гашения дуги. Наиболее успешные условия создаются между определенными состояниями, которые зависят от давления воздуха, формы и размера контактов. Отключение этого приводит к увеличению времени гашения дуги. Данное расстояние относительно невелико, но его явно недостаточно при нормальном атмосферном давлении. При таком давлении межконтактный промежуток будет пробит. В воздушных выключателях используется конструктивное решение для гашения дуги и ее возобновления:

- 1) после гашения дуги контакты дополнительно разводят;
- 2) применяют последовательно включенный с дугогасимыми контактами выключателя дополнительный электрический алгоритм, называемый определителем;
- 3) оставляют в ДК после гашения дуги исходное высокое давление.

Так как отключаемый ток пропорционален обратному значению скорости восстанавливающегося $U(\frac{dU_B}{dt})$, то в этом случае для быстрого гашения электрической дуги разрывают цепи шунтирующим низкоомным резистором.

Каждый разрыв в воздушном выключателе шунтируется низкоомным резистором. В зависимости от давления воздуха в камере оно воздействует на определенное U . При $p = 2$ МПа $U_{отк} = 50...60$ кВ. В современных воздушных выключателях $P_{возд}$ доводят до 4 МПа и отключаемое U составляет порядка 125 кВ. Если $U_{отк}$ цепи превышает указанное

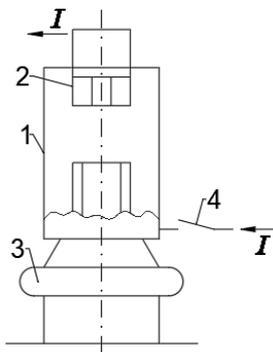


Рис. 58. Воздушный выключатель:

- 1 – ДК с электрическими контактами;
- 2 – электрический контакт;
- 3 – ресивер; 4 – определитель

значение, то в этом случае такие камеры соединяют последовательно и получают несколько разрывов на полюс. Поэтому современные воздушные выключатели строят по модульному принципу, соединяя их последовательно, что позволяет использовать воздушные выключатели на всех номинальных U . Также построение выключателя облегчает их конструкцию, эксплуатацию и использование. Воздушные выключатели с камерами и отделителями относятся к ранним конструкциям и не эксплуатируются. В этих выключателях имеются следующие основные конструктивные узлы (рис. 58).

При отключении электрической цепи импульс сжатого воздуха из ресивера по воздуховодам через дутьевой клапан поступает в ДК и разводит электрический контакт. После погашения дуги с большой скоростью нож отделяется, дополнительно разрывает цепь, после чего (после выхода сжатого воздуха из камеры) дугогасительные контакты размыкаются, но цепь разорвана. После чего всю тяжесть берут на себя электрические контакты. Затем отделители отключают обесточенную цепь. Включение выключателя осуществляется отделителем (его нож опускается и замыкается цепь), но такая конструкция имеет низкую надежность как при включении, так и при отключении, особенно зимой во время гололеда, когда включение отключателя может вообще не произойти. При включении возможен пробой воздушного промежутка, следующим этапом развития таких выключателей стало заключение отделителя в герметичную камеру, в которой применяется высокое давление.

Особенностью такого выключателя является то, что в отключенном состоянии контакты отделителя разведены в камере с высоким давлением и удерживаются в таком состоянии этим высоким давлением. При включении выключателя давление стравливают и контакты отделителя замыкают цепь.

Указанные варианты конструкции находят ограниченное применение.

Воздухонаполненные выключатели. Этот вариант выключателей на сегодня используют во всех конструкциях воздушных выключателей, и они не имеют отделителей. Основной отличительной особенностью таких выключателей является то, что дугогасительные контакты как в состоянии включения, так и отключения, находятся в прочном металлическом баке, который постоянно наполнен сжатым воздухом при высоком давлении 2...4 МПа. В таких выключателях на один полюс обычно используются два разрыва дугогасительных контактов, которые шунтируются емкостным делителем U .

Кроме этого, каждый разрыв шунтируется низкоомным резистором, и сопровождающий ток через них отключается (несколько позже) вспомогательными электрическими контактами. В таких выключателях в объеме бака давление поддерживается с ресивера, который соединяется с помощью труб с компрессорной станцией. Выходной клапан заменен дутьевым клапаном. В момент размыкания электрических контактов синхронно с ними срабатывает дутьевой

клапан, соединяя бак с атмосферой и происходит выход сжатого воздуха из бака в атмосферу, тем самым создается интенсивное воздушное дутье. На сегодня выпускаются выключатели следующих серий: ВВБ, ВНВ.

Достоинства и недостатки воздушных выключателей.

Достоинства:

- малое время АПВ;
- возможность построения на любом номинальном напряжении и мощности отключения;
- взрыво- и пожаробезопасность;
- отсутствие приводов постоянного тока;
- меньший вес и габариты по сравнению с МБВ.

