

## 4. Основы теории электрических аппаратов

### 4.1. Электродинамические усилия в электрических аппаратах

#### Общие положения

Физически электродинамические усилия (ЭДУ) в электрических аппаратах основаны на силе Лоренца. Это сила, которую оказывает магнитное поле на движущийся в нем электрический заряд:

$$\vec{F} = q \cdot (\vec{V} \times \vec{B}), \quad (4.1)$$

где  $q$  – электрический заряд;

$B$  – вектор магнитной индукции;

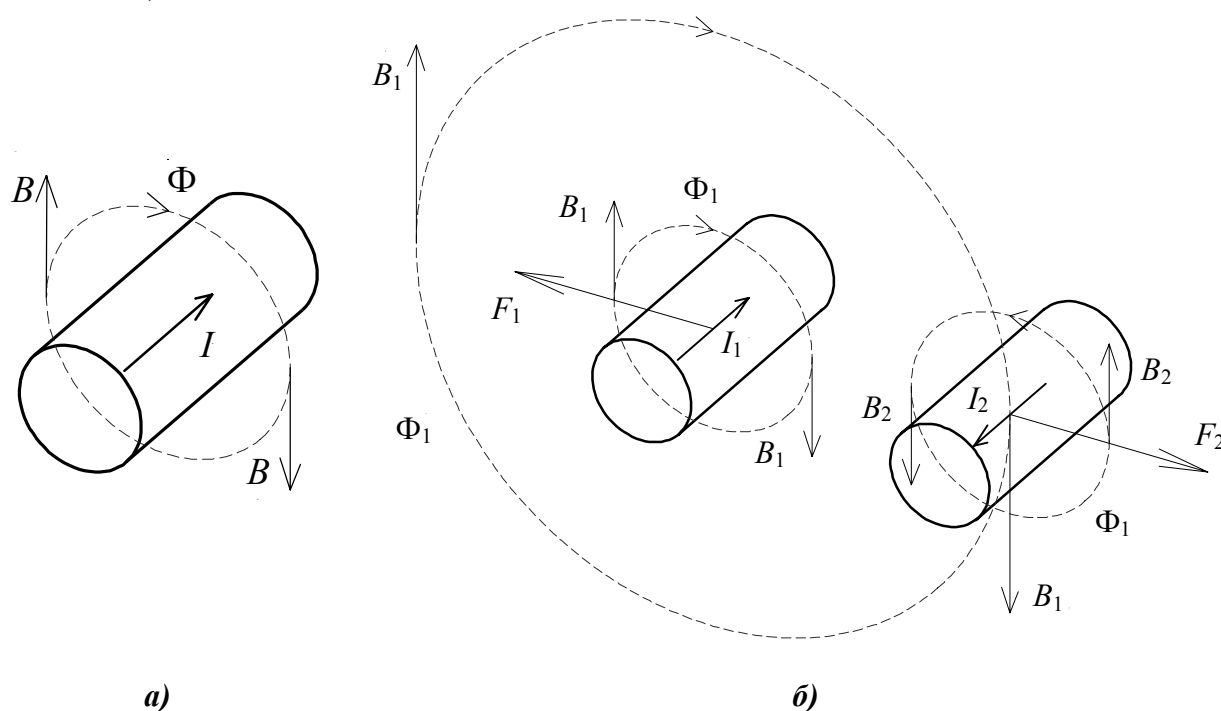
$V$  – скорость движения заряда.

Так как электрический заряд в проводниках связан с кристаллической решеткой проводника с током ( $I$ ), то это силовое воздействие передается на весь провод. Для случая с проводниками эта сила называется силой Ампера:

$$d\vec{F} = I \cdot (d\vec{l} \times \vec{B}), \quad (4.2)$$

где  $d\vec{l}$  – вектор, численно равный элементу проводника и направленный в ту же сторону, что и вектор плотности тока.

Направление вектора магнитной индукции определяется по правилу буравчика. Направление вектора  $d\vec{l}$  определяется направлением тока (рис. 4.1, а).



**Рис. 4.1. ЭДУ, возникающие в результате протекания токов по проводникам:**  
а – магнитное поле одного проводника; б – направление сил, действующих на проводники с токами, протекающими в разных направлениях

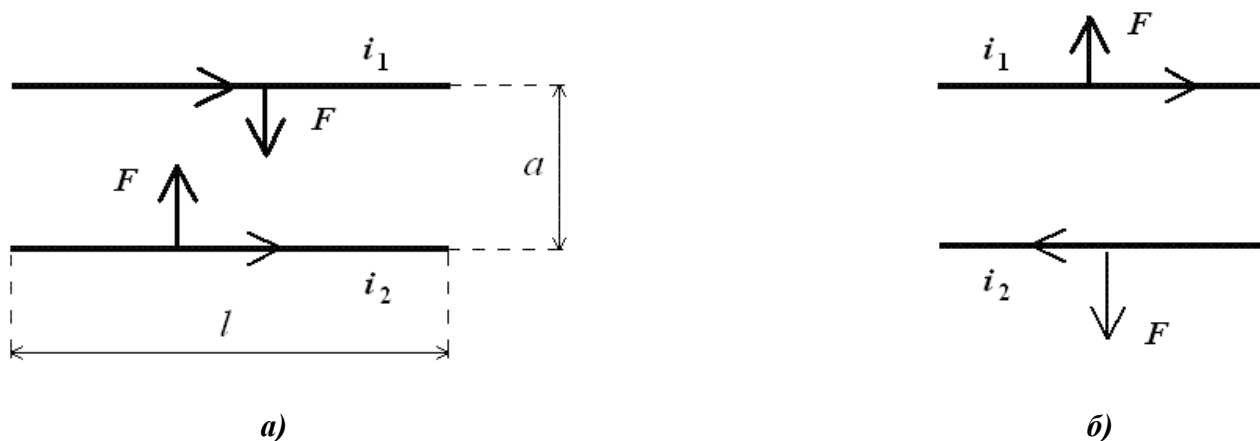
Направление силы определяется по правилу левой руки. Вектор  $B$  входит в ладонь, четыре пальца направлены вдоль тока, большой отогнутый палец покажет направление силы (рис. 4.1, б).

Определим направление силового воздействия, которое оказывает первый проводник с током на второй проводник с током:

а) определяем направление  $B_1$  в области проводника с током  $I_2$ ;

б) определяем направление силы по правилу левой руки. Получается, что проводник с током  $I_1$  отталкивается от проводника с током  $I_2$ . Это наиболее распространенный случай для однофазной сети, когда "прямой" и обратный проводники располагаются в непосредственной близости друг от друга. Аналогичные результаты получаем при рассмотрении силового воздействия, которое оказывает второй проводник с током на первый.

**Вывод.** Второй проводник притягивается к первому в случае одинакового направления тока (рис.4.2, а) и отталкивается в случае противоположного направления тока (рис.4.2, б).



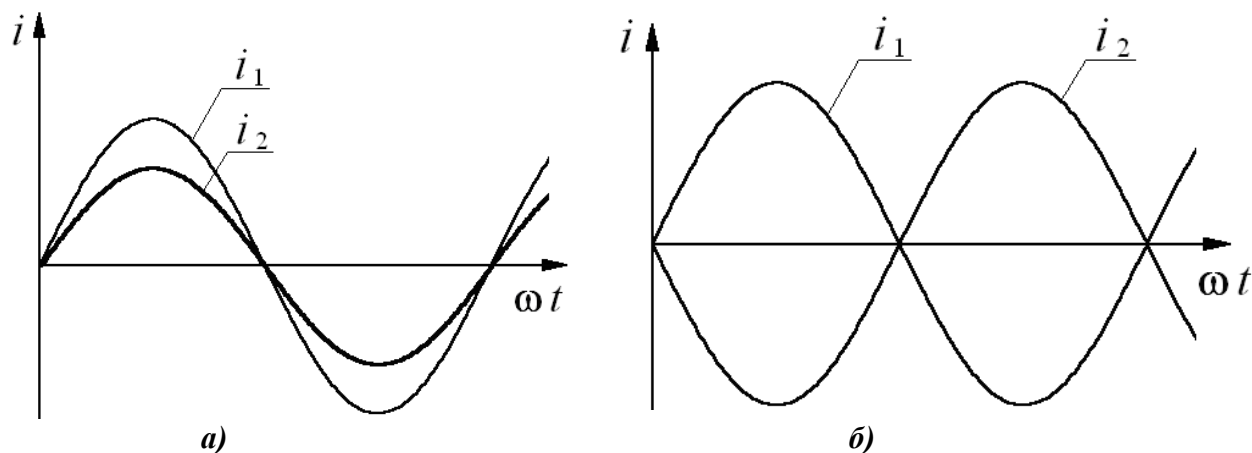
**Рис. 4.2. Силовое взаимодействие между двумя проводниками с током:**

а - направление сил при согласном направлении токов; б - направление сил при встречном направлении токов

ЭДУ действуют в электрических аппаратах всегда, но в аварийном режиме, когда возникают большие токи и большие магнитные потоки, усилия могут достигать таких значений, что способны изменить геометрию проводника, т.е. разрушить электрический аппарат. Способность электрических аппаратов противостоять ЭДУ называется *электродинамической стойкостью*.

Данная характеристика приводится в технических характеристиках электрических аппаратов в виде квадрата амплитуды тока  $i_y^2$ . В процессе проектирования каждый аппарат рассчитывается на стойкость противодействия ЭДУ.

На переменном токе проводники притягиваются, если токи совпадают по фазе (или если фаза меньше  $90^\circ$ ), и отталкиваются, если фаза между токами больше  $90^\circ$ . Максимальное значение сил достигается при фазе между токами в  $0^\circ$  и  $180^\circ$ .



**Рис. 4.3. Осциллограммы токов в проводниках:**

$i_1$  – ток, протекающий по первому проводнику;  $i_2$  – ток, протекающий по второму проводнику;  $a$  – фаза  $0^\circ$ ;  $b$  – фаза  $180^\circ$

### ***Расчет электродинамических усилий Способы расчета ЭДУ***

Существует два способа расчета ЭДУ.

1) на основе взаимодействия магнитного поля и тока по формуле Ампера. Величину магнитного поля определяют по закону Био-Савара-Лапласа. Этот способ расчета применяют только для простых контуров.

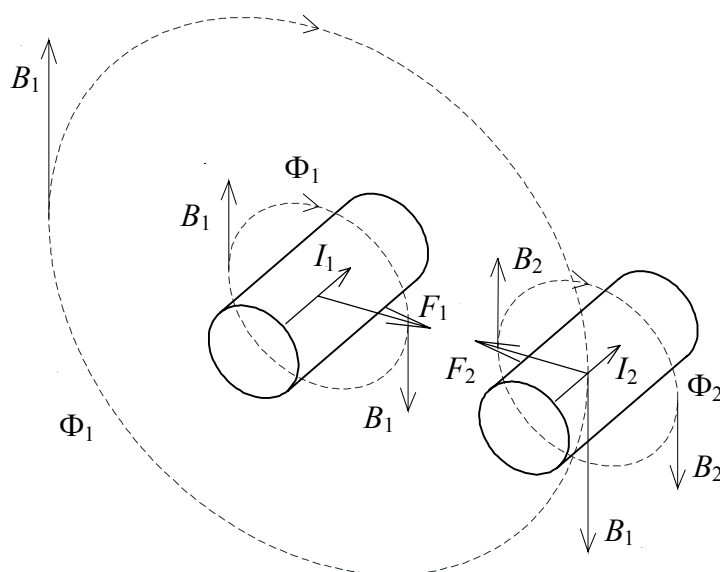
2) на основе изменения электромагнитной энергии проводника с током. Этот способ применяют для расчета сложных контуров:

$$F = dW / dx, \quad (4.3)$$

где  $dW$  – изменение энергии электромагнитного поля;

$dx$  – возможное перемещение в направлении переменной  $x$ .

*Следствие:* электромагнитная сила всегда направлена в сторону ослабленного магнитного поля.



**Рис. 4.4. ЭДУ, действующие на проводники с токами, протекающими в одном направлении**

### ЭДУ между проводниками

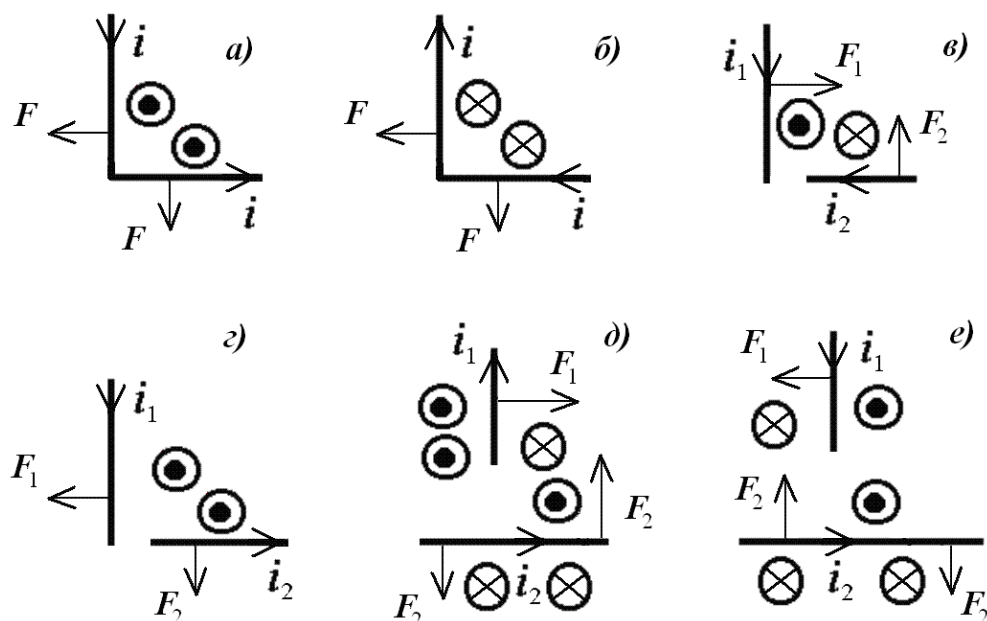
Сила, возникающая между двумя проводниками, определяется по выражению:

$$F = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot k_K \cdot k_\Phi = 10^{-7} \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot k_K \cdot k_\Phi, \quad (4.4)$$

где  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  (Гн/м);

$k_K$  – коэффициент контура, зависит от взаимного расположения проводников ( $k_K = 2l/a$  – для параллельных проводников, см. рис. 4.2);

$k_\Phi$  – коэффициент формы, зависит от размеров проводника и для цилиндрических проводников  $k_\Phi = 1$ .

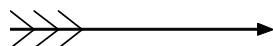


**Рис. 4.5.** Действие сил для различных форм проводников, располагающихся в одной плоскости

*Примеры анализа:* а) изогнутый проводник с током  $I$ , поле во внутренней области, охватываемой проводником усилено, а в наружной – ослаблено. Так как сила направлена в сторону ослабленного поля, то проводник стремится переместиться влево-вниз.

*Примечание.* При обозначении направления вектора на плоском чертеже используются следующие графические символы:

- ⊗ – вектор "уходит за плоскость чертежа (видно "оперение" стрелы),
- ⊙ – вектор "приходит" из-за плоскости чертежа (видно острие стрелы).



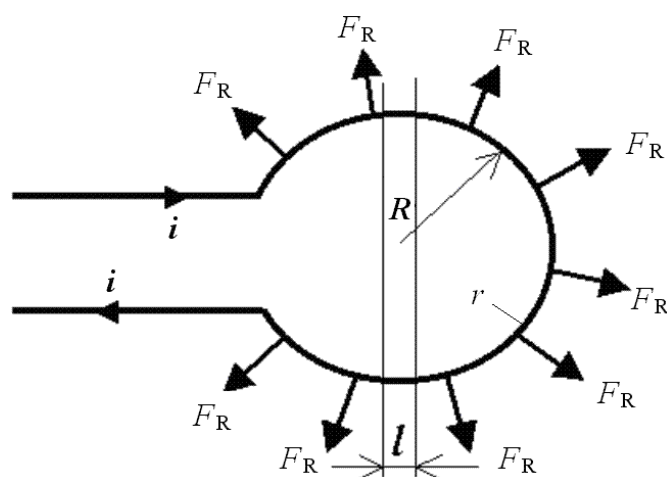


### ***ЭДУ в кольцевом витке и между кольцевыми витками***

Любой кольцевой виток стремится разорваться. Элементы противоположных сторон витка можно рассматривать как два параллельных проводника, по которым течет ток, сдвинутый по фазе на  $180^\circ$  (см. рис.4.2, б), т.е. витки катушки будут стремиться разорваться

Сила, действующая в этом случае:

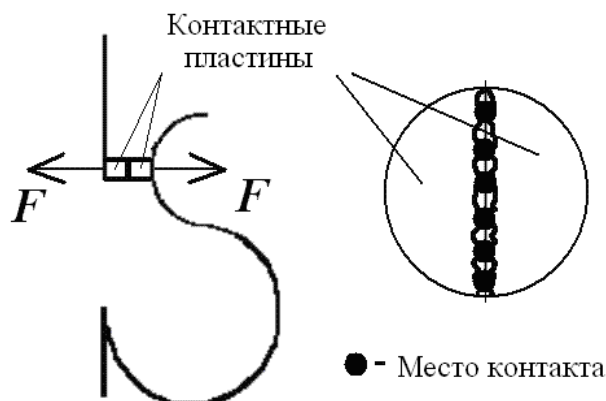
$$F_R = 10^{-7} \cdot i^2 \cdot \left( \ln \frac{8 \cdot R}{r} - 0,75 \right) . \quad (4.5)$$



**Рис. 4.6. ЭДУ в кольцевом витке**

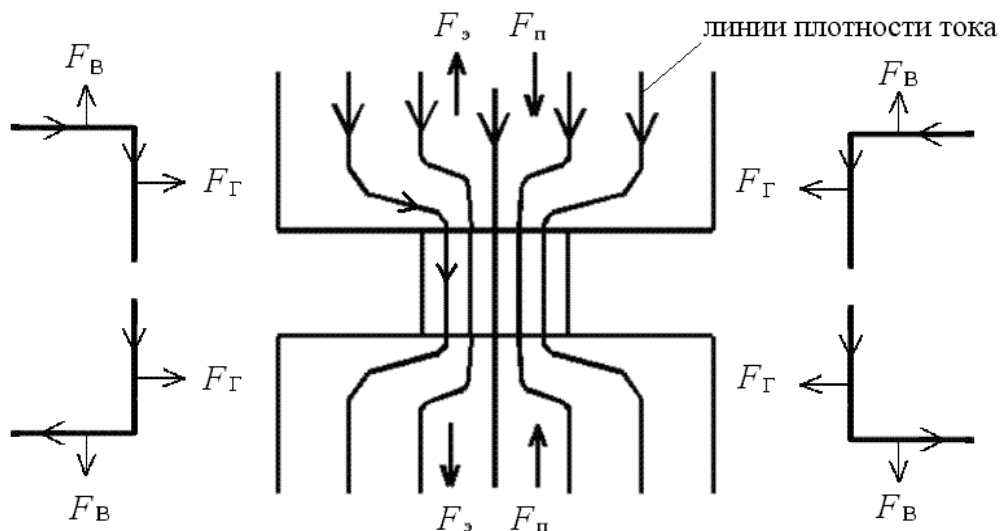
Межкольцевые витки представляют собой проводники с током согласного направления (см. рис. 4.2, а), поэтому проводники притягиваются друг к другу. Таким образом, проводники, сформированные в катушку, никогда не распадутся.

### ***ЭДУ в проводниках переменного сечения***



**Рис. 4.7. ЭДУ в контактной системе автоматического выключателя**

Контактирование происходит не по всей поверхности, а в отдельных точках в силу неровностей (шероховатости) любой, даже тщательно обработанной поверхности.



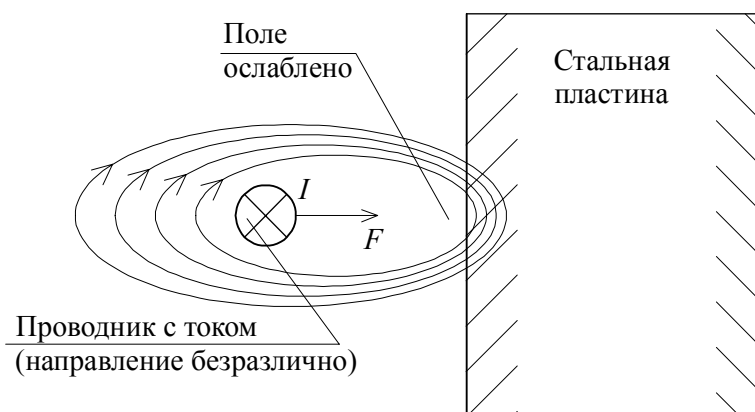
**Рис. 4.8.** Модель точечного контакта - три проводника переменного сечения

Горизонтальные электродинамические силы  $F_Г$  взаимно компенсируются, а вертикальные  $F_В$  - образуют результирующие силы  $F_Э$ , которые будут направлены в различные стороны. Таким образом, электрический контакт всегда стремится саморазорваться. Силы, которые стремятся разорвать контакт, малы при номинальных токах и значения их возрастают при токах короткого замыкания. Силы противодействующих пружин  $F_П$  должны препятствовать разрыву контакта.

### ***ЭДУ между проводником с током и ферромагнитной массой***

#### ***Проводник с током около ферромагнитной массы***

Силовые линии магнитного поля стремятся замкнуться через магнитный материал, и магнитное поле между проводником с током и ферромагнитной массой получается ослабленным. Именно в сторону ослабленного магнитного поля и направлена сила, и проводник с током (например, электрическая дуга) притягивается к магнитному материалу. На этом же принципе основано действие магнитного замка. Следовательно, сила  $F$  будет стремиться затягивать проводник с током внутрь ферромагнитной массы.



**Рис. 4.9.** Проводник с током вне стальной пластины

### Проводник с током внутри ферромагнитной массы

Поле между “проводником с током” и границей ферромагнитной массы усилено. Следовательно, сила  $F$  будет стремиться затягивать проводник с током внутрь ферромагнитной массы. Дойдя до противоположной границы, он будет отталкиваться внутрь ферромагнитной массы. Таким образом, электрическая дуга, “единожды затянутая” в стальную пластину, не сможет “выйти” из неё.

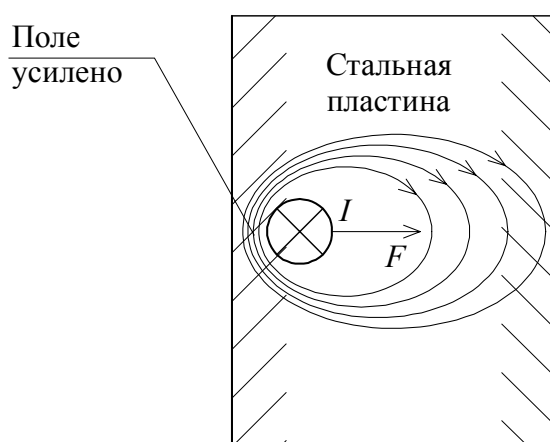


Рис. 4.10. Проводник с током внутри стальной пластины

### Проводник с током около фигурных стальных пластин дугогасительной решетки (ферромагнитной массы)

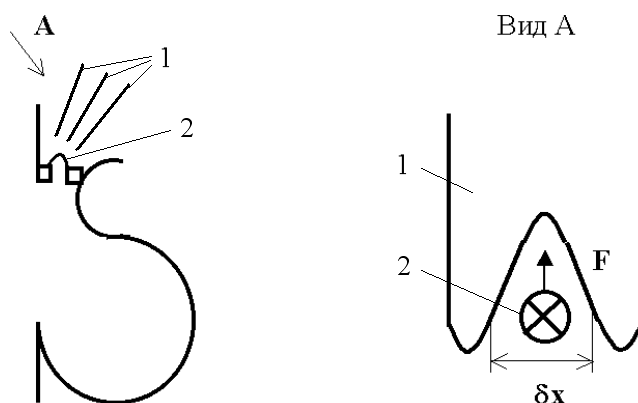


Рис. 4.11. Проводник с током вне фигурной стальной пластины:

1 – стальная пластина дугогасительной решетки; 2 – электрическая дуга

Сила, действующая на дугу:

$$F = 0,63 \cdot 10^{-6} \cdot i^2 \cdot \frac{l}{\delta_x}, \quad (4.6)$$

где  $l$  – толщина пластины;

$\delta_x$  – расстояние между границами пластины.

