

1) Действие электродинамических сил на аппараты

Электродинамические усилия – это усилия, возникающие в токопроводящих элементах под воздействием магнитного поля при прохождении по ним электрического тока.

При нормальных эксплуатационных условиях электродинамические силы, как правило, малы и не вызывают каких-либо деформаций, а тем более поломок деталей в аппаратах. Однако при коротких замыканиях эти силы достигают весьма больших значений и могут вызвать деформацию или разрушение не только отдельных деталей, но и всего аппарата. Это обстоятельство требует проведения расчета аппарата (или отдельных его узлов) на электродинамическую устойчивость, т.е. на способность выдержать без повреждений прохождение наибольшего возможного в эксплуатационных условиях (или заданного) тока короткого замыкания. Такой расчет тем более необходим ввиду того, что с целью получения минимальных габаритов в аппаратах стремятся располагать токоведущие части как можно ближе друг к другу.

Так как переменный ток при отсутствии апериодической составляющей отличается от постоянного изменением силы тока и направлением изменяющихся по синусоидальному закону, то и электродинамическая сила будет иметь переменное значение.

Для упрощения рассмотрим электродинамические силы, возникающие в различных частях электрического аппарата при постоянном токе.

Возникновение электродинамических сил

Обтекаемый ток i прямолинейный проводник длиной l (рис. 1), расположенный в магнитном поле с индукцией B , испытывает механическую силу

$$F = ilB \sin \beta \quad (1)$$

где β - угол между направлением вектора магнитной индукции и направлением тока в проводнике.

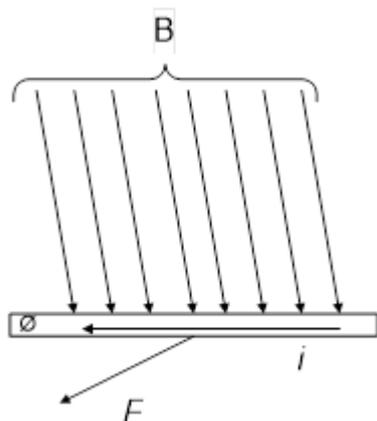


Рис. 1.

Для системы из нескольких обтекаемых током проводников можно всегда представить, что любой из этих проводников расположен в магнитном поле, созданном токами других проводников, и соответствующим образом взаимодействует с этим полем, т. е. между проводниками, охваченными общим магнитным потоком, всегда возникают механические силы. Эти силы называются *электродинамическими*.

Аналогичные силы возникают между проводником, обтекаемым током, и ферромагнитной массой.

Направление действия силы

Направление действия силы определяется «правилом левой руки».

Направление действия силы может быть также определено из следующего общего положения: силы, действующие в контуре с током, стремятся изменить конфигурацию контура так, чтобы охватываемый контуром магнитный поток увеличился.

Удобным для определения направления действия электродинамической силы является метод, предложенный академиком В.Ф. Миткевичем, основанный на представлении бокового распора и тяжения магнитных линий.

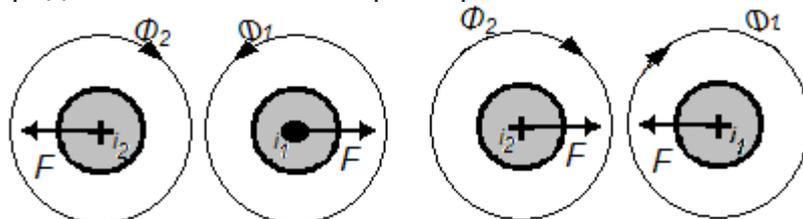


рис.2

Рисуют и накладывают друг на друга картины магнитных полей, создаваемых током каждого из проводников. Благодаря боковому распору магнитных силовых линий сила, действующая на проводник, направлена в сторону, где поле ослаблено (рис. 2).

2. Методы расчета электродинамических сил

Расчет электродинамических сил ведется обычно либо на основании закона взаимодействия проводника с током и магнитным полем (первый метод), либо по изменению запаса магнитной энергии системы (второй метод).