Недостатки:

- относительная сложность конструкции;
- необходимость создания компрессорной станции;
- возможность появления перенапряжения при отключении малых токов к. з.

2.5. РАЗЪЕДИНИТЕЛИ, ОТДЕЛИТЕЛИ, КОРОТКОЗАМЫКАТЕЛИ

1. Разъединители.

2. Отделители и короткозамыкатели.

Основные сведения. Маркировка. Условное обозначение. Разъединитель – коммутатор – аппарат, применяемый в цепях ВН (свыше 1 кВ), основное назначение которого изолировать предварительно отключенный участок системы сети электрической установки с целью безопасного ремонта, т.е. при отключении разъединителя сети с участка снимается U и образуется видимый разрыв в воздухе (в свету).

Разъединитель включают в цепь последовательно (рис. 59).

Разъединитель не отключают не токи нагрузки, ни токи к. з. Разъединители не имеют дугогасительных устройств, между его контактами возникает дуга, и имеют относительно простую конструкцию. Аналог разъединителя – рубильник МП или контактор. Разъединитель снабжают либо переменным, либо электродвижущим приводом для неавтоматического управления.

Рассмотрим принцип работы разъединителя. Если нужно вывести в ремонт выключатель ВН, то по обеим его сторонам включают разъединители (рис. 60).



Рис. 59. Упрощенная схема

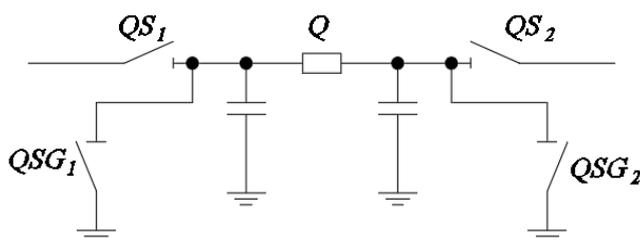


Рис. 60. Принцип работы разъединителя

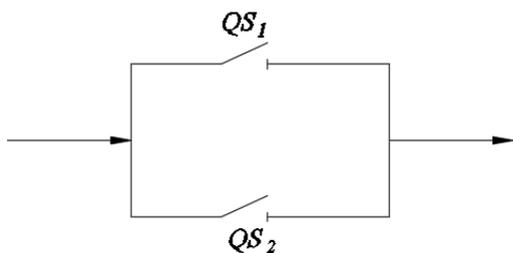


Рис. 61

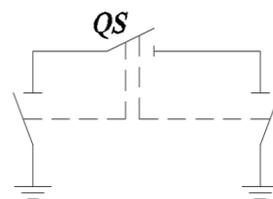


Рис. 62

Для вывода выключателя в ремонт его отключают и тем самым заземляется ток нагрузки, затем размыкают разъединитель. Для снятия U отключенный участок заземляют, чтобы убрать зарядные токи от емкости зажима выключателя. При выполнении функций переключений в РУ коммутацию разъединителя производят при наличии параллельной ветви с нулевым сопротивлением (рис. 62).

Применение получили трехполюсные разъединители с общим управлением полюсами.

Маркировка их из букв и цифр:

1-я буква: Р – разъединитель.

2 – В – внутренняя установка, Н – нагруженная установка;

3 – О – однополюсное исполнение.

З – наличие в конструкции заземляющих ножей.

3.1/3.2 – количество ножей.

Д – двухколонковая конструкция.

Р – рубящего типа.

После букв идут числа, обозначающие номинальное U разъединителя и номинальный ток.

Разъединитель для внутренней установки (ВУ).

Р для ВУ выполняют обычно вертикально рубящего типа (рис. 63).

Типичный разъединитель для внутренней установки является разъединителем серии РВР. Данная конструкция имеет два опорных изолятора на полюс на основании из профильной стали (швеллер). Третий изолятор (не показан) – изолятор для приведения в движение главных ножей. Разъединитель снабжают дополнительными ножами для заземления (1 или 2 на полюс). Для управления главными ножами служат вал и система рычагов для каждого полюса.

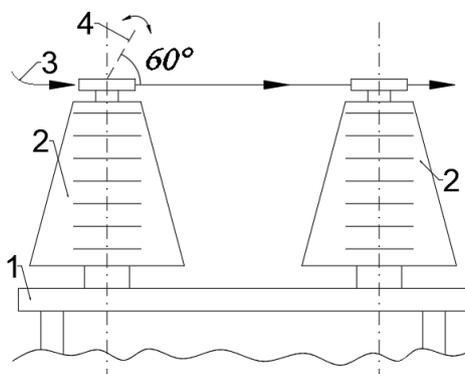


Рис. 63. Разъединитель для внутренней установки:

1 – основание; 2 – опорные изоляторы; 3 – токоведущая цепь; 4 – нож разъединителя

Токоведущие части выполняют в соответствии с номинальным рабочим током. Чем больше ток, тем больше сечение ножей. При этом конструкция разъединителя должна удовлетворять условиям ЭДСТ и термическим способностям.