При затягивании дуги происходит уменьшение расстояния  $\delta_x$ , и сила, действующая на дугу, увеличивается по мере сужения щели.

### **ЭДУ при переменном токе**

Всё перечисленное ранее, справедливо и для переменного тока, только сила, возникающая при этом, будет иметь переменное (во времени, но не в пространстве) значение.

*а) переменный однофазный ток.*

Ток изменяется по синусоидальному закону:

$$i = I_m \cdot \sin \omega t . \quad (4.7)$$

Подставим ток в выражение (4.4) и для случая рис.4.5, *а* получим силу:

$$F_t = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot i^2 \cdot k_k = C \cdot i^2 = C \cdot I_m^2 \cdot \sin^2 \omega t , \quad (4.8)$$

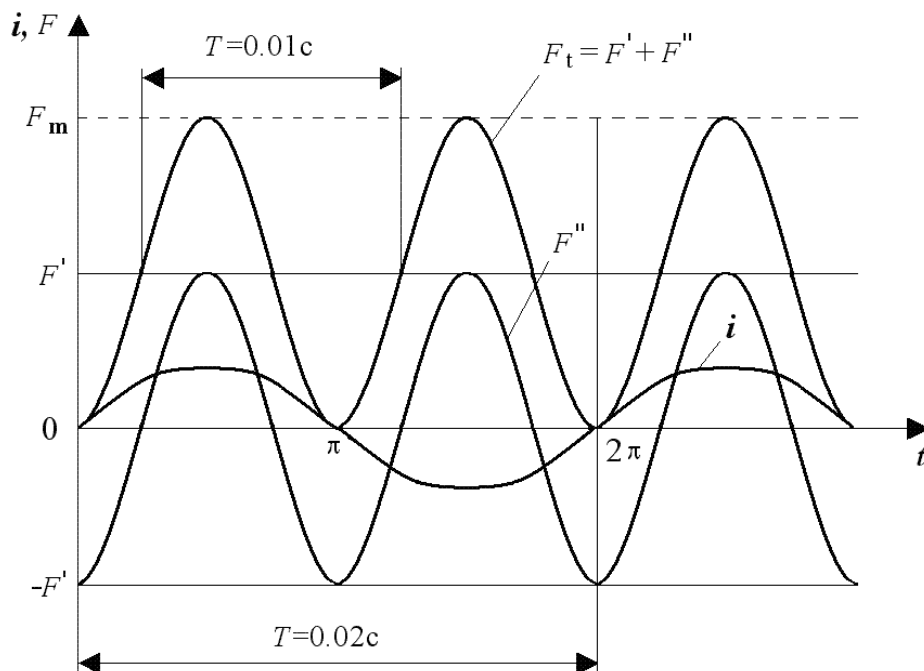
где  $C = \frac{\mu_0}{4\pi} k_k$  - постоянная величина. Учтем, что  $\sin^2 \omega t = \frac{1 - \cos 2\omega t}{2}$ , перепишем формулу (4.8):

$$F_t = \frac{C \cdot I_m^2}{2} - \frac{C \cdot I_m^2}{2} \cdot \cos 2\omega t = F' - F' \cdot \cos 2\omega t . \quad (4.9)$$

Введем следующие обозначения:

$$F' = \frac{C \cdot I_m^2}{2} = \frac{\mu_0 \cdot I_m^2 \cdot k_k}{8\pi} ; \quad F'' = -F' \cdot \cos 2\omega t . \quad (4.10)$$

Таким образом, на переменном токе сила состоит из двух составляющих: постоянной ( $F'$ ) и переменной ( $F''$ ), изменяющейся во времени с удвоенной частотой и с той же амплитудой  $F'$ , что и постоянная составляющая. Изобразим это графически на рис. 4.12:  $F_t = F' + F''$ .



**Рис. 4.12.** Сила, возникающая в результате протекания переменного тока по проводнику

Переменная сила всегда располагается выше оси абсцисс, изменяется с двойной частотой, (т.е. всегда положительна, не изменяет свой знак, а значит и направление). В момент перехода тока через ноль сила снижается до нуля.

Определим величину максимальной силы  $F_m$ :

$$F_m = 2 \cdot F' = 2 \cdot \frac{\mu_0}{8\pi} \cdot k_K \cdot I_m^2 = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot k_K \cdot I^2, \text{ т.к. } I_m = \sqrt{2} \cdot I, \quad (4.11)$$

где  $I$  – действующее значение тока.

На переменном токе сила в два раза больше, чем при таком же действующем значении постоянного тока.

При коротком замыкании в первый полупериод возникает ударное значение тока:

$$i_y = k_y \cdot \sqrt{2} \cdot I, \quad (4.12)$$

где  $k_y$  – ударный коэффициент,  $k_y = 1,8$ :

$$F_{\max} = C \cdot i_y^2 = 6,48 \cdot \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot k_K \cdot I^2. \quad (4.13)$$

При коротком замыкании возникает ударная сила, которая в 6,48 раз превышает значение силы при таком же действующем значении постоянного тока.

б) *переменный трёхфазный ток.*

Рассмотрим три проводника, идущие параллельно (рис. 4.13).

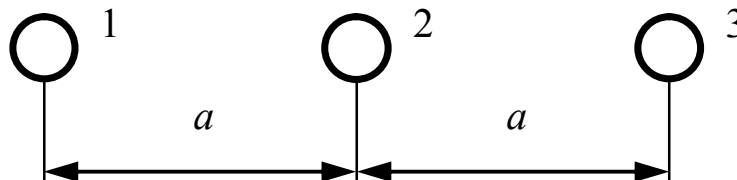


Рис. 4.13. ЭДУ при трёхфазном токе

Токи, протекающие по проводникам, сдвинуты на угол  $120^\circ$ . На проводник 2 оказывают силовое воздействие проводники 1 и 3. Это силовое воздействие будет максимальным:

$$F_{(1+3)/2} = 0,866 \cdot \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot k_K \cdot I_m^2. \quad (4.14)$$

На переменном трёхфазном токе электродинамические силы меньше, чем при переменном однофазном токе.

в) *механический резонанс.*

Механический резонанс возникает при совпадении частоты электродинамической силы с собственной частотой колебания механической системы. В этом случае деформация механической системы с каждым периодом будет возрастать и в какой-то момент механическая система

разрушится. Поэтому при проектировании специально рассчитывается, чтобы таких совпадений не возникало.

## **4.2. Нагрев электрических аппаратов**

### ***Источники тепловой энергии в электрических аппаратах***

1. *Нагрев проводников с током* (нагрев методом электрического сопротивления). Энергия, которая выделяется в проводнике при протекании по нему тока, определяется по экспериментальному закону Джоуля-Ленца,

$$W_Q = I^2 \cdot R \cdot t, \quad (4.15)$$

который формулируется следующим образом: в любом теле, обладающем электрическим сопротивлением, выделяется тепловая энергия, пропорциональная квадрату тока, сопротивлению и времени протекания тока.

На постоянном токе электрическое сопротивление проводника определяется:

$$R_{\sim} = \rho \cdot \frac{l}{S}. \quad (4.16)$$

На переменном токе электрическое сопротивление проводника определяется:

$$R_{\sim} = R \cdot k_D, \quad (4.17)$$

где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление;

$l$  – длина проводника;

$S$  – площадь сечения проводника;

$k_D$  – коэффициент добавочных потерь:

$$k_D = k_{\Pi} \cdot k_{\text{Б}}, \quad (4.18)$$

где  $k_{\Pi}$  – коэффициент поверхностного эффекта;

$k_{\text{Б}}$  – коэффициент близости.

Данная энергия идёт на нагрев токопроводящих частей самого аппарата, нагрев прилегающих материалов и нагрев окружающей среды по законам теплопередачи (теплопроводностью, конвекцией и тепловым излучением).

2. *Энергия, выделяющаяся в деталях из ферромагнитных материалов* (в нетоковедущих ферромагнитных частях).

В электрических аппаратах выделяют два вида ферромагнитных материалов: 1) *магнитопроводы* и 2) *конструктивные узлы*, выполненные из стальных деталей. Магнитопроводы предназначены для усиления магнитного поля, создаваемого проводником с током.

1) различают две причины нагрева магнитопроводов:

а) *нагрев от вихревых токов*.

Рассмотрим элемент магнитопровода с проходящим переменным магнитным потоком  $\Phi$  (см. рис.4.14).

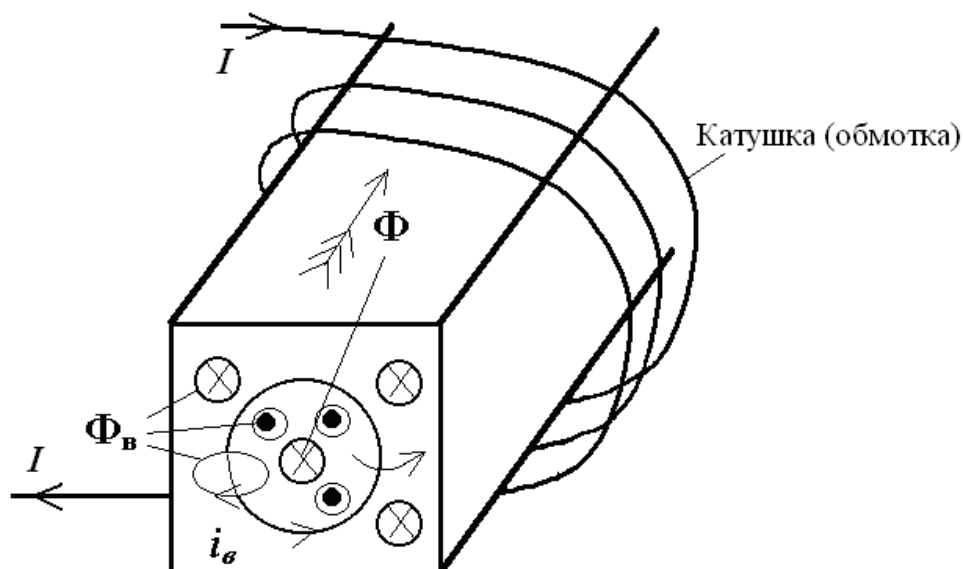


Рис. 4.14. Возникновение вихревых токов в магнитопроводе при протекании по катушке переменного тока

При прохождении магнитного потока  $\Phi$  в магнитопроводе появляется электродвижущая сила (ЭДС), согласно закону электромагнитной индукции:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (4.19)$$

Под действием этой ЭДС, согласно закону Ома, возникает вихревой ток  $i_\epsilon$  такого направления, при котором создаваемые им магнитные потоки противодействуют изменению основного потока  $\Phi$  (правило Ленца).

При протекании вихревых токов по магнитопроводу, согласно закону Джоуля-Ленца (см. 4.15), происходит преобразование электрической энергии в тепловую. Для уменьшения данного вида потерь магнитопроводы выполняются шихтованными, т.е. набранными из пластин электротехнической стали толщиной 0,2 – 0,5 мм, тщательно изолированными друг от друга. Этим самым исключается контур протекания вихревого тока, как основного источника потерь, а также происходит разбиение магнитного потока по отдельным пластинам. В пределах одной пластины величина магнитного потока уменьшается, от чего уменьшается скорость его изменения, а значит уменьшается и величина ЭДС, и величина вихревого тока.

б) *потери на гистерезис* физически представляют собой энергию, которая затрачивается на поворот доменов ферромагнитного материала стали.

*Полные потери в стали магнитопровода  $P_{CT}$  на гистерезис и вихревые токи:*

$$P_{CT} = (K_\Gamma \cdot B_m^{1,6} + K_B \cdot f \cdot B_m^2) \cdot f \cdot G_T, \quad (4.20)$$

где  $K_\Gamma$  – коэффициент потерь от гистерезиса (1,9 – 2,6),

$k_B$  – коэффициент потерь от вихревых токов (0,4 – 1,2),

$B_m$  – амплитуда вектора магнитной индукции,

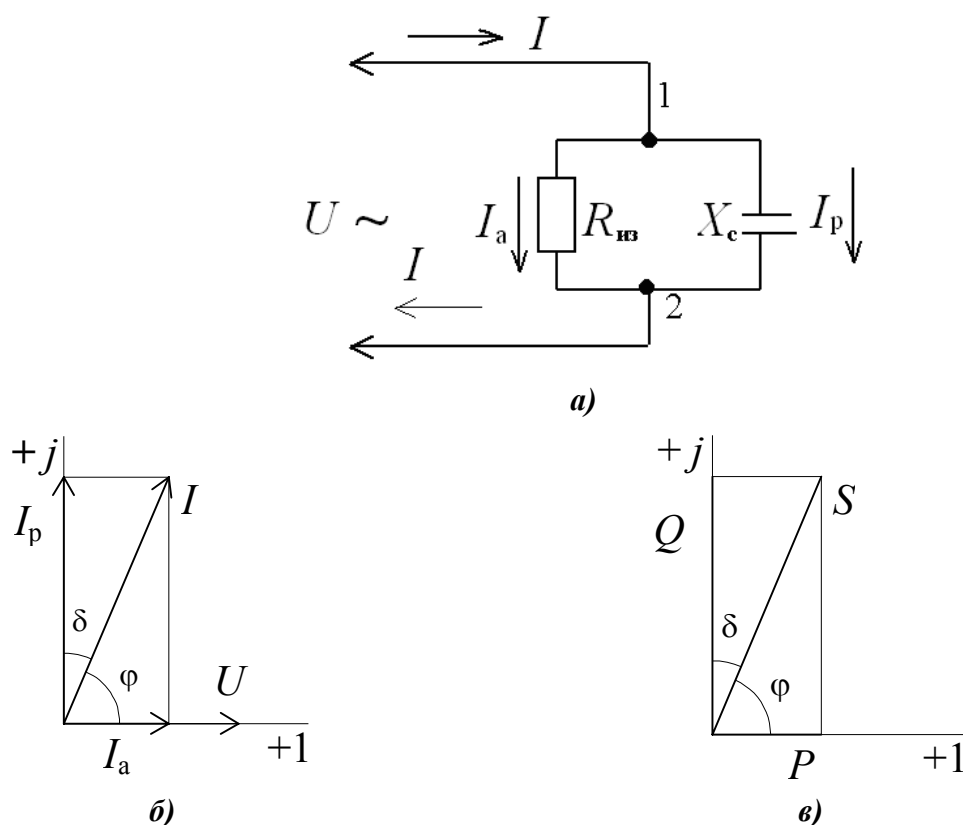
$G_T$  – масса магнитопровода,  
 $f$  – частота.

2) *выделение энергии в конструктивных узлах электрических аппаратов, выполненных из стальных деталей*, происходит по той же схеме, что и в магнитопроводе, т.е. также есть потери от вихревых токов и потери на гистерезис. Для снижения потерь в стальных деталях используются следующие мероприятия:

а) введение немагнитных зазоров на пути магнитного потока;  
 б) надевание на стальные конструкции короткозамкнутого витка с малым активным сопротивлением. При этом в нём индуцируется ЭДС, под действием которой протекает вихревой ток короткозамкнутого витка, который создает магнитный поток, направленный встречно основному. В результате величина магнитного потока уменьшается, уменьшается ЭДС и вихревой ток в магнитопроводе, снижаются потери от его протекания.

в) в электрических аппаратах с токами выше 1000 А вообще не должно быть стальных деталей. Все детали изготавливаются из немагнитных материалов (алюминий, пластмасса, бронза).

3. *Выделение энергии в изоляции электрического аппарата. Изоляция моделируется следующей схемой замещения:*



**Рис. 4.15. Выделение энергии в изоляции:**

*а – схема замещения изоляции; б – треугольник токов, в – треугольник мощностей*



По первому закону Кирхгофа для узлов 1 и 2:  $I = I_a + I_p$  получаем треугольник токов. Активный ток совпадает по направлению с напряжением, а реактивный на конденсаторе опережает напряжение на  $90^\circ$ .

При умножении векторов тока на напряжение (общее для обеих цепей) получим треугольник мощностей.

Выразим из треугольника мощностей активную мощность:

$$P = Q \cdot \operatorname{tg} \delta = \frac{U^2}{X_C} \cdot \operatorname{tg} \delta = \frac{U^2}{\frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}} \cdot \operatorname{tg} \delta = 2\pi \cdot f \cdot C \cdot U^2 \cdot \operatorname{tg} \delta, \quad (4.21)$$

где  $Q$  – реактивная мощность;

$\operatorname{tg} \delta$  – тангенс угла диэлектрических потерь (0,005 – 0,0001);

$X_C$  – емкостное сопротивление;

$C$  – ёмкость изоляции.

Появление дефектов в отдельных местах твёрдой изоляции приводит к увеличению  $\operatorname{tg} \delta$  и способно вызвать тепловой пробой изоляции. Изоляция меняет свою структуру и становится проводящей.

#### *4. Другие виды источников теплоты в электрических аппаратах:*

а) энергия, выделяемая в электрических дугах - в коммутационных аппаратах, особенно при частых ВО;

б) при трении между собой отдельных элементов электрических аппаратов.

Нагрев электрических аппаратов вызывает ускоренное старение изоляции и повышает скорость окисления электрических контактов, что снижает срок службы электрических аппаратов.

#### ***Уравнение теплового баланса при нагреве однородного проводника во времени при продолжительном режиме работы***

После включения аппарата температура его элементов не сразу достигает установившихся значений. Так, в силу инерционности теплопередачи тепло частично идет на повышение его температуры и частично отдается в окружающее пространство. Рассмотрим этот процесс на примере проводника с током, включенным в электрическую цепь последовательно с нагрузкой. В этом случае величина тока  $I$  определяется величиной сопротивления нагрузки и является неизменной. При этом мощность, выделяемая в проводнике, будет величиной постоянной:

$$P = I^2 \cdot R_0 = \operatorname{const}, \quad (4.22)$$

где  $R_0$  – сопротивление элемента проводника с током.

Допускаем, что его сопротивление мало изменяется с ростом температуры проводника.

Энергия, выделяемая в проводнике с током, может быть разделена на две составляющие:

- нагрев самого проводника;
- нагрев окружающей среды.

Запишем уравнение теплового баланса в дифференциальной форме:

$$Pdt = c \cdot Gd\tau + F \cdot k_T \cdot \tau dt, \quad (4.23)$$

где  $Pdt$  – энергия, поступающая в проводник ( $P$  – активная мощность,  $t$  – время);

$c$  – удельная теплоёмкость проводника, [Дж/кг · град];

$G$  – масса проводника, [кг];

$F$  – поверхность проводника, [м<sup>2</sup>];

$k_T$  – коэффициент теплоотдачи – количество теплоты, которое отдаётся за 1 секунду всеми видами теплопередачи с 1м<sup>2</sup> теплоотдающей поверхности при разности температуры нагретого тела и окружающего пространства 1° [Вт/м<sup>2</sup> · град]:

- $k_T$  на воздухе = 10-16,
- $k_T$  в масле = 25-100;

$\tau$  – превышение температуры проводника над температурой окружающей среды, разность температур проводника  $\theta_{\text{пров}}$  и окружающей среды  $\theta_{\text{окр}}$ , град:

$$\tau = \theta_{\text{пров}} - \theta_{\text{окр}}, \quad (4.24)$$

где  $d\tau$  – приращение данного превышения за время  $dt$ .

Так как температура проводника повышается в процессе нагрева, то  $\tau$  – величина переменная (различная для каждого момента времени при нагреве или охлаждении).

Разделим выражение (4.23) на множители:  $c$ ,  $G$ ,  $dt$ :

$$\frac{P}{c \cdot G} = \frac{d\tau}{dt} + \tau \cdot \frac{F \cdot k_T}{G \cdot c}. \quad (4.25)$$

Решение этого уравнения имеет вид:

$$\tau = \tau_0 \cdot e^{-\frac{t}{T}} + \tau_Y \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T}}), \quad (4.26)$$

где  $\tau_0$  – превышение температуры проводника над температурой окружающей среды в начале процесса нагрева (при  $t = 0$ );

$\tau_Y$  – установившееся превышение температуры.

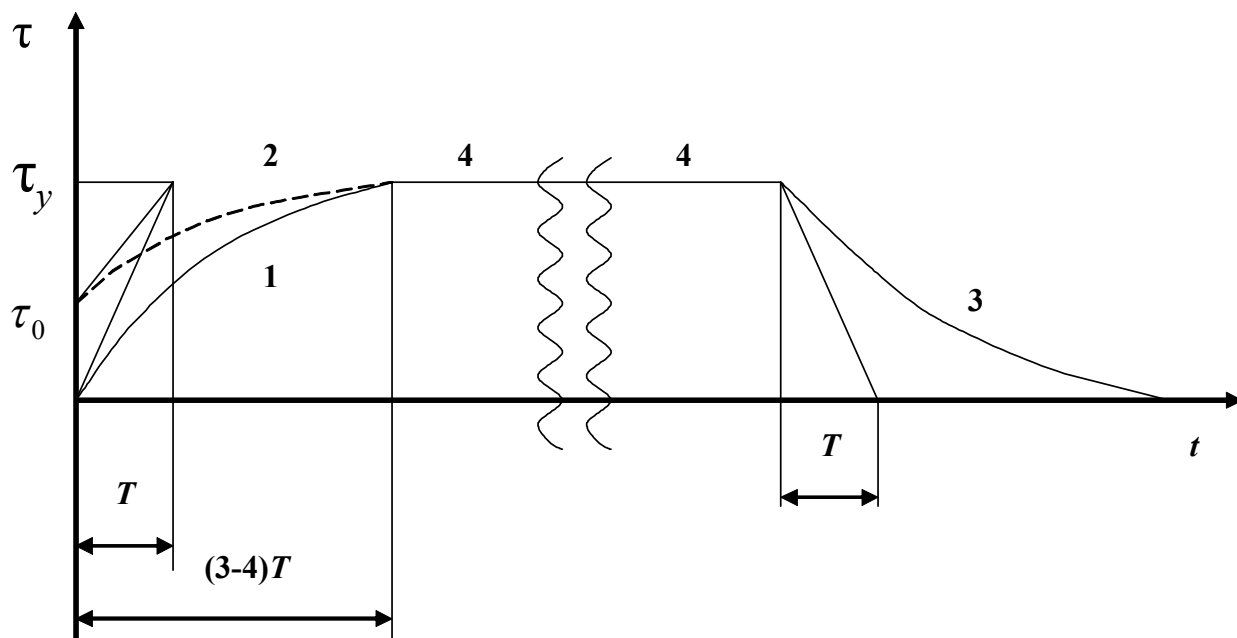
Графическое решение этого уравнения имеет вид, изображенный на рис. 4.16. В установившемся режиме, когда температура тела уже не повышается (вся энергия, выделенная в нем, идет только на теплообмен с

окружающей средой). Изменение превышения температуры тела над температурой окружающей среды становится равным нулю  $d\tau = 0$ . Из уравнения (4.23) выразим  $\tau_y$ :

$$\tau_y = \frac{Pdt}{k_T \cdot Fdt} = \frac{P}{k_T \cdot F} \cdot \quad (4.27)$$

Если бы не происходила отдача тепла в окружающую среду, то нагрев проводника, до установившейся температуры, осуществлялся бы за время  $T$ , которое получило название  $T$  - *постоянная времени нагрева*.

$T = \frac{c \cdot G}{k_T \cdot F}$  – время, за которое нагрелся бы проводник до значения установившейся температуры  $\Theta_{уст}$ , если бы отдача в окружающую среду отсутствовала. В этом случае графический процесс нагрева осуществляется по прямой, касательной к графику нагрева  $\tau(t)$  в начале нагрева (охлаждения). Очевидно, что чем больше  $T$ , тем медленнее происходит нагрев (охлаждение).