В первом – сила рассматривается как результат взаимодействия проводника с током и магнитного поля по правилу Ампера. Если элементарный проводник dl с током i находится в магнитном поле с индукцией B , создаваемой другими проводниками (рис. 1), то сила dF , действующая на этот элемент, равна:

$$dF = i \cdot dl \cdot B = i \cdot B \cdot dl \cdot \sin \beta$$

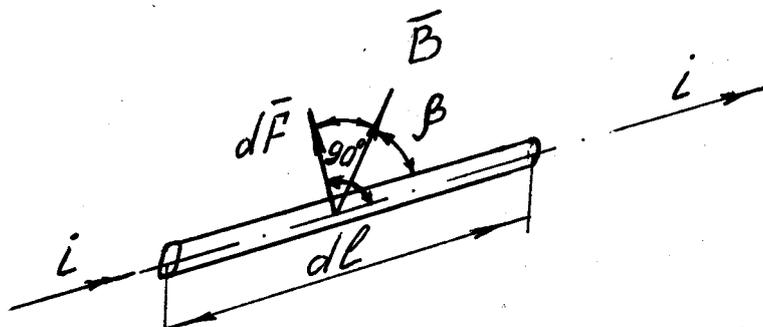


Рис. 1. Направление ЭДУ, действующего на элемент с током

где:

i – ток;

β – угол между векторами элемента dl и индукции B , измеряемый углом поворота вектора dl до вектора B по кратчайшему расстоянию.

За направление dl принимаем направление тока в элементе. Направление индукции B , создаваемой другим проводником, определяется по правилу Буравчика, а направление силы – по правилу левой руки.

Полная сила, действующая на проводник длиной l , определится по формуле

$$F = \int_0^l dF = \int_0^l B \cdot i \cdot \sin \beta \cdot dl.$$

В случае любого расположения проводников в одной плоскости $\beta = 90^\circ$, то выражение имеет вид

$$F = \int_0^l B \cdot i \cdot dl.$$

Описанный метод рекомендуется применять тогда, когда можно аналитически найти индукцию в любой точке проводника, для которого необходимо определить силу.

Второй метод

Расчет электродинамических сил по изменению запаса электромагнитной энергии контуров. Электромагнитное поле вокруг проводников и контуров с током обладает определенным запасом энергии. Электромагнитная энергия контура, обтекаемого током i ,

$$W = L \frac{i^2}{2} \quad (9)$$

Электромагнитная энергия двух контуров, обтекаемых токами i_1 и i_2 ,

$$W = L \frac{i_1^2}{2} + L \frac{i_2^2}{2} + M i_1 i_2 \quad (10)$$

где L_1, L_2 — индуктивности контуров; M — взаимная индуктивность контуров.

Всякая деформация контура (изменение расположения отдельных его элементов или частей) или изменение взаиморасположения контуров приводят к изменению запаса электромагнитной энергии. При этом работа сил в любой системе равна изменению запаса энергии этой системы:

$$F dx = dW \quad (11)$$

здесь dW — изменение запаса энергии системы при деформации системы в направлении x под действием силы F .

На указанном законе (11) и основан второй метод определения электродинамических сил в контурах. Электродинамическая сила в контуре или между контурами, действующая в направлении x , равна скорости изменения запаса энергии системы при деформации ее в том же направлении:

$$F_x = \frac{dW}{dx} \quad (12)$$

Согласно сказанному электродинамическая сила в контуре, обтекаемом током i ,

$$F_x = \frac{i^2 dL}{2 dx} \quad (13)$$

а электродинамическая сила между двумя взаимосвязанными контурами с токами i_1 и i_2 будет

$$1) \quad F_x = \frac{i_1^2 dL_1}{2 dx} + \frac{i_2^2 dL_2}{2 dx} + i_1 i_2 \frac{dM}{dx} \quad (14)$$

2) Бесконечной длины

Рассмотрим бесконечно тонкие проводники конечной длины (рис. 1.2). В этом случае легко аналитически найти индукцию в любой точке пространства. Поэтому для определения усилия можно воспользоваться первым методом.