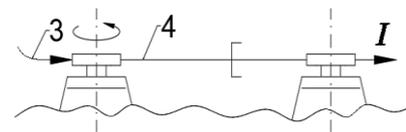


Рис. 64. РНД

Разъединители для наружной установки. В РФ наиболее распространены разъединители горизонтально поворотного типа с ножами, вращающимися в горизонтальной плоскости параллельно основанию (рис. 64).

Такого типа разъединители изготавливают для $U = 35 \dots 500$ кВ. Типичным представителем является тип РНД. Он имеет две колонки изоляторов на полюс, установленные вертикально на подшипниках и на стальной связанной между собой системе рычагов. При повороте изолятора поворачиваются ножи 4, укрепленные на головках изоляторов. Зажимы для присоединения проводников к разъединителю укреплены шарнирно на головках изолятора. При вращении изоляторов они не поворачиваются. Электрические контакты разъединителя находятся в месте стыка ножей.

Разъединители снабжены ножами для заземления (1 или 2). В отключенном положении они накладываются горизонтально у основания. При выключении они поворачиваются в вертикальной плоскости на угол 90° . Полюсы трехполюсных разъединителей связаны между рычажной системой и управляются с помощью общего привода. Средний полюс – ведущий, крайние – ведомые. СВН во многом определяется размерами разъединителя. Стремление уменьшить габариты разъединителей для выигрыша места на открытых ПС ВН и СВН привело к созданию многочисленных конструкций разъединителей, начиная с обычных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью данного пособия является оказание помощи студентам при выполнении практических заданий для формирования умений, навыков в области выполнения работ по обеспечению работоспособности электрического оборудования и электрических аппаратов.

Рассмотренный в настоящем издании материал дает представление о физических процессах и явлениях в коммутационных и защитных контактных электрических аппаратах, используемых в системах электроснабжения и электропотребления на предприятиях, о конструкциях аппаратов, их испытаниях, выборе для эксплуатации, основных методах монтажа и эксплуатации аппаратов. В литературе по электрическим аппаратам, на которую опирались авторы при написании книги, аналогичной структуры не встречалось. Изложение материала, посвященного различным вопросам в одном учебном пособии, удобно для изучения студентами.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Аполлонский, С. М. Электрические аппараты автоматики : учебное пособие / С. М. Аполлонский, Ю. В. Куклев. – Санкт-Петербург : Лань, 2022. – 228 с.
2. Аполлонский, С. М. Электрические аппараты управления и автоматики / С. М. Аполлонский, Ю. В. Куклев, В. Я. Фролов. – 3-е изд., стер. – СПб. : Лань, 2023. – 256 с.
3. Хакимьянов, М. И. Электрические и электронные аппараты : учебное пособие / М. И. Хакимьянов, Р. Т. Хазиева. – Уфа : УГНТУ, 2020. – 198 с.
4. Электрические и электронные аппараты : учебное пособие / А. И. Гардин, А. Б. Лоскутов, А. А. Петров, С. Н. Юртаев. – Нижний Новгород : НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2014. – 303 с.
5. Тельманова, Е. Д. Электрические и электронные аппараты : учебник / Е. Д. Тельманова. – Екатеринбург : РГППУ, 2010. – 131 с.
6. Электрические и электронные аппараты : учебное пособие / А. И. Гардин, А. Б. Лоскутов, А. А. Петров, С. Н. Юртаев. – Нижний Новгород : НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2014. – 303 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ	3
1.1. Электродинамическая стойкость аппаратов	3
1.2. Химическая стойкость ЭАП	6
1.3. Электрические контакты	11
1.4. Конструкция электрических контактов	17
1.5. Отключение электрических цепей	28
1.6. Отключение электрических цепей. Методы гашения дуги в отключающих аппаратах.....	33
1.7. Электромагниты. Основные сведения	37
1.7.1. Сила тяги в электромагнитах	42
2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ УПРАВЛЕНИЯ	48
2.1. Контактторы и магнитные пускатели	48
2.2. Автоматические воздушные выключатели (автоматы)	59
2.3. Выключатели высокого напряжения	67
2.4. Воздушные выключатели	72
2.5. Разъединители, отделители, короткозамыкатели	75
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	77
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	78

Учебное электронное издание

КОЗЛОВА Юлия Алексеевна
ТЕРЕХОВА Анастасия Анатольевна

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ АППАРАТЫ

Учебное пособие

Редактор Л. В. Комбарова
Графический и мультимедийный дизайнер Н. И. Кужильная
Обложка, упаковка, тиражирование Л. В. Комбарово́й

ISBN 978-5-8265-2741-2



Подписано к использованию 24.04.2024.

Тираж 50 шт. Заказ № 56

Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14
Тел./факс (4752) 63-81-08.
E-mail: izdatelstvo@tstu.ru