**Рис. 4.16. Нагрев проводника при продолжительном режиме работы:**

1 – нагрев проводника от температуры, равной температуре окружающей среды  $\tau = 0$ ; 2 – нагрев проводника от температуры, отличающейся от температуры окружающей среды  $\tau_0 > 0$ ; 3 – охлаждение проводника; 4 – установившийся режим

В обоих случаях (1 и 2) нагрев происходит за одно и то же время, изменяется лишь скорость нагрева.

В установившемся режиме вся тепловая энергия, выделяющаяся в проводнике, отдаётся в окружающую среду и кривая нагрева приобретает вид прямой линии, проходящей параллельно оси абсцисс.

Если время нагрева меньше  $0,1T$ , то потерями в окружающую среду пренебрегают. Чем более массивен проводник, тем медленнее он нагревается.

### Охлаждение проводника

Допустим ток, протекающий по проводнику, прекратится:

$$Pdt = 0; \quad 0 = c \cdot Gd\tau + F \cdot k_T \cdot \tau dt. \quad (4.28)$$

Решение этого уравнения имеет вид:

$$\tau = \tau_0 \cdot e^{-\frac{t}{T}}, \quad (4.29)$$

при  $\tau_0 = \tau_{уст}$  - кривая 3 - зеркальное отображение кривой нагревания.

#### *Длительно допустимый ток токоведущих частей*

Каждый электрический аппарат обычно по условиям изоляции имеет допустимую температуру нагрева  $\theta_{доп}$ . Выразим в уравнение (4.27)  $\tau_y$  через температуру окружающей среды и допустимую температуру провода:

$$\theta_{доп} - \theta_{окр.ср} = \tau_{уст} = \frac{P}{k_T \cdot F} = \frac{I^2 \cdot R}{k_T \cdot F}. \quad (4.30)$$

Выразим ток из выражения (4.30), и определим его как ток, который можно пропускать по токоведущим частям электрического аппарата, (кабелю, проводу) и при этом температура электрического аппарата (кабеля, провода) не превысит допустимого значения. Такой ток получил название длительно-допустимого (номинального) тока:

$$I_{доп(ном)} = \sqrt{F \cdot k_T \cdot \frac{\theta_{доп} - \theta_{окр.ср}}{R}}. \quad (4.31)$$

Для электрических аппаратов номинальный ток - это ток, длительное протекание которого не вызывает нагрева электрического аппарата сверх заданной температуры.

Проанализируем формулу (4.31).

Если в электрическом аппарате (кабеле, проводе) материал токоведущих частей заменить, с алюминия на медь, сохраняя конструктивные размеры, то это приведет к уменьшению активного сопротивления  $R$ . Уменьшится знаменатель формулы (4.31). И значение номинального тока данного аппарата (кабеля, провода) увеличится.

Аналогичный результат (увеличение номинального тока) можно получить, если увеличить поверхность охлаждения  $F$ , т.е. улучшить условия охлаждения, или увеличить коэффициент теплоотдачи, (например, за счет изменения способа прокладки кабеля перенеся его с эстакады в земляную траншею), или увеличить возможную допустимую температуру  $\theta_{доп}$  за счет использования другого класса изоляции.

### Нагрев электрических аппаратов при коротком замыкании

Токоведущие элементы аппарата, рассчитанные для длительного режима, должны быть проверены, на способность противостоять токам аварийного режима. Наиболее тяжелый режим – короткое замыкание (КЗ) в электрической сети.

Допустимую температуру токоведущих частей  $\Theta_{\text{КЗ}}$  для коротких замыканий обычно принимается в 2-4 выше, чем при нормальном режиме. Это объясняется следующим:

КЗ возникают довольно редко и на непродолжительный отрезок времени (до момента отключения защитой). Далее аппарат имеет возможность восстановить свою температуру. Вводится понятие *термическая стойкость* - это способность электрического аппарата не переходить в состояние отказа при протекании тока определённой величины и длительности без превышения  $\Theta_{\text{доп}}$  короткого замыкания.

В справочниках приводится величина  $B$  - тепловой импульс:

$$B = I^2 \cdot t. \quad (4.32)$$

Зная  $B$  и время действия защиты, можно рассчитать ток, который способен пропустить данный электрический аппарат в режиме КЗ и сравнить его с расчетным током КЗ в данной точке электрической схемы:

$$I = \sqrt{\frac{B}{t}}. \quad (4.33)$$

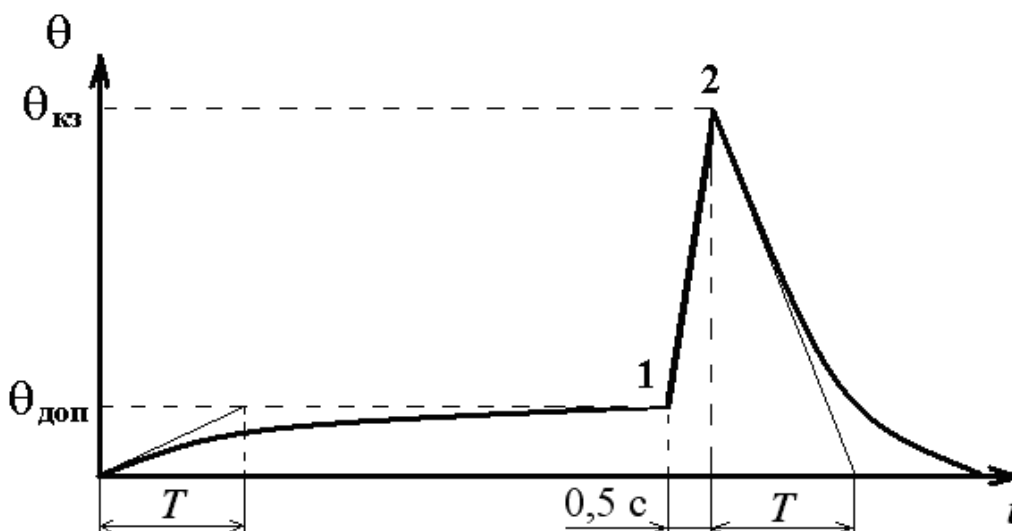


Рис. 4.17. Нагрев аппарата при коротком замыкании:

1 – момент короткого замыкания; 2 – момент отключения короткого замыкания;  $T \gg 0,5$  с

Так как действие релейной защиты в среднем равно 0,5 с (длительность интервала между моментом 1 и 2 составляет 0,5 с), то можно допустить, что за период от начала короткого замыкания до момента его отключения защитой,

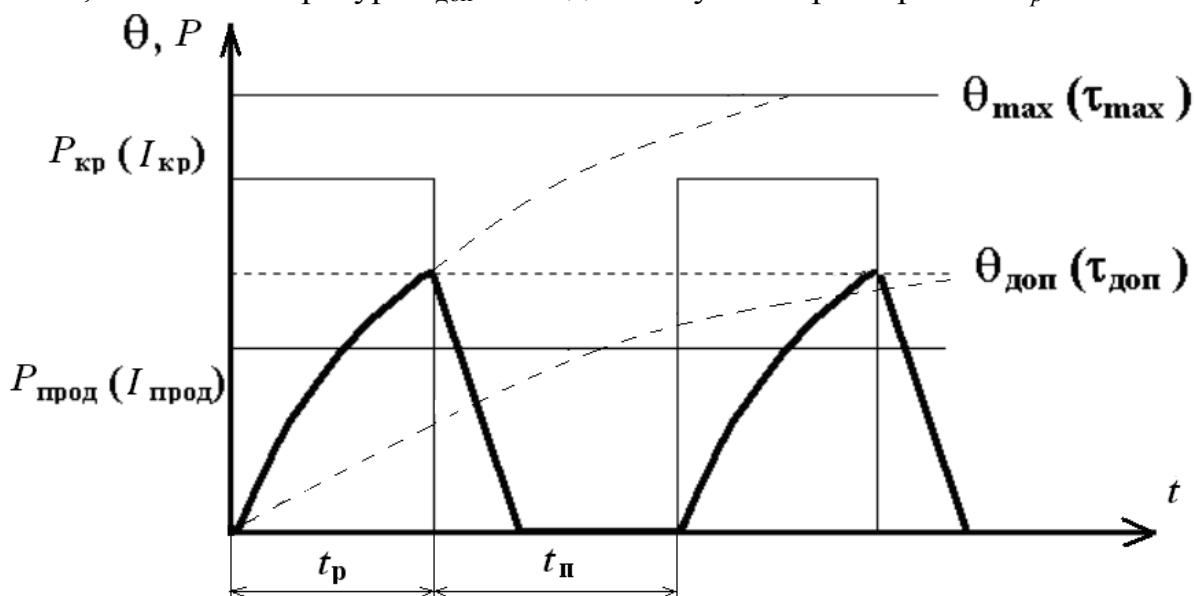
вся энергия идет только на нагрев электрического аппарата, а теплопередача в окружающую среду составляет 1 – 3% от всей энергии выделяемой в аппарате.

### ***Нормальный режим работы аппаратов***

#### ***Нагрев электрических аппаратов в кратковременном режиме***

Кратковременным называется режим, когда в период работы температура электрического аппарата не достигает своего установившегося значения, а в период пауз тока температура успевает снизиться до температуры окружающей среды.

Аппарат можно "перегрузить", пропустить через него больший ток таким образом, чтобы температура  $\theta_{\text{доп}}$  была достигнута за время работы  $t_p$ .



**Рис. 4.18. Нагрев аппарата при его работе в кратковременном режиме**

Коэффициент перегрузки по мощности определяется из соотношения:

$$K_P = \frac{P_{\text{кр}}}{P_{\text{прод}}} = \frac{\tau_{\text{max}}}{\tau_{\text{доп}}} = \frac{1}{1 - e^{-\frac{t_p}{T}}}, \quad (4.34)$$

где  $P_{\text{кр}}$  — мощность, выделяемая в проводнике в кратковременном режиме работы;

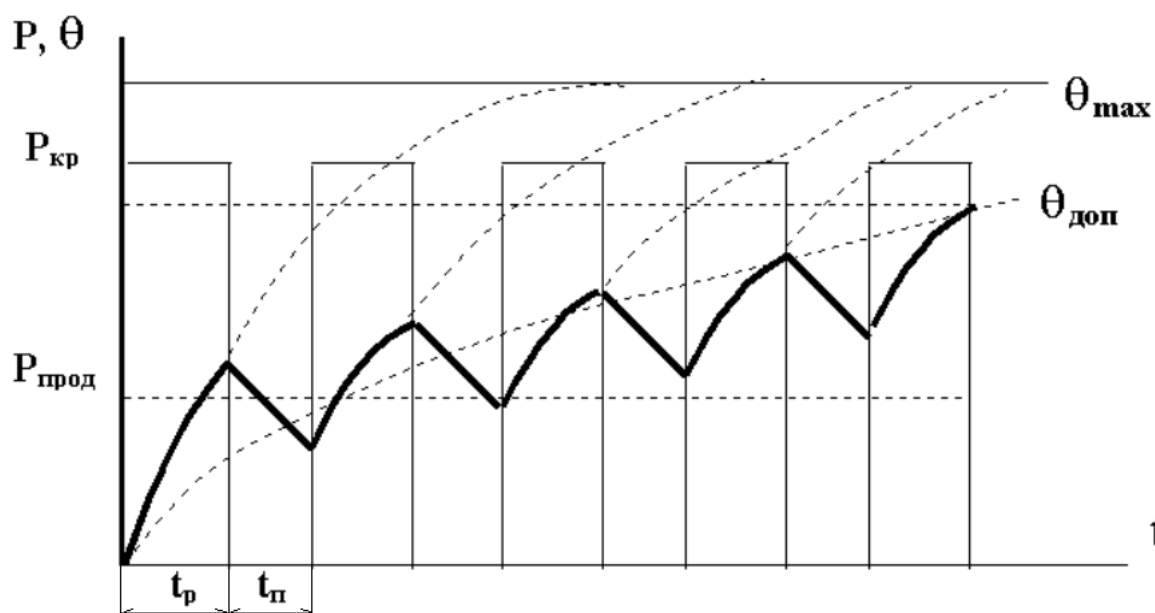
$P_{\text{прод}}$  — мощность, выделяемая в проводнике в продолжительном режиме работы;

$K_I = \sqrt{K_P}$  — коэффициент перегрузки по току (так как  $P = I^2 \cdot R$ );

$K_P$  — коэффициент перегрузки по мощности.

#### ***Нагрев аппарата в повторно-кратковременном режиме***

Повторно-кратковременным называется режим, когда температура аппарата в период пауз тока не успевает снизиться до температуры окружающей среды.



**Рис. 4.19. Нагрев аппарата при его работе в повторно-кратковременном режиме**

*Понятие продолжительности включения (ПВ)*

ПВ – является характерной величиной для кратковременного и повторно - кратковременного режима:

$$\text{ПВ} = \frac{t_p}{t_p + t_{\Pi}}, \quad (4.35)$$

где  $t_p, t_{\Pi}$  - соответственно время работы и время паузы.

В данном режиме аппарат также можно перегрузить:

$$K_P = \frac{P_{\text{кр}}}{P_{\text{прод}}} = \frac{\tau_{\text{max}}}{\tau_y} = \frac{1 - e^{-\frac{t_p + t_{\Pi}}{T}}}{1 - e^{-\frac{t_p}{T}}} > 1, \quad (4.36)$$

$$K_I = \sqrt{K_P} = \frac{I_{\text{кр}}}{I_{\text{прод}}}. \quad (4.37)$$

ПВ - паспортная величина аппаратов, работающих в кратковременном и повторно-кратковременном режиме. Связь между величинами токов при кратковременном и длительном режиме получается из соотношения равенства мощности, выделяемой в проводнике за период работы (при длительном режиме) и за период работы и паузы (при кратковременном режиме).

Для составления уравнения возьмем отрезок времени, равный времени цикла  $t_{\Pi} = t_p + t_{\Pi}$ .

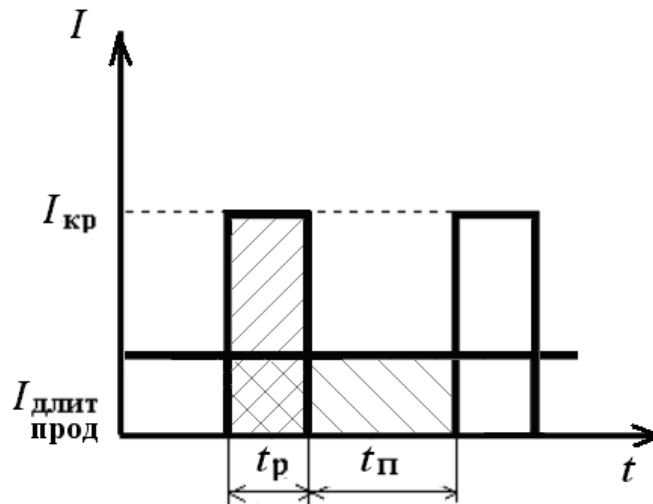


Рис. 4.20. Понятие ПВ

Исходя из равенства мощностей, выделяемых в проводниках при кратковременном и продолжительном режимах работы, получим:

$$W_{\text{кр}} = W_{\text{прод}},$$

$$I_{\text{кр}}^2 \cdot R \cdot t_p = I_{\text{прод}}^2 \cdot R \cdot (t_p + t_n), \quad (4.38)$$

$$I_{\text{прод}} = I_{\text{кр}} \cdot \sqrt{\frac{t_p}{t_p + t_n}} = I_{\text{кр}} \cdot \sqrt{\text{ПВ}}. \quad (4.39)$$

*Пример.* В технической характеристике аппарата указано: ПВ = 0,36;  $I_{\text{кр}} = 10\text{А}$ . Необходимо выяснить, какое значение тока допустимо пропускать через электрический аппарат при продолжительном режиме работы.

По формуле (4.39):  $I_{\text{прод}} = 10 \cdot 0,6 = 6\text{А}$ .

#### 4.3. Электрические контакты в электрических аппаратах

##### Общее представление и классификация электрических контактов

*Контакт электрический* - это поверхность соприкосновения составных частей электрической цепи, обладающая электрической проводимостью.

Электрические аппараты состоят из отдельных деталей, узлов, электрически соединенных между собой.

##### Классификация

1. По возможному перемещению контактирующих деталей:

а) разборный контакт (контактное соединение) - это конструктивный узел, предназначенный только для проведения электрического тока и не предназначенный для коммутации (болтовое соединение шин, присоединение проводника к зажиму);

б) коммутирующие контакты - это конструктивный узел, предназначенный для коммутации электрических цепей (контакты выключателей, рубильников);



в) скользящие контакты - разновидность коммутирующего контакта, у которого одна деталь скользит относительно другой, но электрический контакт при этом не нарушается (контакты реостатов, щеточные контакты в электрических машинах, шарнирный контакт и проскальзывающий контакт в автоматических выключателях).

2. По форме контактирования:

а) *точечный контакт* - контакт в одной площадке (сфера-сфера, сфера-плоскость, конус-плоскость);

б) *линейный контакт* - условное контактирование происходит по линии (ролик-плоскость);

в) *поверхностный контакт* - условное контактирование происходит по поверхности.

### **Переходное сопротивление электрического контакта**

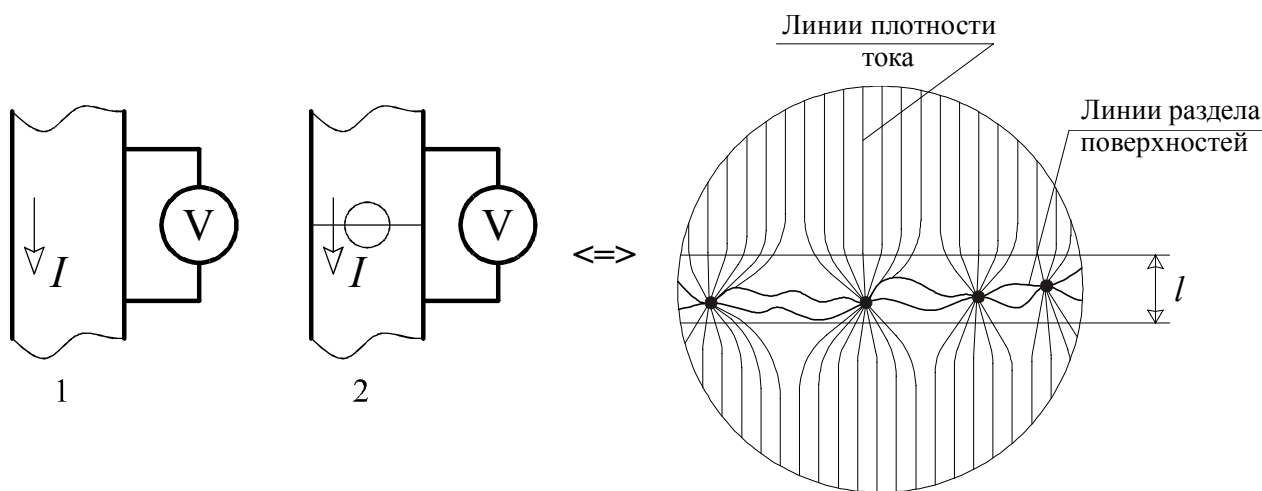
Возьмём проводник с током как элемент электрической цепи с нагрузкой. Подключим вольтметр и снимем его показания как падение напряжения  $\Delta U_1$  на элементе длины  $l$ . Разрежем проводник, а потом снова соединим и проанализируем, как изменились показания вольтметра  $\Delta U_2$ :

$$\Delta U_1 = I \cdot R_1; \quad \Delta U_2 = I \cdot R_2,$$

$$\Delta U_2 - \Delta U_1 = I \cdot (R_2 - R_1) = I \cdot \Delta R = I \cdot R_k, \quad (4.40)$$

$$R_2 - R_1 = \Delta R,$$

где  $\Delta R$  – контактное сопротивление  $R_k$ .



**Рис. 4.21. Электрический контакт**

Рассмотрим под микроскопом участок поверхности контактирования. Контакт осуществляется по микровыступам, то есть в месте контактирования резко уменьшается площадь сечения проводника  $S$ , поверхность среза окисляется, что также приводит к увеличению контактного сопротивления:

$$R_k = \frac{\rho \cdot l}{S}, \quad (4.41)$$

где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление материала проводника и его окислов на поверхности среза;

$l$  – единичная длина (элемент длины).

**Выводы:** 1. В каждой точке контактирования возникают ЭДУ отброса по причине сужений линий плотности тока.

2. Происходит нагрев участка контактирования вследствие закона Джоуля-Ленца:

$$P_{\text{тепл}} = I^2 \cdot R_k. \quad (4.42)$$

**Причины возникновения контактного сопротивления:**

1. Резкое уменьшение сечения проводника в месте контактирования.

2. Образование на контактах окисных плёнок, удельное сопротивление которых выше, чем у основного металла:

$$R_k = \frac{\varepsilon}{p^n}, \quad (4.43)$$

где  $\varepsilon$  – величина, зависящая от материала, формы, способа его обработки и состояния контактной поверхности, [Ом/Н<sup>1/2</sup>];

$p$  – сила, сжимающая контакты, [Н];

$n$  – показатель степени, характеризующий число точек соприкосновения (0,5 – для точечного контакта, 0,7 – для линейного, 1 – для поверхностного контакта).

Таблица 4.1

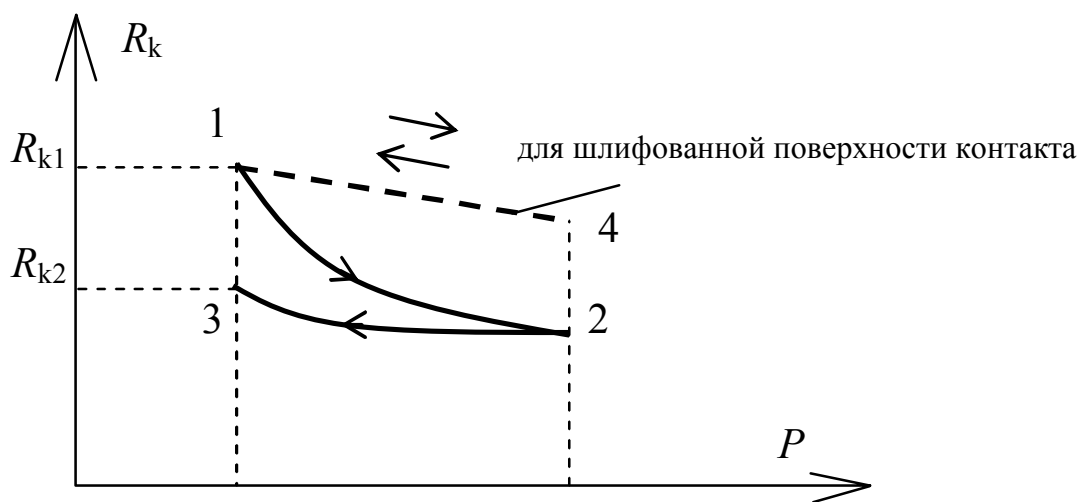
**Значение  $\varepsilon$  для неокисленного однотоочечного контакта**

Материал	$\varepsilon$ , Ом/Н <sup>1/2</sup>
Медь	$1 \cdot 10^{-3}$
Олово	$5 \cdot 10^{-3}$
Алюминий	$1.6 \cdot 10^{-3}$
Серебро	$0.5 \cdot 10^{-3}$
Сталь	$76 \cdot 10^{-3}$

Анализ формулы (4.43) позволяет сделать вывод, что контактное сопротивление зависит:

1) от материала проводника, как самого металла, так и его окислов на поверхности контакта;

2) от величины силы контактного нажатия (давления на контакт);



**Рис. 4.22. Зависимость контактного сопротивления от величины давления на контакт и состояния контактной поверхности:**

1-2 – процесс сжатия контакта (не шлифованного); 2-3 – процесс снятия давления  $P$  на контакте; 1-4-1 – процесс сжатия и снятия давления для шлифованной поверхности контакта

3) от состояния контактной поверхности. При шлифовке "бугорки" на поверхности становятся более пологими и не разрушаются при сжатии, а только упруго деформируются;

4) от условной площади контактирования.