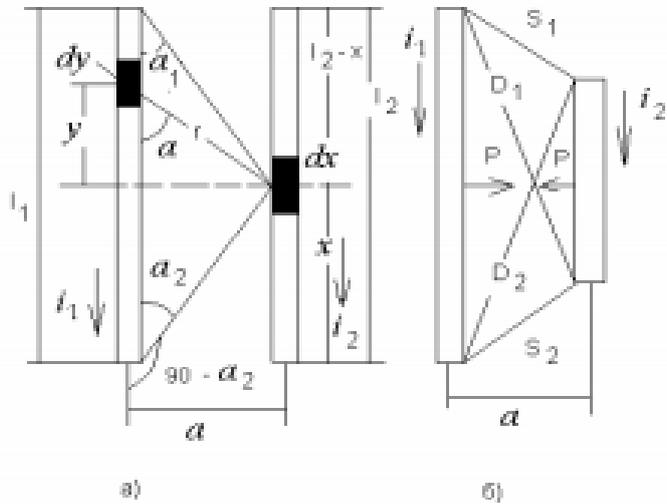


Рис. 1.2. ЭДУ между параллельными проводниками

Согласно закону Био-Савара-Лапласа элементарная индукция от элемента тока $i_1 dy$ в месте расположения элемента dx

$$dB = d\mu_0 H = \frac{\mu_0 i_1 dy}{4\pi r^2} \sin \alpha,$$

где μ_0 – магнитная постоянная, равная $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$;

α – угол между током i_1 и лучом r , проведенным от dy к dx .

Полная индукция от проводника i_1 в месте расположения элемента dx

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} i_1 \int_0^l \frac{\sin \alpha}{r^2} dy.$$

Перейдем к переменной a :

$$y = \frac{a}{\operatorname{tga}}; \quad r = \frac{a}{\sin a}; \quad dy = -\frac{a}{\sin^2 a} da.$$

После подстановки получим

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} i_1 \int_{x-a}^a -\frac{\sin a}{a} da = i_1 \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\cos a_1 + \cos a_2}{a}.$$

Усилие взаимодействия между проводником I_1 и элементом dx

$$dF_x = Bi_2 dx = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\cos a_1 + \cos a_2}{a} i_1 i_2 dx.$$

Переменной интегрирования теперь является x – координата на проводнике I_2 . Углы для каждой точки выражаются через переменную x следующим образом:

$$\cos a_1 = \frac{l_2 - x}{\sqrt{(l_2 - x)^2 + a^2}}; \quad \cos a_2 = \frac{lx}{\sqrt{x^2 + a^2}},$$

тогда

$$F = \int_0^l dF = \int_0^l Bi \sin \beta dl = \frac{10^{-7}}{a} l_1 l_2 \int_0^{l_2} \left[\frac{l_2 - x}{\sqrt{(l_2 - x)^2 + a^2}} + \frac{x}{\sqrt{x^2 + a^2}} \right] dx.$$

Этой формулой можно пользоваться в зависимости от отношений a/l .

Если $l_1 = l_2 = l$, то

$$F_x = 10^{-7} l_1 l_2 \frac{2l}{a} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{a}{l}\right)^2} - \frac{a}{l} \right].$$

Произведение $\frac{2l}{a} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{a}{l}\right)^2} - \frac{a}{l} \right]$, называемое коэффициентом контура k , зависит только от размеров проводников и их расположения. Тогда

$$F_x = 10^{-7} k i_1 i_2.$$

При нахождении ЭДУ было принято, что сечение проводников бесконечно мало и весь ток идет по их геометрической оси. В действительности сечение проводников всегда конечно. Круглая и кольцевая формы сечения проводников не влияют на ЭДУ, так как магнитные силовые линии вокруг проводников и в этом случае представляют собой окружности и можно считать, что ток сосредоточен в геометрической оси проводника. Следует отметить, что поверхностный эффект в проводниках круглого сечения не сказывается на ЭДУ, а эффект близости, смещающий токи в проводниках, вызывает увеличение ЭДУ при встречных и уменьшение – при согласованных токах.