Если увеличить площадку контактирования, то будет увеличиваться физическое число точек контактирования. Так как в пределе  $n = 1$ , то нет особого смысла увеличивать поверхность соприкосновения контактов в целях снижения его сопротивления. Часто поверхность соприкосновения контактов увеличивают для более эффективного рассеивания тепловой мощности выделяющейся в контактах при протекании по ним тока (согласно закону Джоуля-Ленца).

#### ***Явление спекания (сваривания) контактов во включенном состоянии***

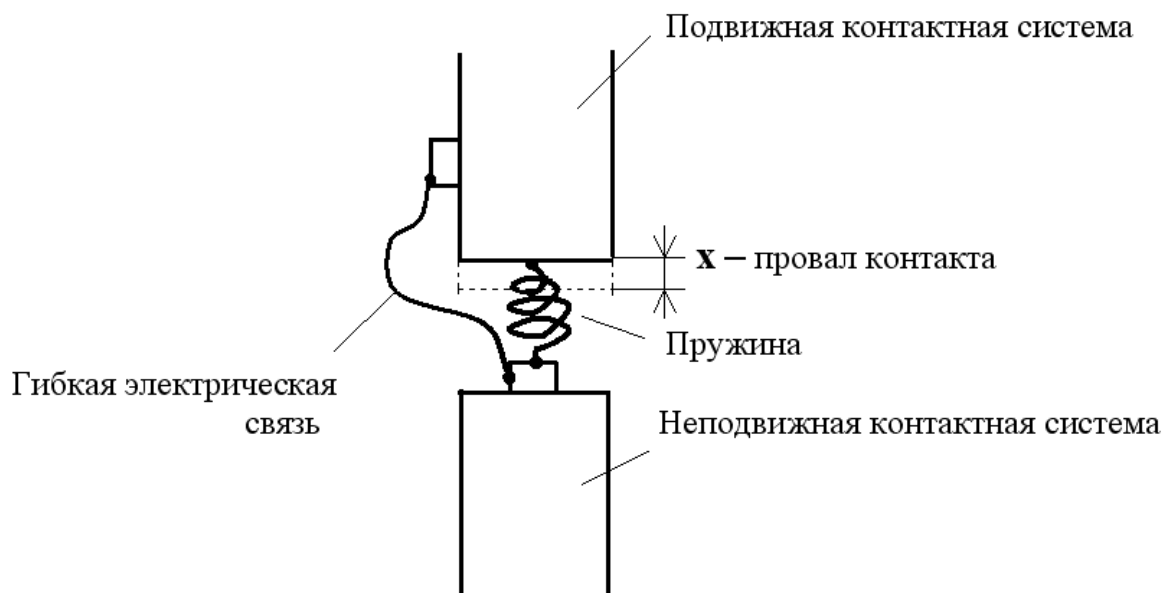
При прохождении тока в площадке контактирования, согласно закону Джоуля-Ленца, выделяется тепловая энергия:

$$W_k = I^2 \cdot R_k \cdot t. \quad (4.44)$$

Контакт вследствие нагрева ещё больше окисляется. Это приведёт к увеличению контактного сопротивления и энергии, выделяемой в контакте. Ток, определяющийся нагрузкой, является постоянным. Процесс увеличения сопротивления контакта может стать лавинообразным, и при некотором значении температуры на поверхности образуется слой жидкого металла. Контактное сопротивление резко уменьшится. Энергия, выделяющаяся в контакте, тоже резко уменьшится. Металл охлаждается и затвердевает. Это явление нежелательно для коммутирующих контактов.

Для борьбы с этим явлением используется дополнительное сжатие контактов при помощи контактных пружин ("провал контактов").

*Провал контактов* - это расстояние, на которое переместится подвижная контактная система после касания контактов (или то расстояние, на которое переместится подвижная система, если неподвижные контакты мысленно убрать).



**Рис. 4.23. Провал контактов**

Провал контактов – это паспортная техническая величина, измеряемая в мм, которая характеризует усилие нажатия на контакты.

В процессе эксплуатации контакт изнашивается (трение, выгорание части контакта вследствие электрической дуги), и контактное нажатие снижается, а значит увеличивается сопротивление контакта и возрастает опасность сваривания, поэтому провал контактов в процессе эксплуатации контролируется. Допустимо уменьшение провала контактов на 50% от начального значения, приведённого в технической документации.

### ***Износ контактов. Дребезг***

Износ - это разрушение рабочей поверхности коммутирующего контакта, приводящее к изменению формы, размера, массы и к уменьшению провала контактов.

#### ***1. Износ при размыкании***

Сила, сжимающая контакты, уменьшается до нуля. Резко возрастает контактное сопротивление, возрастает плотность тока в последней площадке контактирования. Вся энергия электрического тока выделяется в этой площадке, она разогревается, расплавляется. И между расходящимися частями контакта образуется мостик жидкого металла ("контактный перешеек"). Этот мостик рвётся, и в промежутке между контактами возникает два вида электрического разряда, например для меди:

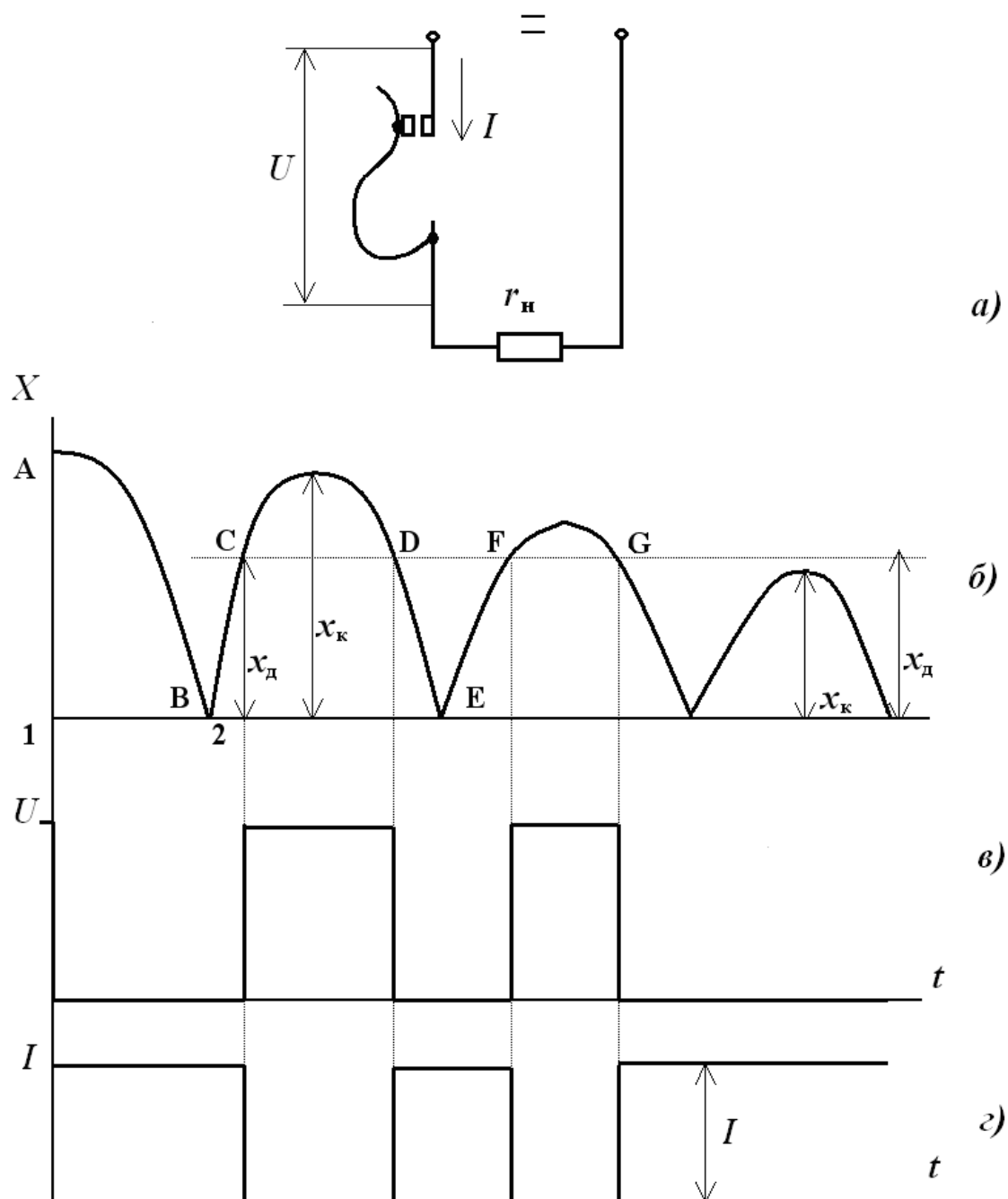
- а) при  $I = 0,5 \text{ А}$  и  $U > 15 \text{ В}$  возникает дуговой разряд;

б) при токах  $I < 0,5 A$  возникает искровой разряд.

Под действием высокой температуры дуги (искры) часть металла разбрызгивается и выбрасывается из контактного промежутка. При искровом разряде на поверхности контактов образуются лунки и наплывы (эрозия контакта).

2. Износ при замыкании, вызван дребезгом контактов.

*Дребезг* - отбрасывание подвижной контактной системы за счет упругой деформации неподвижной контактной системы (на расстояние 0,01-0,1 мм).



**Рис. 4.24. Дребезг контактов:**

*a* - замыкание контактов; *б* - осциллограмма упругой деформации; *в* - напряжение между контактами; *г* - ток через контакт

Процесс идёт с затухающей амплитудой. При каждом отбросе возникает электрическая дуга (искра), вызывающая износ контактов:

$x_k$  - величина амплитуды колебаний;

$x_d$  - величина упругой деформации материала;

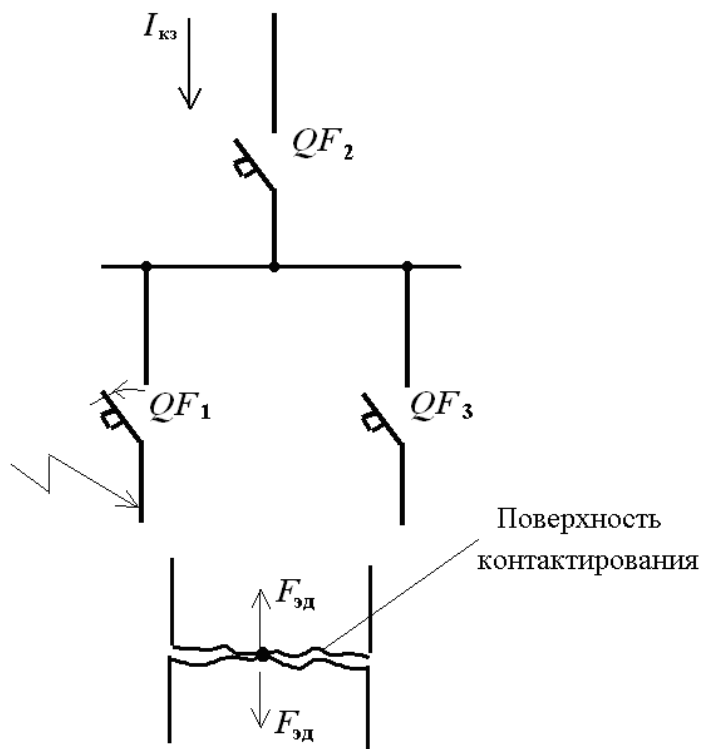
Если  $x_k \geq x_d$  - произойдет разрыв цепи (опасный дребезг). Если  $x_k < x_d$  разрыв цепи не произойдет (неопасный дребезг).

Дребезг может быть опасным (когда величина амплитуды колебания системы превосходит величину упругой деформации). При этом происходит разрыв цепи. В противном случае возникает неопасный дребезг.

Теоретически дребезга избежать невозможно, поэтому при проектировании электрических аппаратов добиваются, чтобы дребезг был неопасным.

### ***Работа контактных систем в условиях короткого замыкания***

В условиях короткого замыкания возникает опасность сваривания контактов, находящихся в замкнутом состоянии, за счёт электродинамического отброса контактов автоматических выключателей, когда электродинамические силы становятся равными, или превосходят, силы контактных пружин, обеспечивающих "провал контактов". В этом случае возникает электрическая дуга в момент отброса контактов. Рассмотрим это подробнее на примере работы элемента электрической сети с двумя последовательно включенными автоматическими выключателями.



**Рис. 4.25. К понятию «сваривание» контактов:**  
 $F_{эд}$  – электродинамические силы отброса

Короткое замыкание возникло за автоматическим выключателем  $QF_1$ . Рассмотрим аппарат  $QF_1$ . Его задача - отключить ток короткого замыкания. При его отключении происходит частичное оплавление и выгорание контактов за счёт энергии электрической дуги.

До момента отключения автоматического выключателя  $QF_1$  ток короткого замыкания протекает по обоим выключателям. Рассмотрим  $QF_2$ . В площадке контактирования возникает сила электродинамического отброса, которой противодействует сила контактной пружины, контактное нажатие ослабляется, сопротивление контакта увеличивается. Это приводит к увеличению энергии, выделяемой в контакте. В какой-то момент электродинамические силы превысят силу контактных пружин и контакты начнут расходиться, образуется мостик жидкого металла. В это время  $QF_1$  отключится, электродинамические силы резко уменьшатся и  $QF_2$  приходит в нормально-замкнутое положение, металл затвердевает, контакты  $QF_2$  привариваются друг к другу.

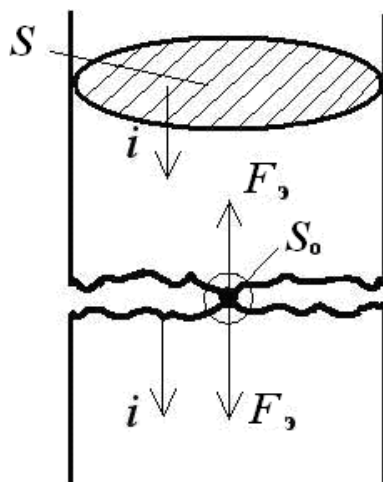
*Меры по снижению износа контактов:*

1. Применение дугостойких материалов.
2. Создание быстрого перемещения дуги по контакту.
3. Компенсация электродинамических сил отброса.

#### ***Способы компенсации электродинамических сил в электрических контактах***

Электродинамические силы отброса возникают вследствие сужения линий тока, при этом возникает продольная сила, направленная внутрь проводника:

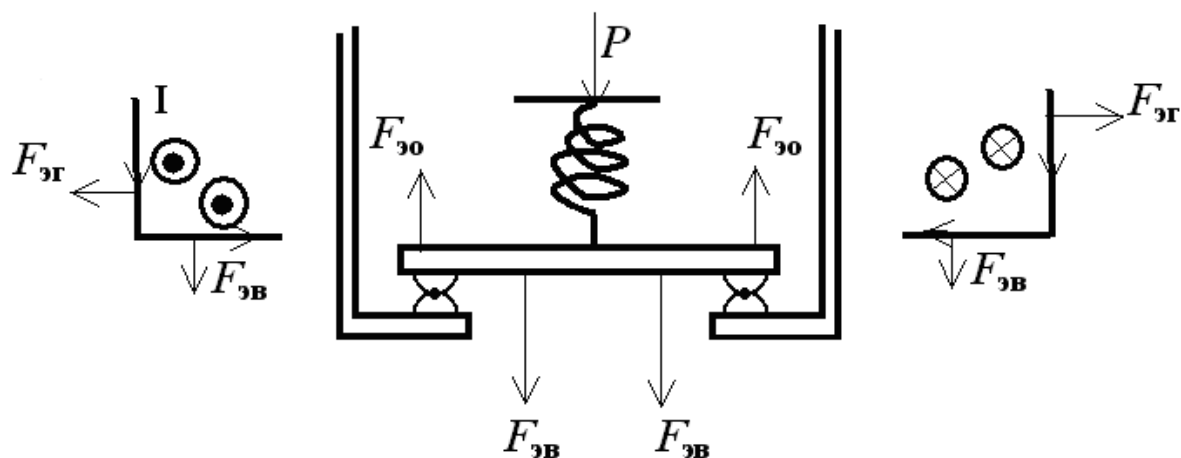
$$F_{\text{эд}} = 10^{-7} \cdot i^2 \cdot \ln \left( \frac{S}{S_0} \right). \quad (4.45)$$



**Рис. 4.26. Электродинамические силы отброса контактов**

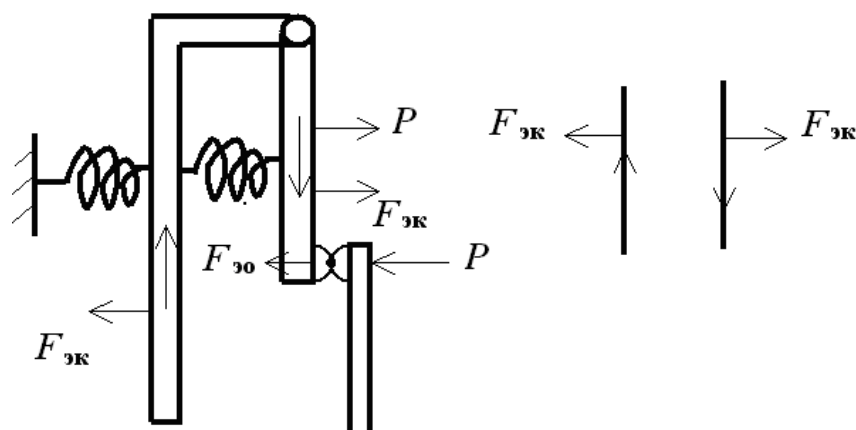
Способы компенсации электродинамической силы имеют также электродинамическую основу.

а) мостиковый контакт



**Рис. 4.27. Компенсация электродинамических сил отброса в мостиковом контакте:**  
 $F_{эг}$ ,  $F_{эв}$  – соответственно горизонтальные и вертикальные электродинамические компенсационные силы;  $F_{э}$  – электродинамические силы сброса;  $P$  – сила контактной пружины

б) рычажный контакт



**Рис. 4.28. Компенсация электродинамических сил отброса в рычажном контакте:**  
 $F_{эк}$  – электродинамические компенсационные силы

Размыкания контакта не произойдёт.

### **Материалы для контактных соединений**

#### *Требования к материалам контактов*

1. Высокая электропроводимость и теплопроводность.
2. Стойкость против коррозии.
3. Стойкость против образования плёнок с высоким удельным электрическим сопротивлением  $\rho$ .
4. Малая твёрдость материала (для уменьшения возможности силы нажатия).



5. Высокая твёрдость (для уменьшения механического износа при частых ВО).
6. Малая эрозия.
7. Высокая дугостойкость (высокая температура плавления).
8. Высокие значения тока и напряжения, необходимых для дугообразования.
9. Простота обработки и низкая стоимость.

В природе нет материалов, которые удовлетворяли бы всем требованиям одновременно:

*Медь.* Удовлетворяет всем требованиям, кроме 2 и 3, поэтому в слаботочных контактах при малых нажатиях не рекомендуется. К недостаткам можно отнести достаточно низкую температуру плавления, при работе на воздухе, медь покрывается слоем прочных оксидов, имеющих высокое сопротивление, требует довольно больших сил нажатия. Для защиты меди от окисления поверхности контактов покрываются электролитическим способом слоем серебра толщиной 20-30- мкм.

*Серебро.* Удовлетворяет всем требованиям, кроме 7. Используется для накладок на рабочие поверхности контактов из меди. К недостаткам можно отнести малую дугостойкость и недостаточную твердость, препятствующую использованию серебра при наличии мощной дуги и частых включениях и отключениях.

*Платина, золото, молибден.* Используются на малые токи при малых нажатиях, так как не образуют оксидных плёнок. Для увеличения износостойкости используется сплав платины с иридием.

*Вольфрам и его сплавы.* Используются как на малые, так и на большие токи в качестве дугостойких контактов.

*Металлокерамика* - механическая смесь двух практически не сплавляющихся металлов, получаемая методом спекания их порошков или пропиткой одного расплавом другого. Один из металлов имеет большую проводимость, другой обладает дугостойкостью, механической прочностью.

Серебро - никель, серебро - кадмий, серебро - графит.

Металлокерамика применяется в качестве дугогасительных контактов и в качестве основных контактов в аппаратах на токи до 600 А.

Алюминий обладает меньшей проводимостью и механической прочностью. На поверхности образуется плохопроводящая окисная пленка, поэтому для коммутационных контактов не используется, как проводник применяется в разборных соединениях при армировании его медью и серебром.

### ***Основные конструкции контактов***

1. Неподвижные разборные контакты.

Контакт должен быть надёжен и не ослабевать при эксплуатации. Контактное сопротивление должно быть минимальным.

Рекомендации: шины следует соединять при помощи нескольких (для большего количества точек контактирования) болтов, соединение делать через

переходную пластину (как правило, это медная фольга, покрытая с обеих сторон легкоплавким металлом, расплавляющимся при  $t = 50-75\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

2. Подвижные контакты (неразмыкающиеся контактные соединения).

Применяются для передачи тока с подвижного на неподвижный контакт (используется гибкая связь из медной ленты толщиной 0,1 мм при "ходах" меньше 0,25 мм), роликовый съём, шарнирный контакт.

3. Коммутирующие контакты.

При малых токах конструктивно делают однотоочечное контактирование, чтобы при малых нажатиях получить высокое удельное давление в контактной точке. На токе в сотни - тысячи Ампер контакты делаются многоточечными:

- а) рычажные (проскальзывающие, перекатывающиеся);
- б) мостиковые;
- в) врубные;
- г) торцевые;
- д) розеточные.

Коммутирующие контакты бывают одноступенчатые и многоступенчатые.

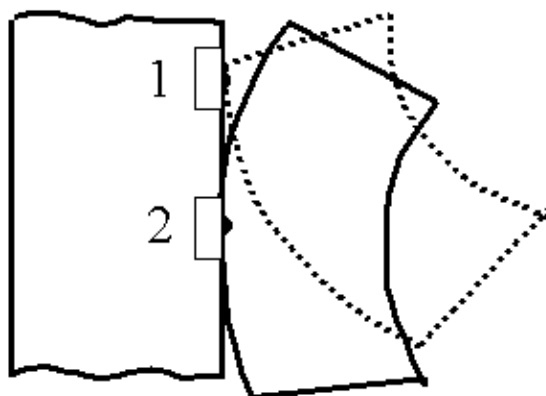
Многоступенчатых существует по крайней мере две пары параллельных контактов:

1. Дугогасительные - играют основную роль при ВО.

2. Основные или рабочие - для проведения тока в нормальном режиме.

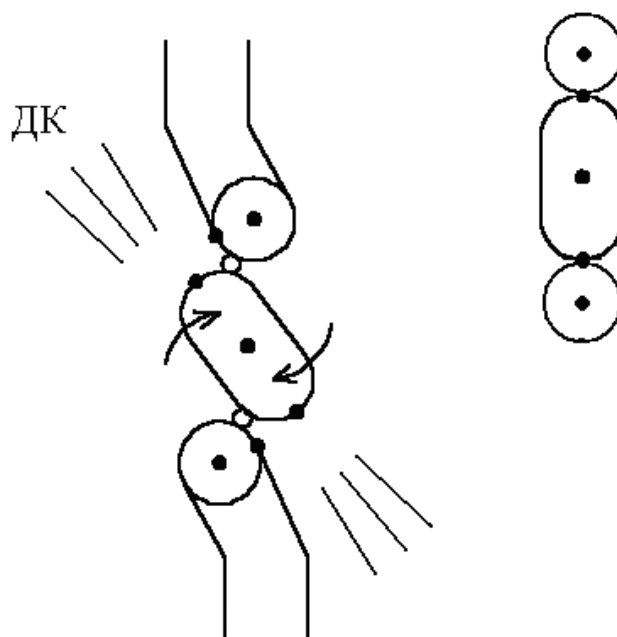
Последовательность их работы при замыкании: сначала замыкаются дугогасительные, а затем рабочие. При размыкании наоборот: первыми размыкаются рабочие контакты, а затем дугогасительные.

В современных электрических аппаратах конструктивно создают точки пространственного разделения рабочего контактирования и контактирования в процессе замыкания и размыкания за счет эффекта перекатывания и проскальзывания. Рабочие точки 2 выполняются из серебра, а дугогасительные 1 – из металлокерамики.



**Рис. 4.29. Перекатывающийся (проскальзывающий) контакт с одним разрывом «на фазу»:**

1 – точка первого касания при замыкании и последнего при размыкании; 2 – рабочая точка

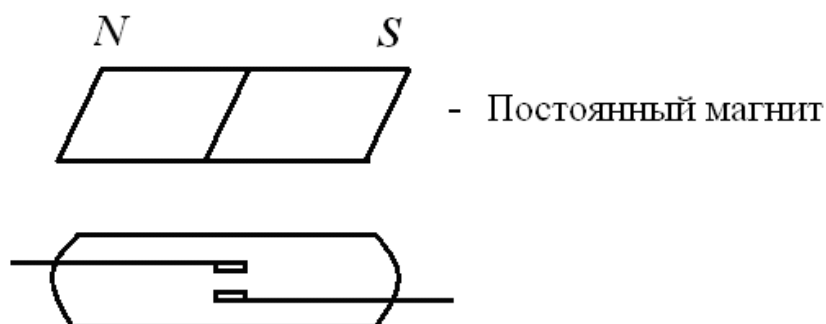


**Рис. 4.30. Перекатывающийся (проскальзывающий) контакт с двумя разрывами «на фазу»:**  
ДК – дугогасительная камера

#### ***Герметичный контакт (геркон)***

Контакты обычно работают на атмосферном воздухе, загрязняются пылью, покрываются окислами, возникающими при химических реакциях (под воздействием электрической дуги), подвергаются действию водяных паров и химически агрессивных газов. Все это понижает надежность контактов, особенно при малых значениях тока и напряжения, когда может прекратиться проводимость.

Для предотвращения этих явления контакты помещают в баллоны с инертным газом (азот, аргон, водород) или вакуумом (0,13 – 0,0013 Па).



**Рис. 4.31. Герметичный контакт**

Контакт управляется – постоянным магнитом. Такой контакт по характеристикам приближается к бесконтактным устройствам, обладая достоинствами физического контакта:

- а) быстродействие замыкания-размыкания –  $f = 100$  Гц;
- б) ресурс срабатывания отключения-включения  $10^7$ – $10^9$  циклов ВО.

Пример: контакт в охранной сигнализации.

Недостаток: малая коммутационная мощность  $\cong 60$  Вт.

Также существуют герсиконы (герметичные силовые контакты). Ток – 180 А. Частота включений  $f_{BO} = 1200$  ВО/час.

#### **4.4. Основы теории горения и гашения электрической дуги**

Размыкание электрической цепи, как правило, всегда сопровождается электрическим разрядом между контактами, то есть воздушный промежуток ионизируется и становится проводящим.

Физический процесс отключения состоит в деионизации воздушного промежутка, то есть превращении его обратно в диэлектрик, 1 см воздушного промежутка выдерживает напряжение 30 кВ.

*Ионизация* - это процесс отделения от нейтральной частицы одного или нескольких электронов и образование свободных электронов и положительно заряженных частиц - ионов.

#### **Причины образования электрического разряда**

1. При расхождении контактов возрастает контактное сопротивление, выделяется большая энергия в месте последнего контактирования, появляется мостик жидкого металла. Он рвётся, промежуток ионизируется вследствие термической ионизации и термоэлектронной эмиссии и становится проводящим.

*Термическая ионизация* - процесс ионизации под действием высоких температур.

*Термоэлектронная эмиссия* - явление испускания электронов с накаливаемой поверхности.

2. При расхождении контактов возрастает напряженность электрического поля. Возникает автоэлектронная эмиссия - процесс испускания электронов под воздействием сильного электрического поля.

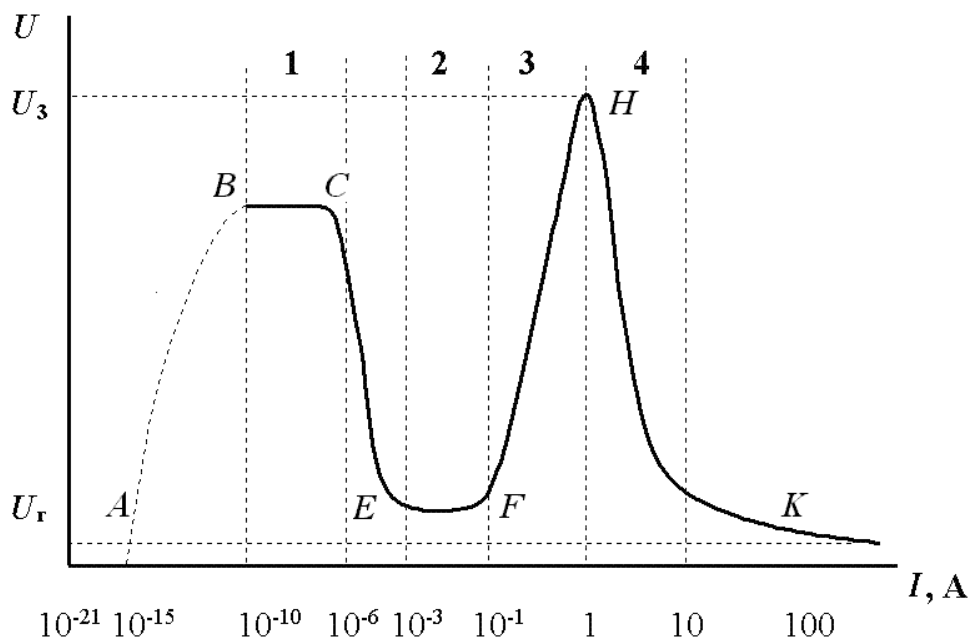
3. Под воздействием ионизации толчком - приобретение электроном скорости в конце свободного пробега, достаточной для выбивания электрона из нейтральной частицы газа. Разность потенциалов, необходимая для обеспечения данной скорости, называется потенциалом ионизации. Для газов потенциал ионизации равен 13-16 В, для меди – 7,7 В.

Одновременно проходят процессы рекомбинации и диффузии.

*Рекомбинация* - процесс образования нейтральных частиц из положительных и отрицательных.

*Диффузия* - процесс выноса заряженных частиц из межэлектродного промежутка в окружающее пространство.

Интенсивность гашения дуги будет определяться **интенсивностью процессов рекомбинации и диффузии.**

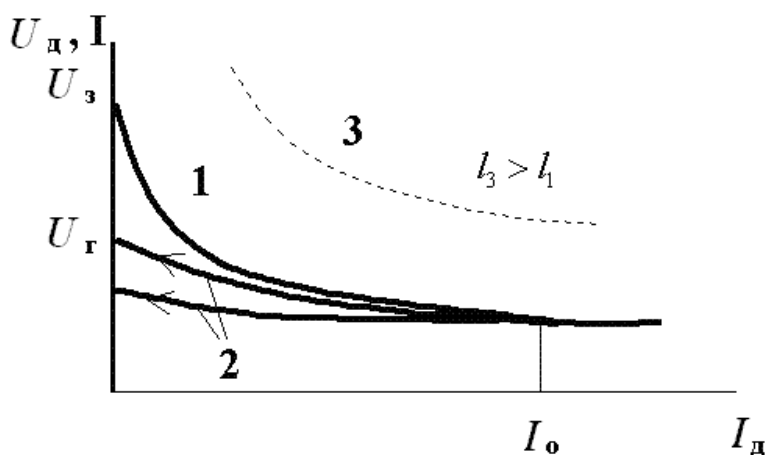


**Рис. 4.32. Вольтамперная характеристика газового разряда с металлическими электродами:**

1 – темный (таунсендовский); 2 – нормальный тлеющий; 3 – аномальный тлеющий; 4 – переход (тлеющий разряд – дуга); 5 – дуговой

*Статическая вольтамперная характеристика дуги* – зависимость падения напряжения на дуге от тока при постоянной длине дуги и медленном изменении тока.

Характеристики, которые возникают при быстром изменении тока, называются динамическими. Они показывают, что ионизационное состояние дуги не успевает за изменением тока (хотя ток и снизился до нуля, ионизационное состояние промежутка изменилось незначительно). Чем быстрее уменьшается ток, тем ниже характеристика.



**Рис. 4.33. Вольтамперные характеристики дуги:**

$U_3$  – напряжение зажигания дуги;  $U_г$  – напряжение гашения дуги

Для более длинной дуги характеристика пойдёт выше (кривая 3), то есть для поддержания горения более длинной дуги требуется большее напряжение.

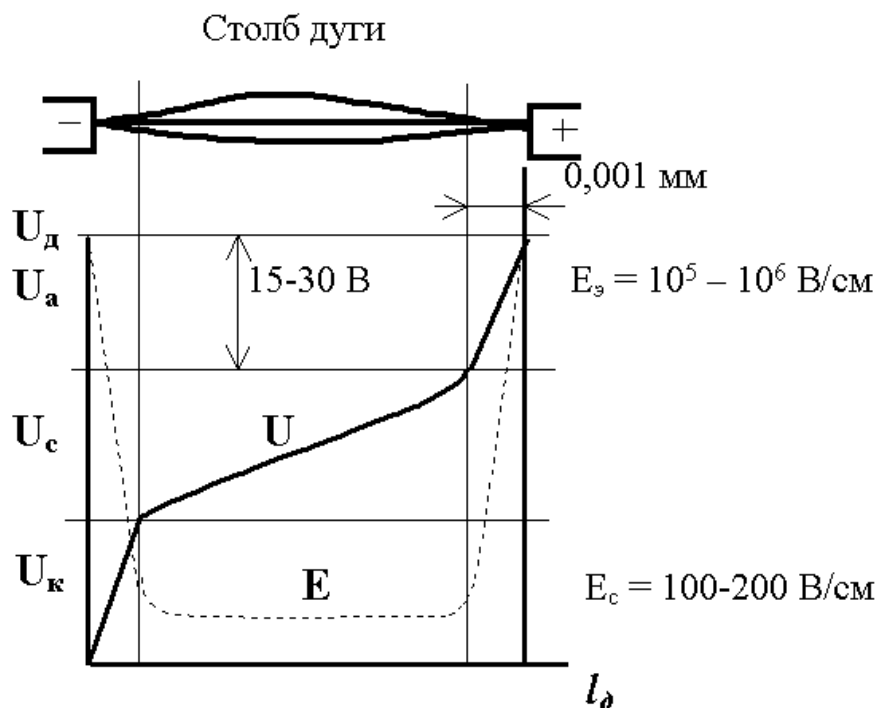


Рис. 4.34. Напряжение на дуге

Напряжение на дуге  $U_d$  складывается из околоэлектродного падения напряжения и падения напряжения на столбе дуги:

$$U_d = U_{\text{э}} + E_d \cdot l_d, \quad (4.46)$$

$$U_{\text{э}} = U_k + U_a, \quad (4.47)$$

где  $U_k$  – напряжение на катоде;

$U_a$  – напряжение на аноде;

$E_d$  – продольный градиент напряжения на створе дуги;

$l_d$  – длина дуги.

Околоэлектродное падение напряжения не зависит от длины дуги.

#### *Условия гашения дуги постоянного тока*

Для погашения дуги необходимо, чтобы процессы деионизации превосходили процессы ионизации.

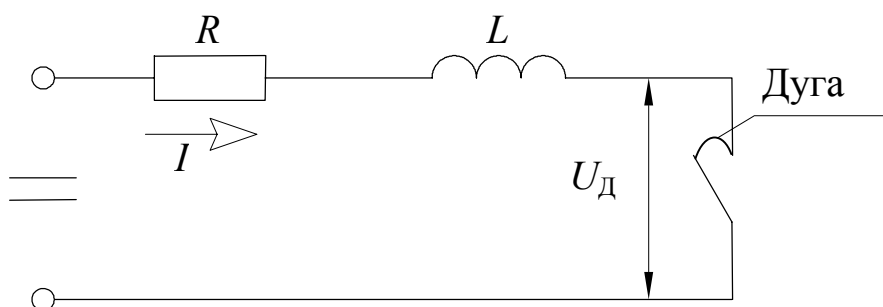


Рис. 4.35. Электрическая схема, моделирующая гашение дуги постоянного тока

Записываем 2-й закон Кирхгоффа:

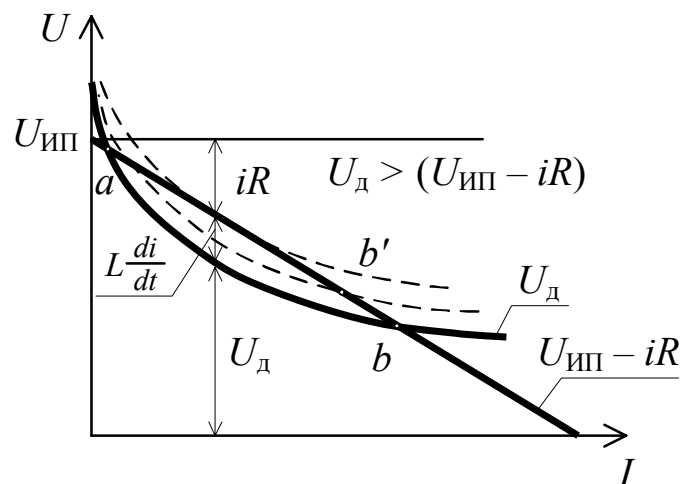
$$U = U_d + i \cdot R + L \cdot \frac{di}{dt}. \quad (4.48)$$

Если дуга горит устойчиво, то изменения тока происходить не будет:

$$L \cdot \frac{di}{dt} = 0; \quad U = U_d + i \cdot R. \quad (4.49)$$

Для погашения дуги необходимо, чтобы ток всё время уменьшался:  $L \cdot \frac{di}{dt} < 0$

Должно выполняться:  $U_d = U - i \cdot R$ .



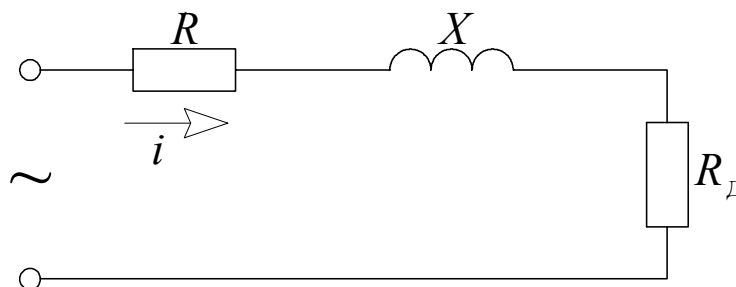
**Рис. 4.36. ВАХ элементов схемы, моделирующей гашение дуги постоянного тока**

В точках  $a$  и  $b$ ,  $L \cdot \frac{di}{dt} = 0$ , следовательно, дуга горит устойчиво.

Для погашения дуги необходимо, чтобы ВАХ дуги лежала выше резистивной характеристики источника питания на всём своём протяжении.

При расхождении контактов точка  $b$  перемещается вверх по резистивной характеристике ( $b'$ ). В этом случае всегда будет обеспечиваться условие гашения дуги, так как в какой-то момент времени напряжение на дуге будет больше напряжения на резистивной характеристике источника тока.

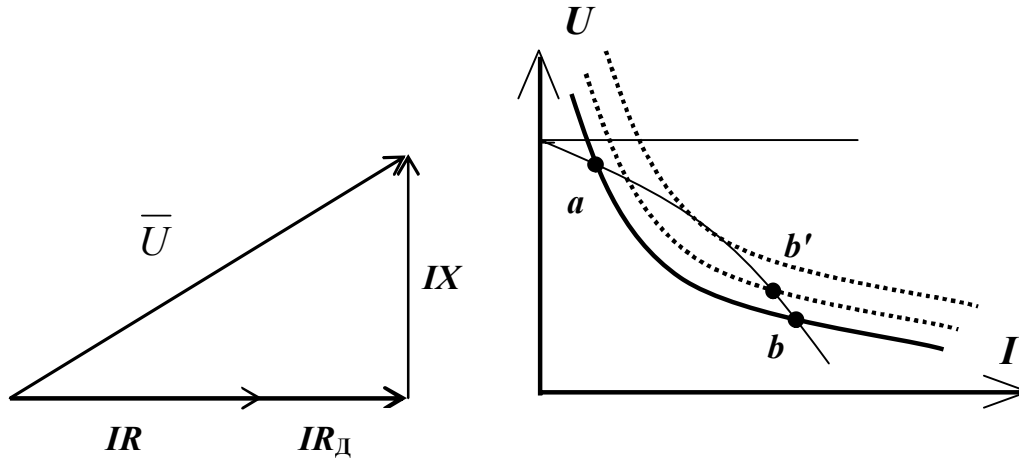
#### **Условия гашения дуги переменного тока**



**Рис. 4.37. Гашение дуги переменного тока**

Запишем 2-й закон Кирхгофа в комплексной форме:

$$\underline{U} = I \cdot R + j \cdot I \cdot X + I \cdot R_{\text{д}}. \quad (4.50)$$



**Рис. 4.38. Векторная диаграмма гашения дуги переменного тока**

Напряжение на дуге:

$$U_{\text{д}} = \sqrt{U^2 - I^2 X^2} - IR. \quad (4.51)$$

*Внешняя характеристика* - это зависимость напряжения на выходе источника питания от тока нагрузки.

***Перенапряжение при гашении дуги постоянного тока***

Напряжение на контактах в момент нуля тока называется напряжением гашения дуги:

$$U = U_{\text{д}} + i \cdot R + L \cdot \frac{di}{dt}. \quad (4.52)$$

При  $i = 0$ ,  $U = L \frac{di}{dt} + U_{\text{ГД}}$ , где  $U_{\text{ГД}}$  - напряжение гашения дуги:

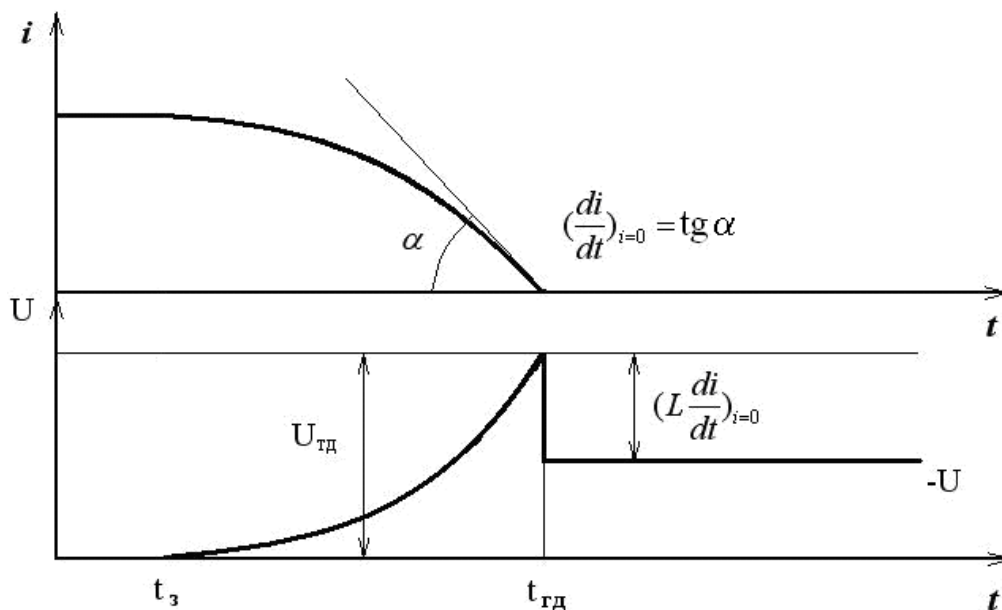
$$U_{\text{ГД}} = U - L \cdot \frac{di}{dt}. \quad (4.53)$$

Так как при гашении идёт уменьшение тока, то  $\frac{di}{dt} < 0$  и  $U_{\text{ГД}} = U + \left| L \cdot \frac{di}{dt} \right|$ .

Напряжение на контактах в момент гашения дуги увеличилось. Данное повышение напряжения на контактах относительно источника называется



перенапряжением. Оно тем больше, чем больше индуктивность электрической цепи и чем больше скорость изменения тока.



**Рис. 4.39. Перенапряжение при гашении дуги:**

$t_з$  – момент времени начала размыкания контактов;  $t_{гд}$  – момент времени окончательного гашения дуги

Для количественной характеристики перенапряжения вводят понятие коэффициента перенапряжения:

$$K = \frac{U_{гд}}{U} = 1 + \frac{L \cdot \left(\frac{di}{dt}\right)_{i=0}}{U}. \quad (4.54)$$

Напряжение на контактах может в **десятки раз** превышать напряжение сети. Это опасно для изоляции. При отключении активной нагрузки гашение происходит быстро, перенапряжение не возникает.

### ***Гашение дуги на переменном токе***

а) отключение активной нагрузки

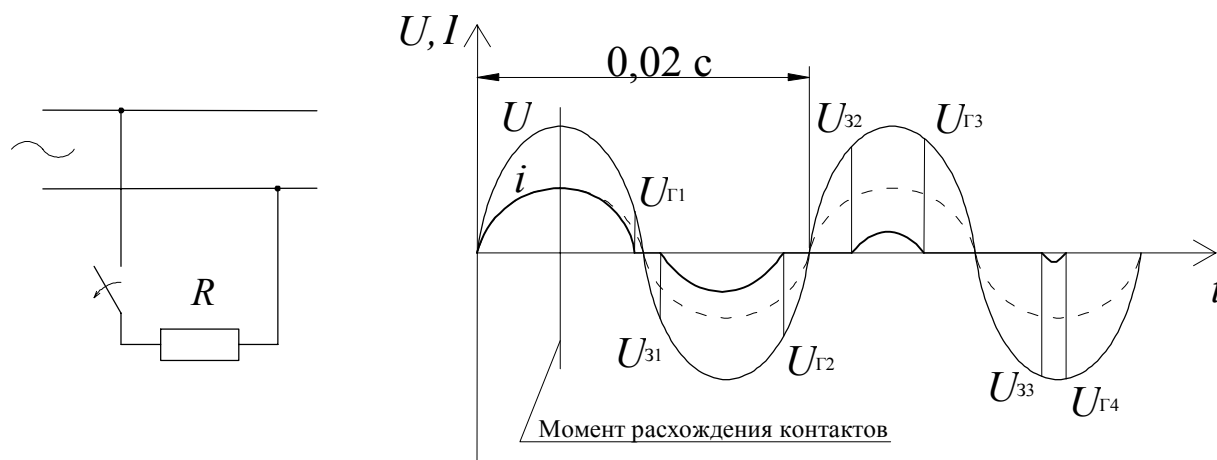
При растягивании дуги в момент отключения ВАХ дуги поднимается вверх, увеличивается диэлектрическая прочность промежутка и увеличивается напряжение зажигания и гашения дуги. Возникает ситуация, что напряжение источника питания будет недостаточно для электрического пробоя промежутка.

При совпадении момента прохождения тока через ноль и момента начала расхождения контактов дуга вообще может не возникнуть (это явление - безыскровая коммутация).

Выводы :

1. Ток дуги при гашении становится прерывистым (протекает неполный полупериод).