При прямоугольной форме сечения его размеры влияют на ЭДУ, так как магнитные силовые линии около проводников являются не окружностями, а овалами. Это влияние учитывается с помощью кривых Двайта (рис. 1.3), по которым находится коэффициент формы k_Φ , после чего значение ЭДУ находится как

$$P = 10^{-7} k k_\Phi l_1 l_2.$$

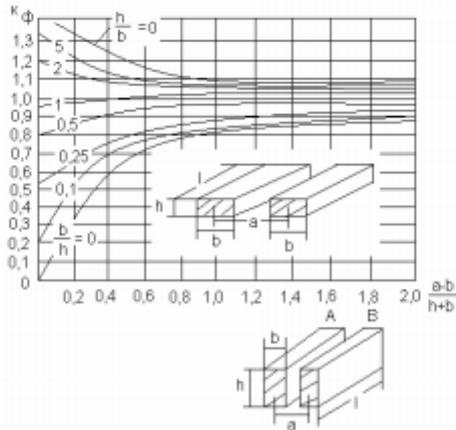


Рис. 1.3. Кривые Двайта, учитывающие влияние размеров поперечного сечения проводника

2.3. Условия гашения дуги постоянного тока.

Рассмотрим процесс гашения электрической дуги при отключении цепи постоянного тока, состоящей из источника с напряжением U , сопротивления R , индуктивности L и коммутационного аппарата с напряжением на дуге U_d (рис. 18, а).

При замкнутых контактах коммутационного аппарата $U_d = 0$.

Уравнение отключаемой цепи имеет вид

$$U = iR + U_d + L di/dt. \quad (14)$$

При устойчивом горении дуги, когда ток не изменяется, уравнение (15) будет иметь вид

$$U = iR + U_d. \quad (15)$$

Если это равенство не будет удовлетворяться, то при условии $U > (iR + U_d)$ появляется положительная ЭДС самоиндукции $(+L di/dt)$ и ток будет увеличиваться. Если $U < (iR + U_d)$, то возникает отрицательная ЭДС самоиндукции $(-L di/dt)$ и ток будет уменьшаться.

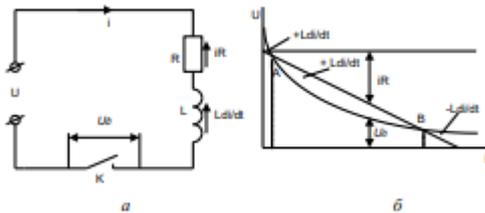


Рис. 18. К определению условия гашения дуги постоянного тока

Графически уравнение равновесия напряжений (14) представлено на рис. 18, б. Прямая параллельная оси абсцисс, соответствует напряжению источника U , а прямая, проведенная под углом к оси абсцисс, соответствует падению напряжения на сопротивлении R . Кривая I представляет статическую ВАХ дуги. Отрезки, заключенные между кривой $U_d = f(i)$ и прямой $(U - iR)$, соответствуют Ldi/dt .

ВАХ дуги и прямая $(U - iR)$ пересекаются в точках A и B . Уравнение (8) выполняется лишь в этих двух точках. Действительно, если по каким-либо причинам произойдет увеличение тока I_B , то в цепи возникает положительная ЭДС самоиндукции $(+Ldi/dt)$, уменьшающая ток до значения I_B . Наоборот, при уменьшении тока I_B в цепи возникает отрицательная ЭДС самоиндукции $(-Ldi/dt)$, которая будет увеличивать ток до значения I_B . Таким образом, точка B является точкой устойчивого горения дуги. Анализируя аналогичным образом изменение тока в точке A , можно сделать вывод, что точка A является точкой неустойчивого горения дуги, так как при уменьшении тока I_A отрицательная ЭДС самоиндукции $(-Ldi/dt)$ будет уменьшать ток до нуля и дуга погаснет.

Таким образом, электрическая дуга постоянного тока погаснет, если будет ликвидирована точка устойчивого горения (точка B), т. е., если ВАХ дуги будет лежать выше прямой $(U - iR)$ и не будет с ней пересекаться. Отсюда следует, что выражение

$$U_d > (U - iR) \quad (16)$$

характеризует условие гашения дуги постоянного тока.

Достигнуть этого можно либо увеличением сопротивления R , либо повышением падения напряжения на дуге. В первом случае увеличивается угол наклона прямой $iR = f(i)$. Во втором случае ВАХ поднимается выше.