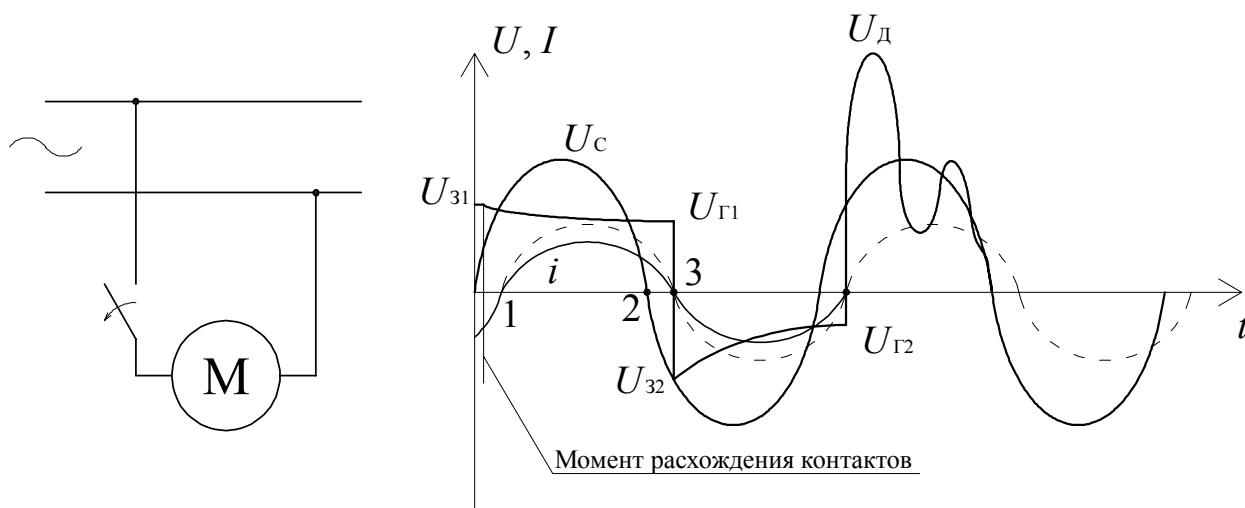
2. Дуга с частотой сети гаснет и зажигается. В момент погасания дуги активно идут процессы рекомбинации.
3. Процесс дугогашения легче, чем на постоянном токе.



**Рис. 4.40. Схема отключения активной нагрузки и функции тока и напряжения при разрыве цепи:**

$U_{3i}$  – напряжение в моменты повторного зажигания дуги.  $U_{3i+1} > U_{3i}$ ;  $U_{Гi}$  – напряжение в моменты гашения дуги.  $U_{Гi+1} > U_{Гi}$

б) индуктивная нагрузка  $\cos \varphi < 1$



**Рис. 4.41. Схема отключения индуктивной нагрузки и функции тока и напряжения при разрыве цепи**

В момент расхождения контактов напряжение сети будет больше напряжения зажигания дуги, и ток не прервётся - точка 1. Когда напряжение сети будет уменьшаться и проходить через ноль - точка 2, - ток дуги будет существовать за счёт энергии, накопленной в индуктивности. Когда ток снизится до нуля - точка 3, - напряжение на контактах будет достаточным для повторного зажигания дуги. Ток непрерывен. Дуга зажигается вновь, лишь

изменив свой знак. Если в следующий полупериод напряжение сети будет недостаточно для повторного зажигания дуги, то ток оборвётся, но при этом на контактах возникает перенапряжение и колебательный процесс, так как индуктивность стремится разрядиться через колебательный контур, образованный ёмкостью контактов. Перенапряжение может достигать двойного напряжения сети. Отключение индуктивной нагрузки сложнее, чем активной.

в) гашение дуги переменного тока повышенной частоты (400, 500Гц; 2,5-10кГц).

Продолжительность времени бестоковых пауз на повышенной частоте значительно меньше, чем при частоте 50Гц и температура дуги (в силу ее инерционности) не успевает снизиться, т.е. процессы деионизации идут хуже. Условия гашения дуги повышенной частоты приближаются к условиям гашения дуги постоянного тока.

### ***Способы гашения дуги***

Для гашения дуги необходимо создать условия, при которых падение напряжения на дуге превосходило бы напряжение, даваемое источником питания.

Практически при гашении дуги используют три явления:

1. Увеличение длины дуги путём её растяжения.
2. Воздействие на ствол дуги путём охлаждения, добиваясь увеличения продольного градиента напряжения.
3. Используя экоэлектродное падение напряжения:

$$U_{\text{д}} > U_{\text{ип}}; \quad U_{\text{д}} = U_{\text{э}} + E_{\text{д}} \cdot l_{\text{д}}. \quad (4.55)$$

Рассмотрим возможные способы гашения. Обычно используются все три способа:

1. Растягивание дуги - самый простой и самый неэффективный способ.

Увеличивается падение напряжения на стволе дуги вследствие увеличения активного сопротивления дуги. Площадь поверхности увеличивается, интенсивнее идут процессы рекомбинации, улучшаются условия охлаждения дуги. Однако для того, чтобы погасить дугу, например, с  $I = 100\text{А}$ ,  $U = 220\text{В}$ , требуется растянуть дугу на расстояние 25-30 см, что практически в электрических аппаратах сделать невозможно, так как значительно возрастают габариты электрического аппарата. Поэтому данный способ используется в качестве основного только у слаботочных электрических аппаратов (реле, магнитных пускателей).

2. Охлаждение дуги.

Основным источником зарядов дуги является термическая ионизация, и если принудительно дугу охлаждать сжатым воздухом, маслом, то она эффективно гасится. Это самый эффективный, но дорогой способ. Применяется в электрических аппаратах выше 1000 В.

### 3. Магнитное дутьё.

Включает в себя 1-й и 2-й способы.

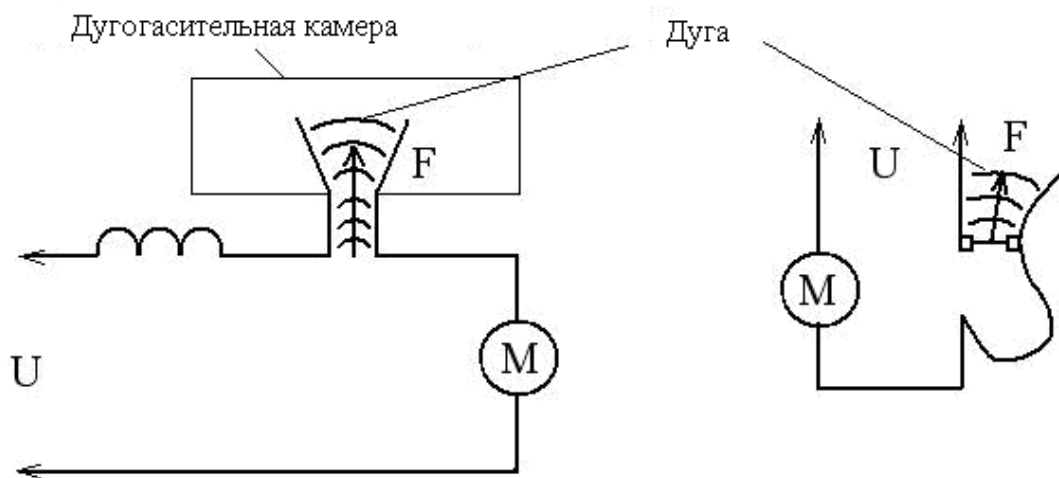


Рис. 4.42. Гашение дуги с помощью магнитного дутья

При расхождении контактов возникает электрическая дуга. Взаимодействие магнитного поля с током приводит к образованию силы. Под действием силы дуга быстро перемещается, встречает аэродинамическое сопротивление, интенсивно охлаждается, а на рогах происходит её дополнительное растяжение. Чем больше скорость движения дуги, тем интенсивнее идёт охлаждение, и ВАХ дуги резко поднимается вверх.

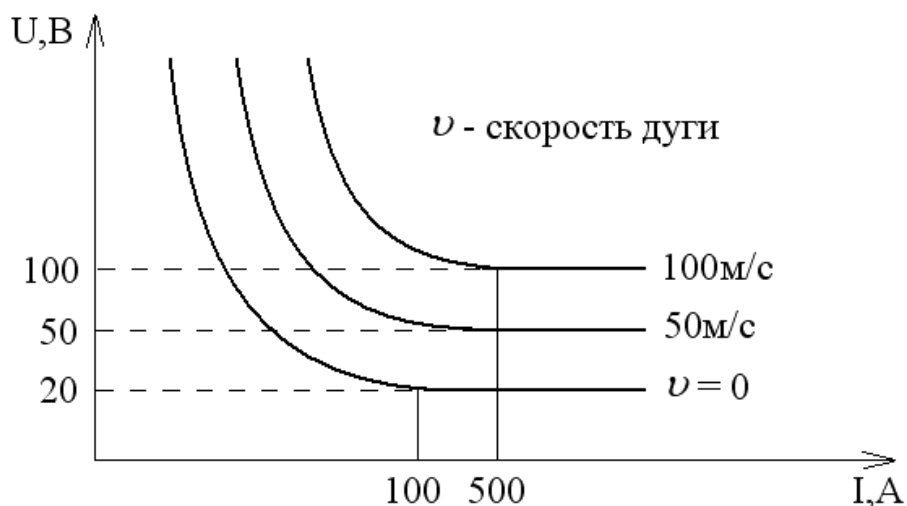


Рис. 4.43. Влияние скорости перемещения дуги на ее ВАХ

### 4. Гашение в продольных щелях.

Так как дугу следует погасить в малом объёме, при малых звуковых и световых эффектах, то магнитное дутьё всегда является составной частью дугогасительного устройства (камеры).

Конструктивно камера представляет собой извилистую щель

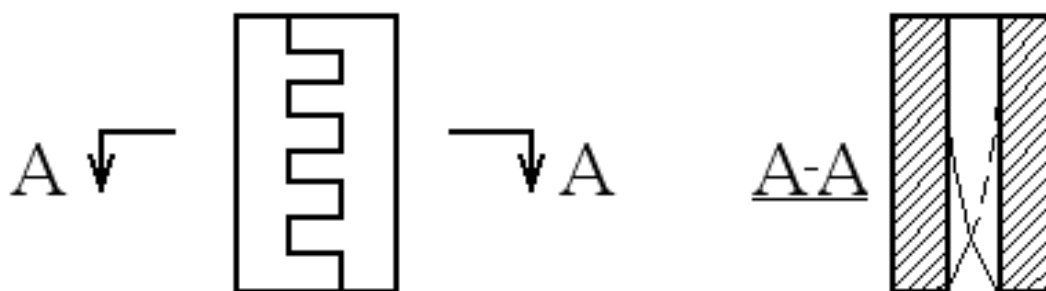


Рис. 4.44. Дугогасительная камера

Дуга охлаждается и за счёт движения вверх, и за счёт теплообмена со стенками камеры. Дуга удлиняется за счёт конфигурации щели в 2-3 раза.

Это основной способ гашения дуги на постоянном токе.

Материал щели - это дугостойкий материал, теплоёмкий, на основе асбоцемента, керамики и пластмассы.

Даже после погасания дуги остаётся пламя дуги, которое может быть выброшено за пределы камеры. Это опасно для обслуживающего персонала. Поэтому над дугогасительной камерой устанавливаются решётки из теплопроводящих металлических пластин. Высокая теплопроводность, теплоёмкость и развитая поверхность их соприкосновения с пламенем, значительный путь, который пламя проходит вдоль пластин, способствует полной деионизации пламени.

5. Гашение дуги в дугогасительной камере.

В первых четырёх способах воздействие происходило на ствол дуги. Этот способ использует околоэлектродное падение напряжения.

Над контактами устанавливаются неподвижные изолированные друг от друга металлические пластины из ферромагнитного материала.

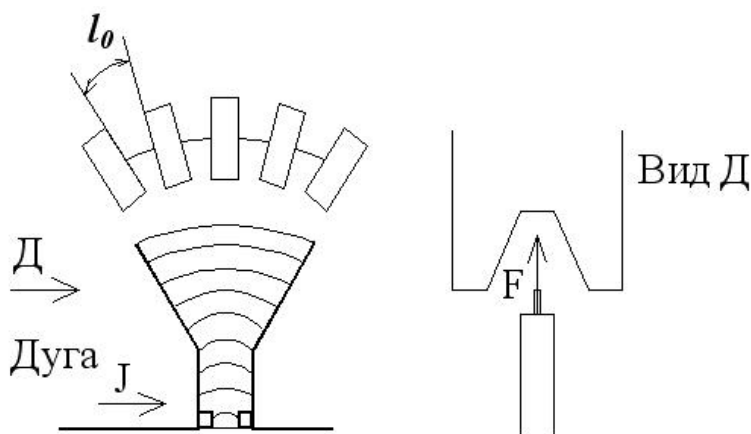


Рис. 4.45. Дуга в дугогасительной решетке

Пластины образуют дугогасительную решётку. Дуга за счёт ЭДУ загоняется в решётку, где разбивается на ряд последовательно включённых коротких дуг. У каждой пластины решётки возникает околоэлектродное падение напряжения. За счёт суммы околоэлектродных падений напряжений

суммарное напряжение на дугах становится больше, чем напряжение, даваемое источником питания, и дуга гаснет.

Дополнительно она гаснет:

а) за счёт воздуха при перемещении вверх;

б) за счёт отвода теплоты в пластины.

Для эффективного захождения дуги в пластины они выполняются из ферромагнитного материала, а в целях уменьшения окисления и увеличения теплопроводности эти пластины покрываются медью:

$$l_{\text{д}} = l_0 \cdot (m + 1), \quad (4.56)$$

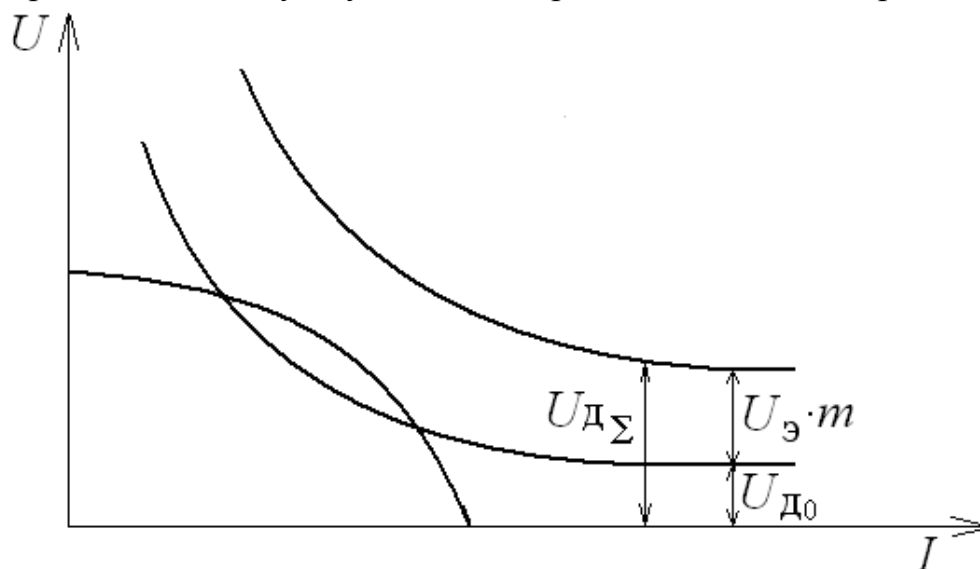
где  $m$  – количество пластин;

$l_0$  – длина единичной дуги.

$$U_{\text{д}\Sigma} = U_{\text{э}} \cdot (m + 1) + E_{\text{д}} \cdot l_{\text{д}} = U_{\text{э}} \cdot m + U_{\text{э}} + E_{\text{д}} \cdot l_{\text{д}} = U_{\text{э}} \cdot m + U_{\text{д}0}, \quad (4.57)$$

где  $U_{\text{д}0}$  – напряжение на стволе дуги.

Статическая ВАХ дуги в решётке будет такая же, как ВАХ открытой дуги, но перенесённая на сумму околоэлектродных падений напряжений вверх.



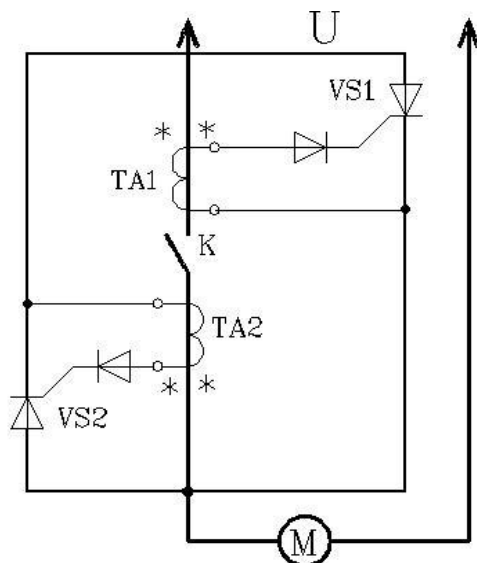
**Рис. 4.46. Поднятие ВАХ дуги на сумму околоэлектродных падений напряжений**

Дугогасительная решётка – основной способ гашения дуги переменного тока. Дуга гаснет при первом же переходе тока через ноль, в первый же полупериод после попадания в решётку. Для деионизации пламени также используется пламягасительная решётка.

### ***Бездуговая коммутация цепи переменного тока***

В нормальном режиме ток через тиристоры  $VS1$ ,  $VS2$  не протекает, так как они шунтированы контактом  $K$ . В момент размыкания этого контакта появляется падение напряжения, ток переходит в цепь того тиристора, направление проводимости которого соответствует полярности тока. Прямое

падение напряжения на тиристорах составляет 1,5 - 2 В, и дуга на контакте  $K$  не возникает.



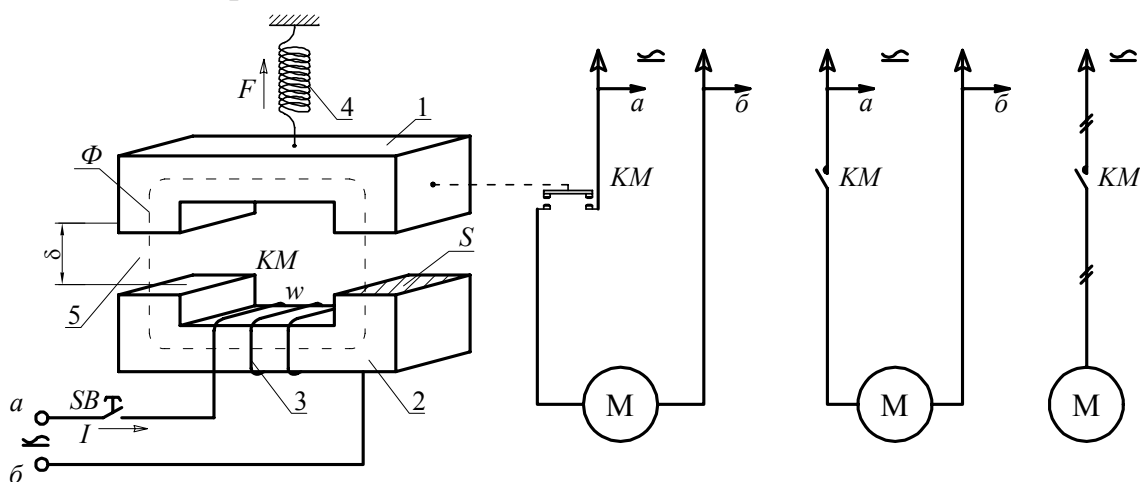
**Рис. 4.47. К понятию о бездуговой коммутации**

При переходе тока через ноль проводящий тиристор закрывается, а непроводящий не откроется, так как нет управляющего сигнала в цепи управления.

#### 4.5. Электромагнитные механизмы

##### Общие положения. Принцип действия

Большинство электрических аппаратов (например, контакторы, пускатели, реле, автоматы и электромагнитные муфты) имеют в своём составе электромагнитный механизм (ЭММ). Рассмотрим его простейшую конструкцию на основе принципиальной схемы включения двигателя на постоянном или переменном токе.



**Рис. 4.48. Принцип работы ЭММ на примере электромагнитного контактора:**

$1$  – якорь, подвижная часть ЭММ, с ней механически связано то, что необходимо переместить, повернуть (контакт магнитного пускателя  $KM$ , вал выключателя, защёлку расцепителя);  $2$  – сердечник, неподвижная часть ЭММ, жёстко связана с корпусом ЭА;  $3$  – намагничивающая катушка (обмотка)  $KM$ ,  $4$  – возвратная пружина;  $5$  – воздушный

зазор;  $S$  – площадь полюса сердечника и якоря;  $w$  – количество витков;  $a, b$  – возможные точки подключения катушки

### ***Принцип действия***

При замыкании контакта  $SB$  напряжение подается на катушку 3, по ее виткам  $w$  протекает ток (согласно закону Ома). Ток создаёт магнитный поток и намагничивающую силу  $F = I \cdot w$  (согласно закону полного тока). Под действием намагничивающей силы якорь намагничивается и притягивается к полюсам сердечника. Магнитный поток замыкается как через зазор  $\delta$ , так и между другими частями магнитной цепи. Воздушный зазор  $\delta$ , изменяющийся при перемещении якоря, называется рабочим. Соответственно магнитный поток, проходящий через рабочий зазор, называется рабочим магнитным потоком. Все остальные потоки в магнитной цепи, не проходящие через рабочий зазор, называются потоками рассеяния. Из курса физики известно (закон Максвелла), что сила притягивающая якорь к сердечнику прямо пропорциональна квадрату магнитного потока в рабочем зазоре:

$$P_{\text{ЭМ}} = \frac{B^2 \cdot S}{\mu_0} = \frac{B^2 \cdot S}{\mu_0} \cdot \frac{S}{S} = \frac{\Phi^2}{\mu_0 \cdot S} = K \cdot \Phi^2, \quad (4.58)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$  – магнитная проницаемость вакуума;

$$K = \frac{1}{\mu_0 \cdot S} \text{ – постоянная величина.}$$

### ***Законы, действующие в теории магнитных цепей***

1. Закон полного тока, который показывает связь между током и напряженностью магнитного поля, то есть магнитодвижущая сила равна произведению тока на количество витков:

$$H \cdot l = I \cdot w = F_{\text{М}}, \quad (4.59)$$

где  $l = 2 \cdot \delta$  – для магнитной системы с двумя воздушными зазорами (считается, что вся сила затрачивается на проведение магнитного потока по воздушному зазору);

$F_{\text{М}}$  – магнитодвижущая сила (МДС) или намагничивающая сила.

2. Связь напряженности магнитного поля с вектором магнитной индукции:

$$H = \frac{B}{\mu}, \quad (4.60)$$

3. Связь между магнитным потоком и вектором магнитной индукции:

$$\Phi = B \cdot S, \quad (4.61)$$

где  $S$  – площадь полюсов магнита.



Определим параметры, влияющие на величину электромагнитной силы. Из выражения (4.59) выразим напряженность магнитного поля  $H$ :

$$H = \frac{w \cdot I}{l} = \frac{w \cdot I}{2 \cdot \delta} \quad (4.62)$$

Из уравнений (4.60) и (4.61) также выразим напряженность магнитного поля:

$$H = \frac{B}{\mu} = \frac{B \cdot S}{\mu \cdot S} = \frac{\Phi}{\mu \cdot S} \quad (4.63)$$

Приравниваем правые части уравнений (4.62) и (4.63):

$$\frac{\Phi}{\mu \cdot S} = \frac{w \cdot I}{2 \cdot \delta} \quad (4.64)$$

Выразив из уравнения (4.64) магнитный поток, получим закон Ома для магнитной цепи:

$$\Phi = \frac{w \cdot I}{\frac{2 \cdot \delta}{\mu \cdot S}} = \frac{\mu \cdot S \cdot w \cdot I}{2 \cdot \delta} \quad (4.65)$$

где  $\mu = \mu_0 \cdot \mu_{\text{отн}}$  — магнитная проницаемость. Для воздуха  $\mu_{\text{отн}} = 1$ ,  $\mu = \mu_0$ :

$$\Phi = \frac{F}{R_M} \quad (4.66)$$

где  $R_M = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{2 \cdot \delta}{S}$  — магнитное сопротивление рабочего зазора.

Подставив закон Ома для магнитной цепи в уравнение (4.58), получим выражение для электромагнитной силы:

$$P_{\text{эм}} = K \cdot \Phi^2 = \frac{(I \cdot w)^2}{R_M^2} \cdot K = K' \cdot I^2 \quad (4.67)$$

где  $K = \frac{1}{2 \cdot \delta}$  и  $K' = \frac{w^2}{2 \cdot \delta \cdot R_M^2}$  — постоянные величины.

**Вывод:** сила, с которой якорь притягивается к сердечнику, пропорциональна квадрату тока, протекающего по катушке.

### ***Классификация электромагнитных механизмов***

1. По роду тока, протекающего по катушке.

- а) электромагнитные механизмы постоянного тока;
- б) электромагнитные механизмы переменного тока.

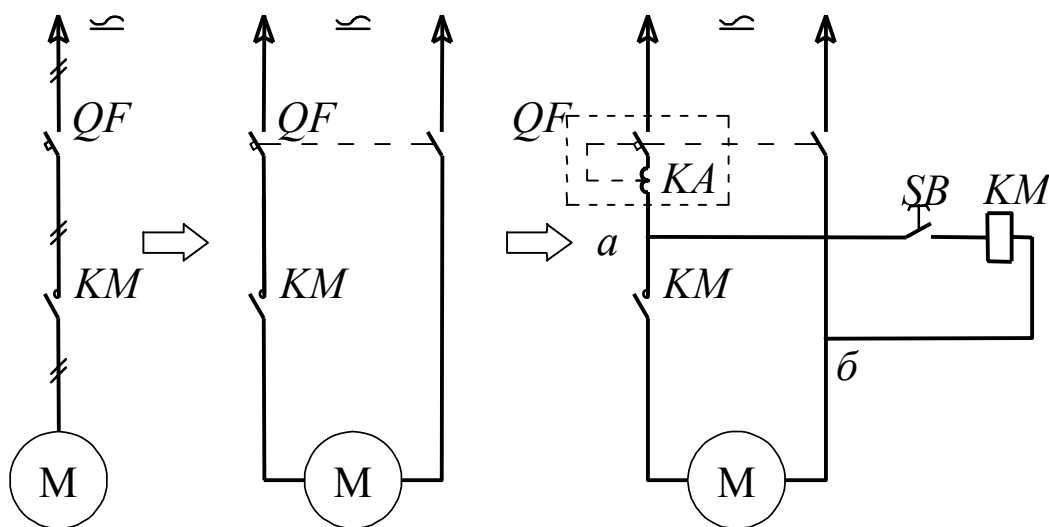
2. По способу включения катушки.

а) с параллельной катушкой. Ток в катушке определяется параметрами самой катушки и напряжением, подводимым к ней. Катушка

выполняется с большим числом витков из тонкого проводника с большим сопротивлением. Ток, протекающий по ней, будет незначителен.

б) с последовательной катушкой. Ток в катушке определяется сопротивлением устройства (элемента электрической сети), которое включено последовательно в цепь электромагнита. Катушка обладает малым сопротивлением и выполняется из небольшого числа витков провода большого сечения, и иногда имеет вид шины, проходящей через “окно” магнитной системы (т.е. представляет один виток).

Рассмотрим способы включения катушек ЭММ на примере схемы включения однофазного электродвигателя:



**Рис. 4.49. Способы включения катушек ЭММ:**

КМ – катушка параллельного включения (катушка контактора); КА – катушка последовательного включения (катушка токового расцепителя автоматического выключателя)

### 3. По характеру движения якоря.

а) поворотные ЭММ - якорь поворачивается вокруг какой-либо оси или опоры;

б) прямоходовые - якорь перемещается поступательно.

### 4. По способу действия.

а) притягивающие – совершают работу, перемещая на некоторое расстояние свой якорь, сообщив тем самым движение тому или иному исполнительному механизму;

б) удерживающие – для удержания тех или иных грузов или деталей (например, электромагнитные столы станков, электромагнитные муфты сцепления вращающихся валов, электромагниты подъемных кранов, электромагнит расцепителя минимального напряжения автоматических выключателей).

### **Электромагниты постоянного тока**

Магнитный поток создаётся обмоткой постоянного тока. Действие силы не зависит от направления тока, т.е. якорь всегда притягивается к сердечнику вне зависимости от направления тока.

#### *Основные характеристики*

1. *Тяговая (статическая) характеристика* - это зависимость электромагнитной силы от величины рабочего зазора. Тяговые характеристики электромагнита снимаются при  $U = \text{const}$  (электромагнит с параллельной катушкой) и при  $I = \text{const}$  (электромагнит с последовательной катушкой) и выражают зависимость:

$$P_{\text{ЭМ}} = f(\delta). \quad (4.68)$$

Применим формулу Максвелла для электромагнита с двумя зазорами:

$$P_{\text{ЭМ}} = \frac{B^2 \cdot S}{\mu_0} \cdot \frac{S}{S} = \frac{\Phi^2}{\mu_0 \cdot S}. \quad (4.69)$$

Выразим поток из закона Ома для магнитной цепи и подставим в формулу Максвелла (4.69):

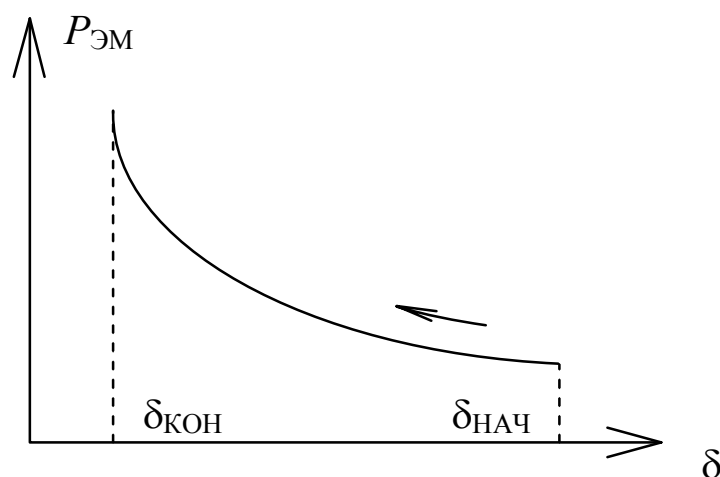
$$\Phi = \frac{F}{R_M} = \frac{I \cdot w}{\frac{1}{\mu} \cdot \frac{2\delta}{S}} \rightarrow P_{\text{ЭМ}} = \left( \frac{I \cdot w}{\frac{1}{\mu} \cdot \frac{2\delta}{S}} \right)^2 \frac{1}{\mu_0 \cdot S} = \frac{\mu_0 \cdot S}{4\delta^2} \cdot (I \cdot w)^2, \quad (4.70)$$

$$P_{\text{ЭМ}} = K \cdot \frac{1}{\delta^2}, \quad (4.71)$$

где  $K = \frac{\mu_0 \cdot S}{4} \cdot (I \cdot w)^2$  – постоянная величина для конкретного ЭММ.

Электромагнитная сила обратно пропорциональна величине рабочего зазора. Якорь по мере притягивания движется с ускорением, сила все время увеличивается, достигая максимальной величины при конечной величине зазора  $\delta_K$ .

Графическое выражение уравнения (4.71) представлено на рис. 4.50.

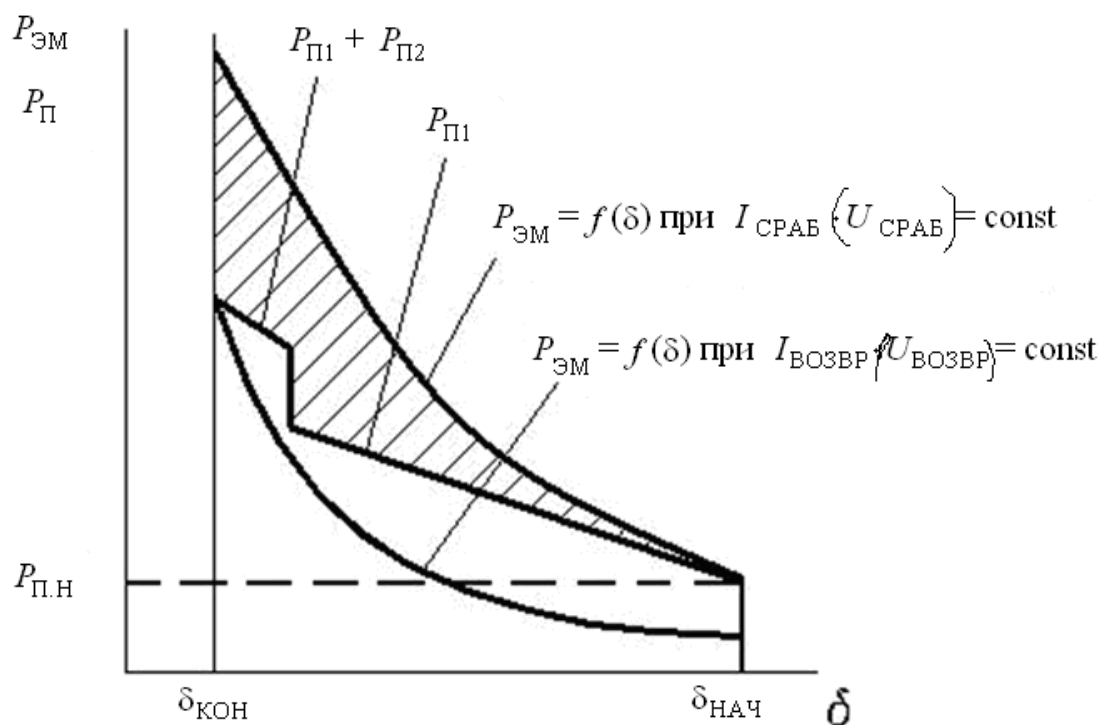


**Рис. 4.50. Зависимость электромагнитной силы от величины зазора:**

$\delta_{\text{НАЧ}}$ ,  $\delta_{\text{КОН}}$  – соответственно начальная и конечная величина рабочего зазора

## 2. *Согласование тяговой характеристики с нагрузкой электромагнита.*

Согласование производится сравнением тяговой и противодействующей характеристики путём построения их в одних осях. Такое согласование даёт возможность сделать заключение о работоспособности электромагнита. Для нормального срабатывания ЭММ необходимо, чтобы тяговая характеристика, построенная при  $I_{\text{СРАБ}} = \text{const}$ , во всём диапазоне изменения хода якоря проходила выше характеристики противодействующей пружины. Для чёткого возврата (отпускания) якоря необходимо, чтобы тяговая характеристика, построенная при  $I_{\text{ВОЗВР}} = \text{const}$  проходила ниже противодействующих характеристик. Если будет хотя бы одна общая точка, возникает эффект зависания якоря.



**Рис. 4.51. Сравнение тяговой и противодействующей характеристик ЭММ:**

$\delta_{\text{КОН}}$  – конечный рабочий зазор;  $\delta_{\text{НАЧ}}$  – начальный рабочий зазор;  $P_{\text{П}}$  – сила противодействующей пружины;  $P_{\text{П.Н}}$  – начальная сила противодействующей пружины;  $P_{\text{П1}}$  – противодействующая сила пружины, возврата якоря;  $P_{\text{П2}}$  – сила контактной пружины (обеспечивает “провал” контактов), возникает в момент замыкания магнитной системы;  $P_{\text{ЭМ}}$  – электромагнитная сила при токе (напряжении) срабатывания

3. *Время срабатывания* - это время с момента подачи сигнала тока (напряжения) на обмотку электромагнита до перехода якоря в его конечное положение.

#### *Параметры электромагнита*

1) мощность, потребляемая электромагнитом в установившемся режиме (якорь замкнут). При этом считается, что весь ток, проходящий по катушке, идет на ее нагрев и в паспорте приводится активная мощность.

Активная мощность для последовательной катушки:

$$P = I^2 \cdot R_0. \quad (4.72)$$

Активная мощность для параллельной катушки:

$$P = \frac{U^2}{R_0}, \quad (4.73)$$

где  $R_0$  – сопротивление обмотки.

2) *коэффициент запаса* - это отношение МДС в установившемся режиме к МДС трогания:

$$K_3 = \frac{F_y}{F_{\text{ТРОГ}}} = \frac{I_y}{I_{\text{СРАБ}}} > 1; \quad K_3 = \frac{U_H}{U_{\text{СРАБ}}} > 1, \quad (4.74)$$

3) напряжение (ток) срабатывания, возврата.

*Напряжение (ток) срабатывания* – это минимальное значение, при котором происходит срабатывание электромагнита.

*Напряжение (ток) возврата* – это максимальное значение, при котором якорь возвращается в исходное положение.

4) *коэффициент возврата* – это отношение МДС, при которой происходит возврат якоря к МДС, при которой происходит срабатывание:

$$K_B = \frac{F_{\text{ВОЗВ}}}{F_{\text{СРАБ}}} = \frac{I_{\text{ВОЗВ}}}{I_{\text{СРАБ}}} < 1, \quad (4.75)$$

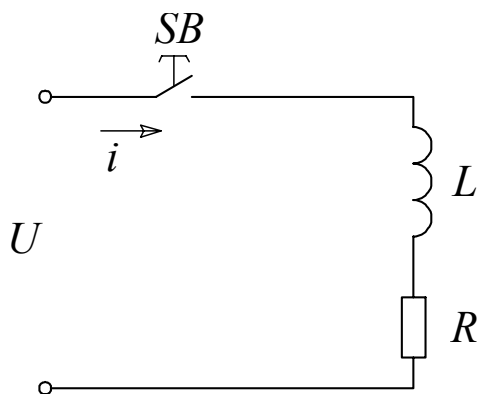
$$K_B = \frac{U_{\text{ВОЗВ}}}{U_{\text{СРАБ}}} < 1. \quad (4.76)$$

Для различных электромагнитных устройств коэффициент возврата находится в пределах  $K_B = 0,1 \div 0,9$ . Максимальное значение поддерживают в устройствах релейной защиты (у максимальных токовых реле).

#### *Динамика срабатывания электромагнита*

До сих пор были рассмотрены только статические характеристики, при которых принята неизменность тока в обмотке независимо от того, неподвижен якорь либо движется. В таком режиме работают тормозные и удерживающие электромагниты. У большинства электромагнитов процесс срабатывания имеет динамический характер.

При движении якоря изменяется индуктивность системы, и динамические характеристики электромагнитной силы будут несколько отличаться от статических характеристик, которые характеризуют тяговое усилие при фиксированном положении якоря. Изменение тока и потока в зависимости от зазора при неподвижном и подвижном якоре отличаются друг от друга.



**Рис. 4.52. Срабатывание электромагнита**

Запишем второй закон Кирхгофа для данной цепи:

$$U = i \cdot R + \frac{d\Psi}{dt}, \quad (4.77)$$

где  $\Psi$  – потокосцепление,  $\Psi = i \cdot L_{\text{д}}$ .

Так как в начальном положении якоря рабочий зазор максимален, то магнитную цепь можно считать ненасыщенной, а индуктивность обмотки – постоянной. Поскольку  $\Psi = i \cdot L_{\text{д}}$  и  $L_{\text{д}} = \text{const}$ , то  $\frac{dL_{\text{д}}}{dt} = 0$ , следовательно, выражение (4.77) можно преобразовать:

$$U = i \cdot R + L_{\text{д}} \cdot \frac{di}{dt}, \quad (4.78)$$

где  $L_{\text{д}}$  – динамическая индуктивность.

Решение этого уравнения имеет вид:

$$i = I_{\text{у}} \cdot \left(1 - e^{-t/T}\right), \quad (4.79)$$

где  $I_{\text{у}} = \frac{U}{R}$  – установившееся значение тока;

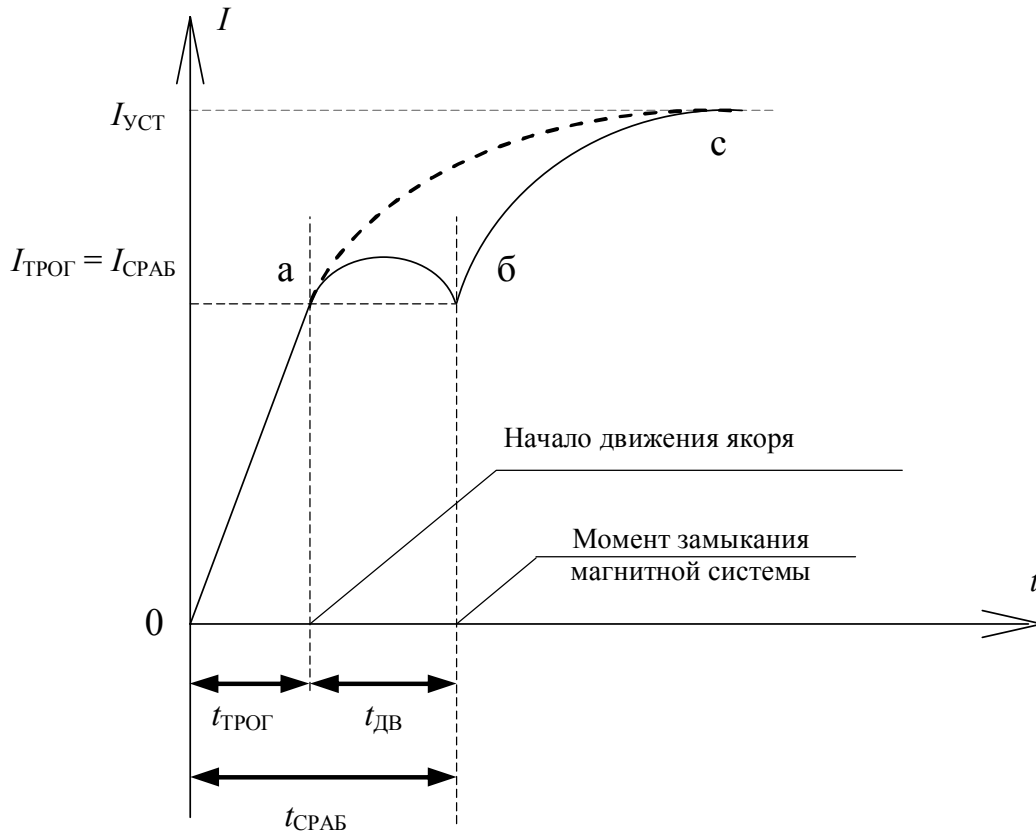
$T = \frac{L_{\text{д}}}{R}$  – постоянная времени цепи.

Графическое решение этого уравнения изображено на рис.4.53 в виде пунктирной линии.

Ток обмотки, при котором начинается движение якоря, называется током трогания  $I_{\text{ТРОГ}}$ , а время нарастания тока от нуля до  $I_{\text{ТРОГ}}$  – временем трогания  $t_{\text{ТРОГ}}$ . Как только начинается движение якоря (точка *a* на рис.4.53), зазор уменьшается, индуктивность обмотки увеличивается. Так как при движении индуктивность изменяется и член  $i \frac{dL_{\text{д}}}{dt}$  имеет конечное значение, то (4.77) примет вид:

$$U = i \cdot R + L_{\text{д}} \cdot \frac{di}{dt} + i \cdot \frac{dL_{\text{д}}}{dt}, \quad (4.80)$$

Проанализируем изменение тока в катушке электромагнита при его срабатывании (рис.4.53).



**Рис. 4.53. Изменение тока в катушке электромагнита при его срабатывании**

На участке кривой  $o-a$  якорь неподвижен, магнитная система разомкнута, индуктивность системы постоянна. В момент времени  $t = t_{\text{ТРОГ}}$  якорь трогается и движется до момента замыкания с сердечником (участок кривой  $a-b$ ). При движении якоря на участке  $a-b$  происходит уменьшение воздушного зазора и рост значения динамической индуктивности, что вызывает появление в цепи катушки противо-ЭДС  $i \frac{dL_{\text{д}}}{dt}$  и тем самым снижает ток в катушке. При изменении тока возникают вихревые токи и явление гистерезиса, которые также оказывают влияние на работу механизма. При неподвижном якоре нарастание тока происходило бы по пунктирному участку кривой ( $a-c$ ). Точка  $b$  — соответствует моменту замыкания полюсов якоря с полюсами сердечника и остановке якоря. Индуктивность системы за счет уменьшения зазора резко возросла, но в дальнейшем изменяется мало с ростом тока. Ток в катушке нарастает до установившегося значения на участке ( $b-c$ ).



*Время срабатывания электромагнита* – это время с момента подачи напряжения на обмотку до момента остановки якоря: время срабатывания = время трогания + время движения якоря:

$$t_{\text{СРАБ}} = t_{\text{ТРОГ}} + t_{\text{ДВ}}, \quad (4.81)$$

где  $t_{\text{ТРОГ}}$  – время трогания, представляющее время с начала подачи напряжения до начала движения якоря;

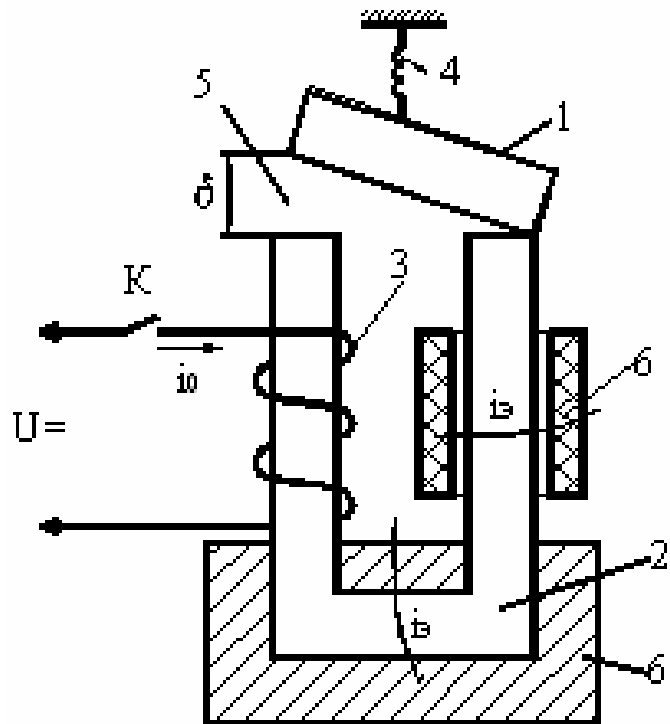
$t_{\text{ДВ}}$  – время движения якоря.

Для ускорения срабатывания электромагнита стараются уменьшить время движения якоря. Это достигается за счёт уменьшения вихревых токов, которые индуцируются в магнитной системе в переходном режиме. Вихревые токи всегда создают магнитный поток, который, согласно правилу Ленца, направлен встречно основному магнитному потоку.

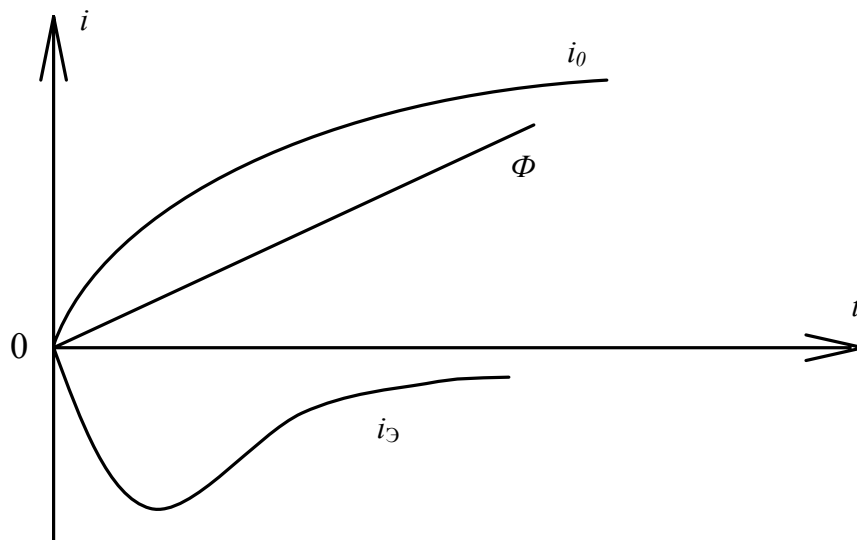
В некоторых случаях необходимо сделать замедление срабатывания (реле времени). Тогда используются все факторы, которые увеличивают время трогания и время движения якоря. Наибольшее распространение получило использование короткозамкнутых обмоток, надеваемых на полюса сердечника, из материалов с малым удельным электрическим сопротивлением. Такая обмотка может иметь всего один виток в виде медной или алюминиевой гильзы. Электромагнит с короткозамкнутой обмоткой показан на рис. 4.54.