В дугогасительных устройствах применяются следующие способы, позволяющие повысить падение напряжения на дуге:

- 1) растягивание дуги, при этом ВАХ перемещается параллельно самой себе в сторону больших падений напряжений;
- 2) деление дуги на ряд коротких дуг, при этом используются околоэлектродные падения напряжения;
- 3) повышение давления газов в дуговом промежутке;
- 4) движение дуги в газовой среде, или наоборот, обдувание дуги газами;
- 5) соприкосновение дуги с поверхностью твердого изоляционного материала.

Последние три метода повышают падение напряжения на дуговом промежутке за счет увеличения градиента напряжения в створе дуги.

4. 2.1.2. Вольт-амперная характеристика дуги (ВАХ)

Важнейшей характеристикой дуги является зависимость напряжения на ней от величины тока. Эта характеристика называется вольт-амперной. Имеет место статическая вольт-амперная характеристика и динамическая вольт-амперная характеристика.

С ростом тока i увеличивается температура дуги, усиливается термическая ионизация, возрастает число ионизированных частиц в разряде и падает электрическое сопротивление дуги r_d . Напряжение на дуге равно ir_d .

Зависимость напряжения на дуге от тока при медленном его изменении называется статической вольт-амперной характеристикой дуги.

Статическая характеристика дуги зависит от расстояния между электродами (длины дуги), материала электродов и параметров среды, в которой горит дуга.

a) Статическая вольт-амперная характеристика

$$U_d = U_{\text{э}} + E \cdot l,$$

где:

U_d - напряжение на дуге;

$U_{\text{э}}$ - сумма околоэлектродного падений напряжений;

E - напряженность поля в столбе дуги;

l - длина дуги.

Величина l зависит от тока и условий, в которых горит дуга. Статические вольт-амперные характеристики дуги имеют вид:

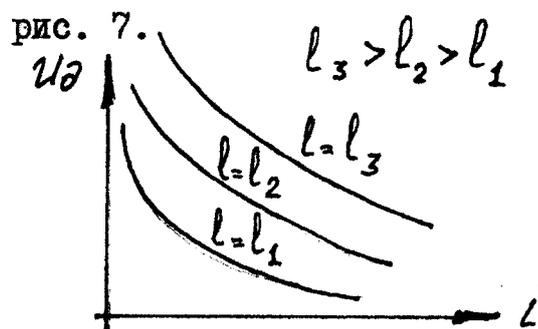


Рис. 1.

Чем больше длина дуги, тем выше лежит ее статическая вольт-амперная характеристика. С ростом давления среды, в которой горит дуга, также увеличивается напряженность E и поднимается вольт-амперная характеристика. Охлаждение дуги существенно влияет на эту характеристику. Чем интенсивнее охлаждение дуги, тем больше от нее отводится мощность. При этом должна возрастать мощность, выделяемая дугой. При заданном токе это возможно за счет увеличения напряжения на дуге. Таким образом, с ростом охлаждения вольт-амперная характеристика поднимается. Этим широко пользуются в дугогасительных устройствах аппаратов.

ВАХ дуги (рис.1) приведена для небольших плотностей токов (до 100 А/мм²). При дальнейшем увеличении тока ВАХ становится горизонтальной. Если продолжить увеличение тока – напряжение начнет увеличиваться.

б) Динамическая вольт-амперная характеристика дуги.

В реальных установках ток может меняться довольно быстро. Вследствие тепловой инерции дугового столба изменение сопротивления дуги отстает от изменения тока.

Зависимость напряжения на дуге от тока при быстром его изменении называется динамической вольт-амперной характеристикой.

При возрастании тока динамическая характеристика идет выше статической (кривая В на рис. 2), так как при быстром росте тока сопротивление дуги падает медленнее, чем растет ток. При уменьшении – ниже, поскольку в этом режиме сопротивление дуги меньше, чем при медленном изменении тока (кривая С на рис.2).