При включении катушки (питающей обмотки) и нарастании создаваемого ею магнитного потока, в короткозамкнутой обмотке наводится ЭДС. ЭДС вызывает ток такого направления, при котором магнитный поток короткозамкнутой обмотки направлен встречно потоку питающей обмотки. Результирующий поток равен разности этих потоков. Скорость нарастания потока в электромагните уменьшается, время трогания увеличивается и тем самым создается замедление при срабатывании якоря.

При отключении катушки электромагнита происходит спадание магнитного потока системы. Характер уменьшения потока определяется процессом затухания тока катушки (согласно закону полного тока), но так как в системе присутствуют короткозамкнутые обмотки, то в них наводится ЭДС (согласно закону электромагнитной индукции) и возникает ток (согласно закону Ома). Направление тока подчинено правилу Ленца, а именно: поток, создаваемый током, протекающим в короткозамкнутых витках, препятствует уменьшению потока в системе. Замедление спадания потока создает выдержку времени при отпуске и тем самым создается замедление при отпуске якоря.



**Рис. 4.54.** Принцип замедления срабатывания и возврата электромагнитного реле  
 1 – якорь; 2 – сердечник; 3 – катушка; 4 – возвратная пружина; 5 – воздушный зазор;  
 6 – короткозамкнутая гильза; 6' – корпус из силумина, в котором находится сердечник,  
 поэтому данная конструкция представляет собой короткозамкнутый виток, «намотанный»  
 вокруг магнитопровода



**Рис. 4.55.** Характеристики при срабатывании реле  
 $i_0$  – ток, протекающий по основной обмотке;  $i_Δ$  – вихревой ток, протекающий  
 по короткозамкнутым виткам

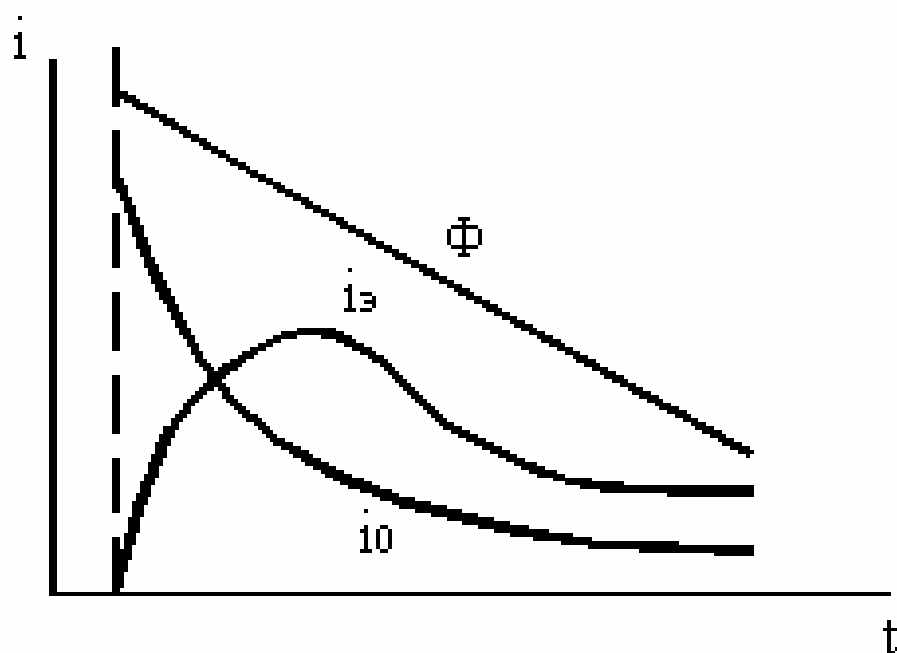


Рис. 4.56. Характеристики при отпускании якоря

*Вывод:* поток, создаваемый токами, возникающими в короткозамкнутых витках, и основной магнитный поток геометрически складываются. Поэтому результирующий магнитный поток нарастает (спадает) более медленно, чем это было бы без короткозамкнутых витков. В результате время срабатывания и время отпускания увеличиваются. При отпускании якоря замедляющие токи выше в 8-12 раз, чем при срабатывании, так как индуктивность замкнутой системы больше, чем разомкнутой.

### *Электромагниты переменного тока*

Наименования параметров и характеристик электромагнитов переменного тока аналогичны, как и для электромагнитов постоянного тока. Основное отличие состоит в характере силы тяги электромагнитов переменного тока. Так как ток, протекающий в катушке, изменяется по синусоидальному закону, то и магнитный поток синусоидален. Поэтому  $P_{\text{ЭМ}}$  изменяется также по гармоническому закону:

$$P_{\text{ЭМ}} = \frac{\Phi^2}{\mu_0 \cdot S}, \quad (4.82)$$

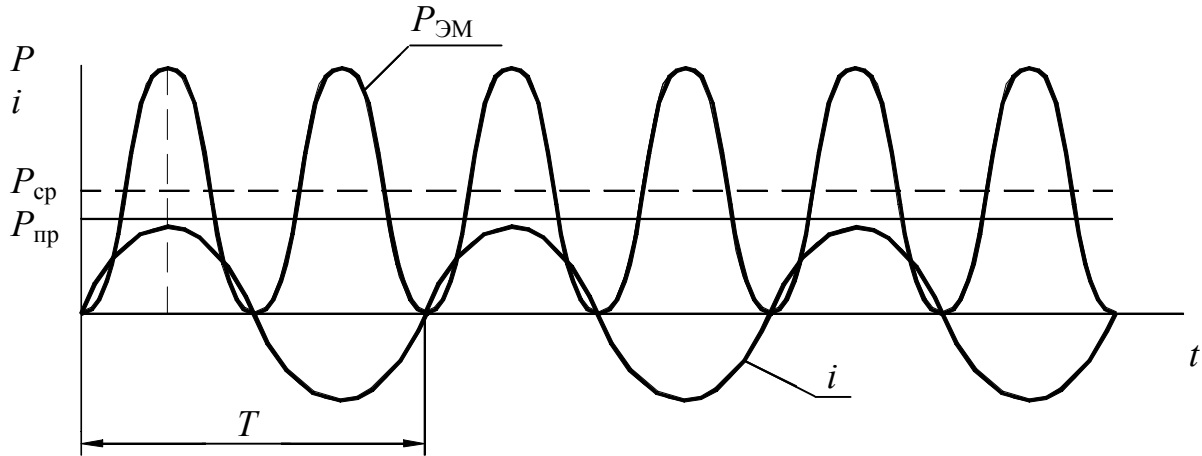
$$\Phi = \Phi_m \sin(\omega t), \quad (4.83)$$

$$P_{\text{ЭМ}} = \frac{\Phi^2}{\mu_0 \cdot S} \cdot \sin^2 \omega t = P_m \cdot \left( \frac{1}{2} - \frac{\cos 2\omega t}{2} \right) = \frac{P_m}{2} - \frac{P_m}{2} \cdot \cos 2\omega t, \quad (4.84)$$

т.е. мгновенное значение силы пульсирует с двойной частотой.

Среднее значение силы равняется половине амплитудного значения:

$$P_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T P_{\text{ЭМ}} dt = \frac{P_{\text{м}}}{2}. \quad (4.85)$$



**Рис. 4.57.** Сила, притягивающая якорь к сердечнику ЭММ при переменном токе

Чтобы якорь надёжно притянулся к сердечнику, необходимо, чтобы среднее значение силы  $P_{\text{ср}}$  было больше силы противодействующей пружины  $P_{\text{пр}}$ . Но существуют моменты времени, когда  $P_{\text{пр}} > P_{\text{ЭМ}}$ . Тогда якорь старается оторваться от сердечника, но не успевает в силу своей инерции. Таким образом, якорь в течение одного периода дважды стремится оторваться от сердечника и снова притянуться к нему, т.е. при переменном токе с частотой 50 Гц якорь имеет 100 колебаний в секунду. Каждое приближение якоря будет вызывать удар его о сердечник, что приводит к износу магнитной системы и подгоранию контактов. В результате наблюдается вибрация якоря и шум при работе электромагнита переменного тока.

#### *Меры по устранению вибрации якоря*

1. Создание массивного якоря. Недостаток этого мероприятия заключается в том, что увеличивается время срабатывания ЭММ.

2. Использование короткозамкнутых витков, расщепляющих полюс якоря. Рассмотрим это подробно. На большую часть полюса насаживается короткозамкнутый виток. Поток  $\Phi_2$ , проходящий под этой частью полюса, будет отставать от  $\Phi_1$  на  $60 \div 65^\circ$ . Под действием этих потоков возникают силы  $P_{\text{ЭМ1}}$  и  $P_{\text{ЭМ2}}$ , также сдвинутые по фазе. Сумма этих двух сил создает суммарную силу  $P$ . Средняя сила становится на всем протяжении больше силы противодействующей пружины, и вибрации не происходит (подробнее см. [1, с.221]). На рис. 4.58 приведено построение для идеального случая, когда угол между потоками составляет 90 градусов.

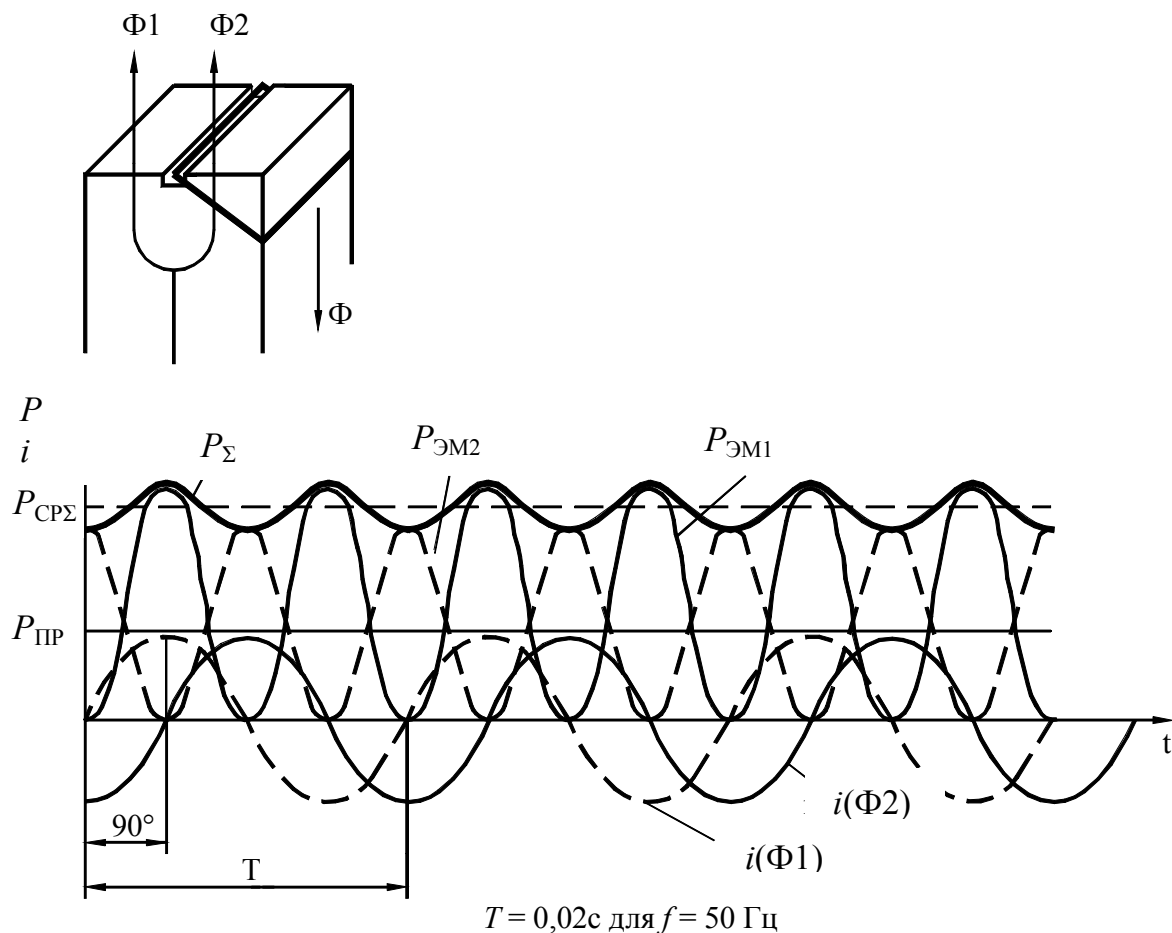
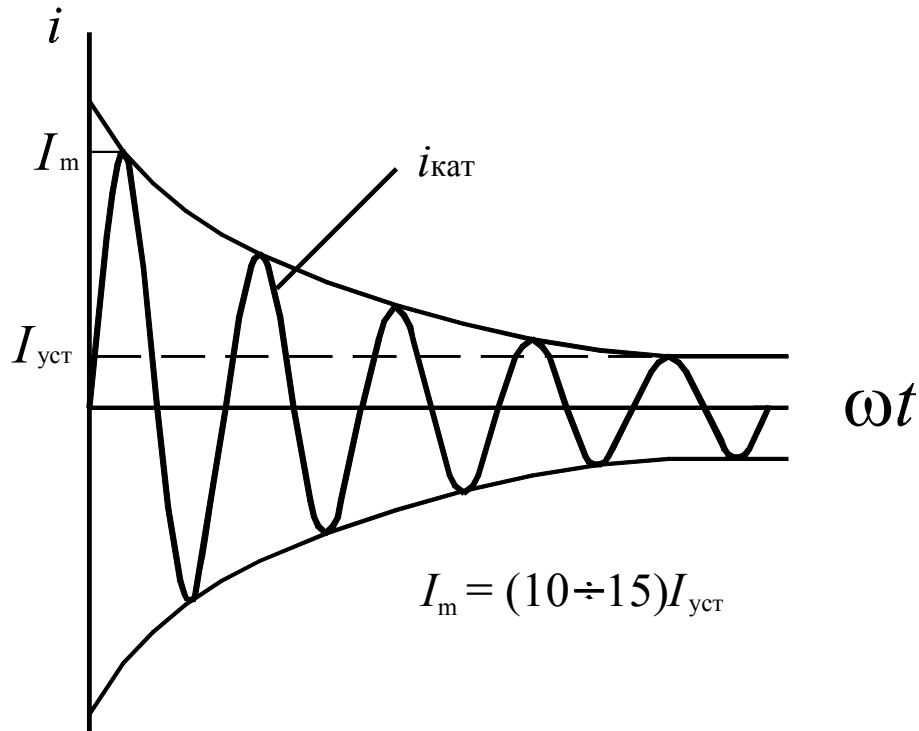


Рис. 4.58. К понятию об устранении вибрации якоря

### ***Сравнение тяговых статических характеристик электромагнитов постоянного и переменного тока***

1. Так как среднее значение силы ЭММ переменного тока равно  $\frac{P_m}{2}$ , то при тех же затратах электромагниты постоянного тока развивают усилия в два раза выше, чем электромагниты переменного тока.
2. При движении якоря с уменьшением зазора наблюдается два явления:
  - а) уменьшается магнитное сопротивление;
  - б) уменьшается значение тока в катушке якоря вследствие резкого возрастания индуктивного сопротивления.

При заданном напряжении сети в начальный момент времени в катушке протекает большой ток вследствие малого индуктивного сопротивления катушки, а значит возникает большое значение МДС, то есть наблюдается форсировочная способность электромагнита переменного тока. Поэтому они могут работать при больших зазорах, чем электромагниты постоянного тока.



**Рис. 4.59.** Уменьшение тока в катушке в результате увеличения индуктивного сопротивления катушки ЭММ после притяжения якоря к сердечнику

3. Электромагнитная сила ЭММ переменного тока лишь незначительно увеличивается с уменьшением зазора  $\delta$ , вследствие уменьшения потоков рассеивания:

Закон Ома для электрической цепи:

$$i = \frac{U}{x} = \frac{U}{\omega \cdot L} \approx \frac{U}{\omega \cdot \frac{w^2 \cdot S}{\delta}} \quad (4.86)$$

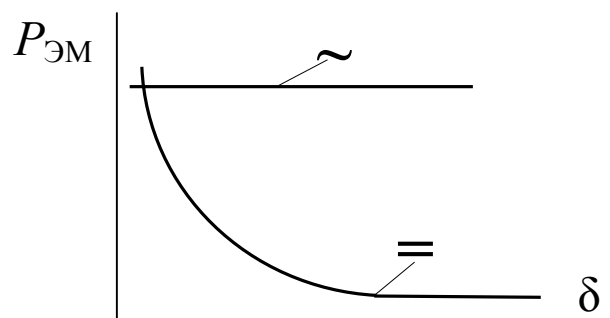
Закон Ома для магнитной цепи:

$$\Phi = \frac{F}{R_M} = \frac{i \cdot w}{R_M} \quad (4.87)$$

Преобразуем формулу Максвелла, используя закон Ома для магнитной цепи и закон Ома для электрической цепи:

$$P_{\text{ЭМ}} = \frac{\Phi^2}{\mu_0 \cdot S} = \frac{i^2 \cdot w^2}{R_M^2 \cdot \mu_0 \cdot S} = \frac{U^2}{\mu_0 \cdot w^2 \cdot \omega^2} \quad (4.88)$$

Электромагнитная сила  $P_{\text{ЭМ}}$  теоретически не зависит от величины воздушного зазора  $\delta$ , но зависит от частоты переменного тока.

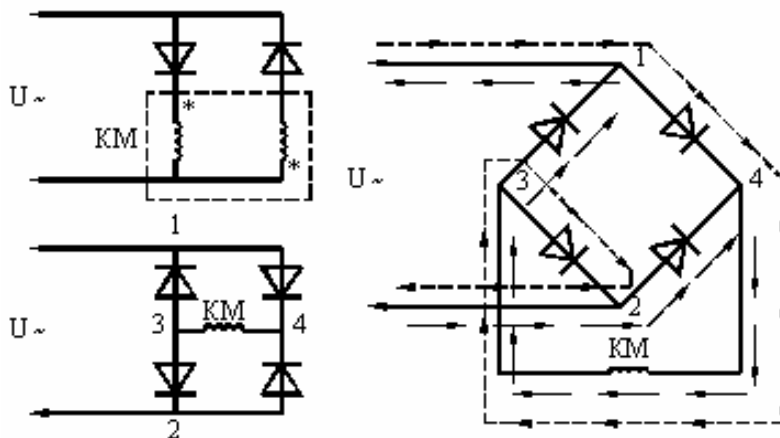


**Рис. 4.60.** Зависимость электромагнитной силы от величины зазора

#### *Недостатки электромагнитов переменного тока*

1. При заданной площади полюсов средняя сила тяги в два раза меньше, чем у электромагнитов постоянного тока.
2. В системе присутствует реактивная мощность.
3. Электромагнитная сила зависит от частоты сети.
4. Магнитопровод в ЭММ переменного тока обязательно выполняется шихтованным, то есть выполненным из пластин электротехнической стали, изолированных друг от друга.
5. Возникают дополнительные потери в магнитопроводе и короткозамкнутом витке.

Поэтому там, где необходимо совместить достоинства электромагнитов постоянного тока и имеющиеся в наличии источники переменного тока, используют электромагниты, работающие на выпрямленном токе.



**Рис. 4.61.** Использование полупроводниковых выпрямителей для выпрямления переменного тока:  
*KM* – катушка ЭММ постоянного тока

Пунктирной линией показан путь прохождения тока при положительной полуволне напряжения, а стрелками - при отрицательной полуволне напряжения.

#### ***Пересчёт катушек магнитных пускателей параллельного включения при переходе на новое напряжение***

В период наладки и эксплуатации электрооборудования иногда приходится пересчитывать катушки аппаратов на другие параметры. Пересчет

обмоточных данных катушек (при сохранении нормального объема) основан на следующих данных:

1. Магнитный поток, создаваемый катушкой, и ее МДС должны оставаться неизменными:

$$F_1 = F_2 = \dots = F = I \cdot w = \text{const} . \quad (4.89)$$

2. Тепловые потери в катушке должны остаться неизменными:

$$R_1 \cdot I_1^2 = R_2 \cdot I_2^2 = \dots = R \cdot I^2 = \text{const} . \quad (4.90)$$

Из электротехники известна связь между действующим значением синусоидального изменяющегося напряжения и вектором магнитной индукции:

$$E = \frac{d\Phi}{dt} , \quad (4.91)$$

$$U = 4,44 \cdot f \cdot w \cdot S \cdot B_m , \quad (4.92)$$

где  $f$  – частота, Гц;

$w$  – количество витков;

$S$  – площадь полюсов электромагнита;

$B_m$  – максимальное (амплитудное) значение вектора магнитной индукции.

Так как при переходе на новое напряжение  $B_m$  необходимо оставить неизменным, то для сохранения равенства (4.92) следует уменьшить число витков обмотки:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{4,44 \cdot f \cdot w_1 \cdot S \cdot B_m}{4,44 \cdot f \cdot w_2 \cdot S \cdot B_m} = \frac{w_1}{w_2} , \quad (4.93)$$

$$w_2 = w_1 \cdot \frac{U_2}{U_1} . \quad (4.94)$$

Постоянство  $B_m$  требует, чтобы и МДС оставалась неизменной, так как напряженность магнитного поля жестко связана с магнитной индукцией характеристикой намагничивания ферромагнитного материала.

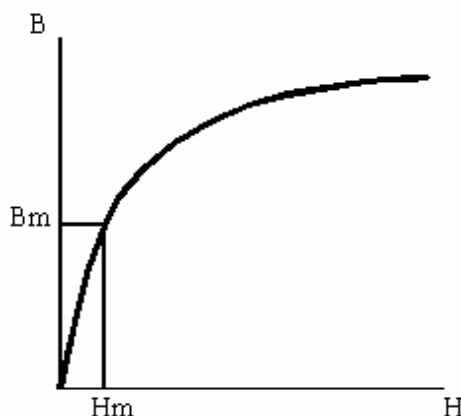


Рис. 4.62. Кривая намагничивания для ферромагнитного материала



Так как  $H \cdot 2 \cdot \delta = I \cdot w = F$ , то

$$F = I_1 \cdot w_1 = I_2 \uparrow w_2 \downarrow. \quad (4.95)$$

Уменьшение числа витков должно компенсироваться увеличением тока:

$$\frac{w_1}{w_2} = \frac{I_2}{I_1}. \quad (4.96)$$

Объединяем (4.94) и (4.96):

$$U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2, \quad (4.97)$$

т.е. полная мощность должна быть неизменной. При переходе на другое напряжение соотношение между активным и индуктивным сопротивлением изменяется незначительно. Поэтому принимают, что активная мощность изменяется незначительно:

$$P_1 = P_2, \quad (4.98)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = 1 = \frac{U_1^2}{R_1} \cdot \frac{R_2}{U_2^2}, \quad (4.99)$$

где  $R_1, R_2$  – активное сопротивление провода катушки:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} = \rho \frac{l_1 \cdot w}{\pi \cdot \frac{d^2}{4}}, \quad (4.100)$$

где  $l_1$  – длина одного витка;

$w$  – количество витков.

$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$  – площадь провода круглого сечения.

После преобразования получим:

$$\frac{U_1^2}{U_2^2} = \frac{R_1}{R_2} = \frac{w_1 \cdot d_2^2}{w_2 \cdot d_1^2}. \quad (4.101)$$

Подставив в (4.101) значение  $\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2}$  из (4.94):

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{d_2^2}{d_1^2}, \quad d_2 = d_1 \cdot \sqrt{\frac{U_1}{U_2}}. \quad (4.102)$$

#### Пример расчета

Дано:  $U_1 = 220$  В,  $w_1 = 2700$ ,  $d_1 = 0,2$  мм.

Пересчитать катушку на напряжение  $U_2 = 380$  В, т.е. определить  $w_2$  и  $d_2$ .

По формуле (4.94)  $w_2 = w_1 \frac{U_2}{U_1} = 2700 \cdot \frac{380}{220} = 4700$  витков.

По формуле (4.103)  $d_2 = 0,2 \sqrt{\frac{220}{380}} \cong 0,15$  мм.