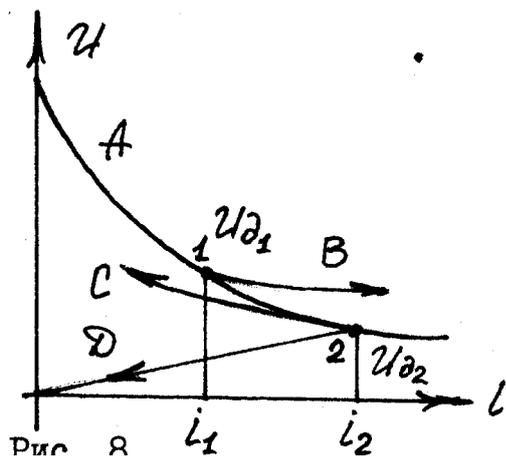


Рис.2

Динамическая характеристика в значительной степени определяется скоростью изменения тока в дуге. Если в цепь ввести очень большое сопротивление за время, бесконечно малое по сравнению с тепловой постоянной времени дуги, то в течение времени спада тока до нуля сопротивление дуги остается постоянным. В этом случае динамическая характеристика изобразится прямой проходящей из точки 2 в начало координат (прямая Д), т.е. дуга ведет себя как металлический проводник, так как напряжение на дуге пропорционально току.

В реальном аппарате после размыкания контактов расстояние между ними меняется и дуга имеет переменную длину. В этом случае процесс отключения можно представить следующим образом.

Разобьем путь, который проходит контакт, на участки и нанесем статические вольт-амперные характеристики, соответствующие концу каждого участка (рис. 3). Если индуктивность цепи мала, то по мере увеличения длины дуги ток будет быстро принимать значения, соответствующие точке пересечения статических характеристик с прямой $U - iR$. В точке 0 ток достигнет критического значения. При дальнейшем увеличении длины дуги наступят условия для гашения.

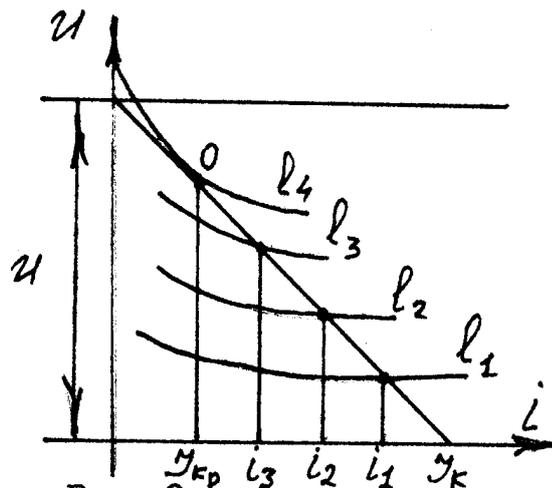


Рис. 3

Длина дуги, при которой статическая характеристика касается прямой $U - iR$, называется критической длиной дуги. После точки 0 ток быстро уменьшается до нуля, дуга гаснет.

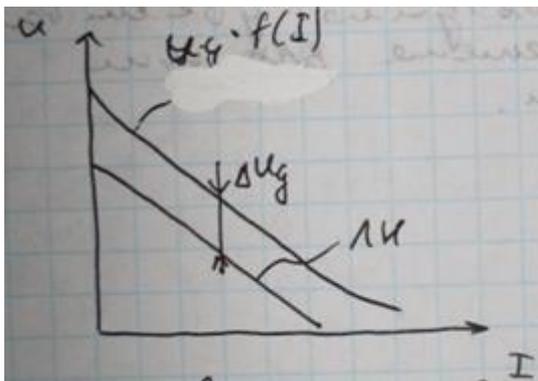
В цепи с большой индуктивностью спадание тока из-за большой величины индуктивности замедляется; вольт-амперная характеристика дуги сразу же после расхождения контактов поднимается выше прямой $U - iR$. В момент гашения дуги возможны большие перенапряжения.

При отключении активной нагрузки гашение происходит быстро, никаких перенапряжений не происходит.

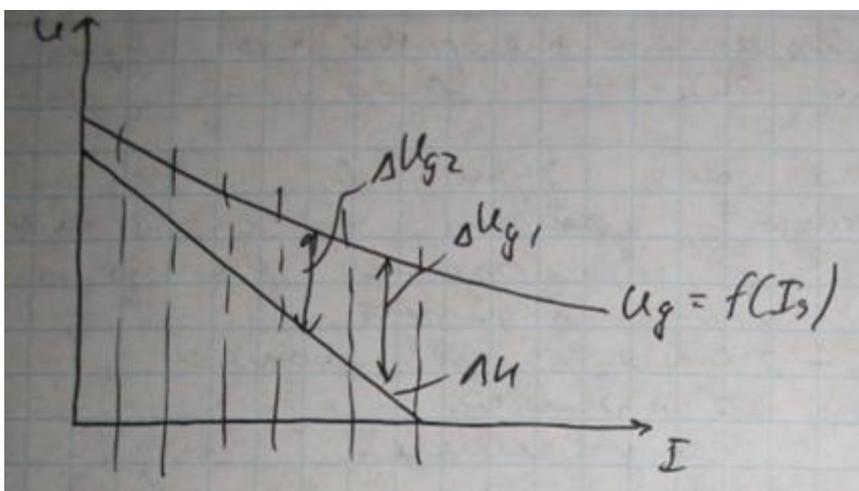
5) Время горения дуги t_d определяет износ контактов, который определяет срок службы ЭА. Время должно быть как можно меньше. Время дуги можно рассчитать из соотношения, для превышения ВАХ дуги над линией нагрузки отключаемой

цепи
$$VU_d = L \frac{di}{dt} \Rightarrow t_d = - \int_{I_k}^0 \frac{L di}{dVU_d}$$
, т.о. если превышение ВАХ дуги над

ЛН постоянно, то время горения дуги равно $t_d = \frac{L I_k}{D U_d}$, т.о. время горения дуги тем меньше, чем больше превышение напряжения VU_d .



Если превышение ВАХ дуги над ЛН не постоянно, то тогда функция разбивается на участки и расчет производится по каждому участку, а затем результат суммируется. Графически это можно представить следующим образом:



На каждом промежутке берется среднее значение $\sqrt{U_2}$, т.о. чем больше интервалов тем больше точность расчетов. Время горения

$$t_{\text{дуги}} = e \frac{L(I_{\text{жк}} - I_{\text{г}})}{\sqrt{U_2}}$$

Для уменьшения времени горения дуги необходимо увеличивать превышение напряжения ВАХ дуги над ЛН.

В момент погасания дуги, когда ток равен нулю, напряжение на дуговом промежутке равно напряжению гашения U_2 . В этом случае уравнение (14) принимает вид

$$U = L di/dt + U_2, \quad (17)$$

отсюда

$$U_2 = U - L di/dt. \quad (18)$$

Но так как $L di/dt < 0$, то (18) можно записать

$$U_2 = U + (L di/dt). \quad (19)$$

Таким образом, в момент гашения дуги напряжение на контактах равно напряжению источника плюс модуль напряжения на индуктивности. Увеличение напряжения на контактах относительно напряжения источника питания называется перенапряжением. Чем больше индуктивность коммутируемой цепи, чем больше скорость спада тока в момент гашения, тем больше перенапряжение на контактах коммутирующего аппарата. Скорость спада тока (di/dt) зависит от скорости роста сопротивления дугового промежутка, от скорости его деионизации. Поэтому, быстродействующие аппараты при отключении цепи постоянного тока могут давать большие перенапряжения. Эти перенапряжения могут в десятки раз превышать напряжение источника.

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

Как бы ни была тщательно обработана поверхность соприкосновения контактов, электрический ток проходит из одного контакта в другой только в отдельных точках, в которых эти поверхности касаются, так как абсолютно гладкой поверхности нельзя получить ни при каком методе ее обработки.

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

Положим, что контакты имеют только одну площадку касания и что эта площадка имеет форму круга с радиусом a . Величину радиуса a при пластической деформации можно найти по формуле

$$\pi \cdot a^2 = \frac{F}{G}$$

где:

F - сила нажатия контактов;

G - временное сопротивление на смятие материала контактов.

В результате стягивания линий тока к площадке касания путь тока меняется.

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

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

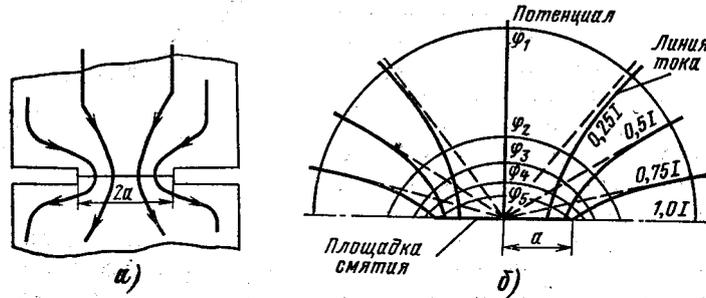


Рис. 2.2.1. Идеализированная картина растекания тока в точечном контакте

Картина растекания тока в области стягивания (рис. 2.2.1.а) аналогична картине растекания тока из плоского диска радиусом a полубесконечную среду. Учитывая, что размеры области стягивания малы по сравнению с размерами тела контакта, реальные контакты можно заменить полубесконечными телами. Для двух полубесконечных тел, контактирующих по одной круглой площадке касания, картина поля тока и электрических потенциалов представлена на рис. 31.б.

Эквипотенциальные поверхности являются полуэллипсоидами вращения, линии тока гиперболами с общим фокусом. Для такой идеализированной картины растекания тока в контактах переходное сопротивление

$$R_{\Pi} = \frac{\rho}{2a},$$

где ρ - удельное сопротивление.

С точностью до 5% эта формула справедлива, если поперечные размеры тела контакта превосходят в 13 раз диаметр площадки касания. Определив a , имеем

$$R_{\Pi} = \frac{\rho\sqrt{\pi G}}{2\sqrt{F}} = \frac{r}{F^{\frac{1}{2}}}$$

Если имеет место упругая деформация контактирующих выступов, то $F^{\frac{1}{3}}$.

Для многоточечных контактов

$$R_{\Pi} = \frac{r}{F^m},$$

где m – показатель, меняющийся от 0,7 до 1.

Сопротивление R_{Π} зависит и от обработки поверхности, Шлифовка ведет к тому, что на поверхности остаются более пологие выступы с большим сечением. Снятие таких выступов

возможно только при больших силах нажатия. Поэтому сопротивление шлифованных контактов выше, чем контактов с более грубой обработкой.

Мы рассмотрели только переходное сопротивление, вызванное явлением стягивания линий тока.

В действительности контактирующие поверхности покрыты адсорбированными молекулами газа, в котором располагались контакты до их замыкания. Очень часто эти молекулы вступают в химическую реакцию с материалом контактов, в результате чего на поверхности металла могут возникнуть пленки с очень высоким удельным сопротивлением.

Если напряжение замыкаемой цепи мало или нажатие на контакты недостаточно, то иногда контакты вообще не пропускают тока. Как только свежезачищенная поверхность контактов соприкасается с воздухом, сейчас же начинается процесс образования пленки и переходное сопротивление может возрасти в десятки раз.

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

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

При прохождении тока через область стягивания линий тока контакт нагревается.

С ростом температуры сопротивление стягивания изменяется из-за роста удельного сопротивления материала

$$R(\theta) = R(O) \left(1 + \frac{2}{3} \alpha \cdot \Delta \tau_K \right),$$

где $R(O)$ - сопротивление стягивания при температуре тела контакта $\theta_0 + \tau_T$.

Возрастание превышения температуры контактной точки $\Delta \tau_K$, приводит к увеличению сопротивления R_{Π} .

Конструкция твёрдометаллических контактов

а) Жесткие. Контакты служат для неподвижного соединения токоведущих деталей. Сюда относятся шинные соединения, соединения кабелей, места присоединения аппаратов цепи. В процессе эксплуатации оба контакта связываются с помощью болтов, либо с помощью горячей или холодной сварки.

б) Неразмыкающиеся контактные соединения подвижных элементов. Такие соединения используются либо для того, чтобы передать ток с подвижного контакта на неподвижный, либо для того, чтобы дать возможность элементу неподвижного контакта тлеть небольшое перемещение под действием подвижного контакта. Наиболее простым соединением такого типа является гибкая связь. При больших ходах подвижных контактов к большим номинальным токам применяются скользящие и роликовые токосъемы.

в) Разрывные контакты. Конструкция разрывных контактов определяется значениями $I_{НОМ}$, $U_{НОМ}$, тока КЗ, режимом работы, назначением

аппарата и рассмотрена в разделах, посвящённых устройству различных аппаратов.

г) Герметизированные контакты (герконы).

Жидкометаллические контакты

Наиболее характерные недостатки твердометаллических контактов следующие:

1. С ростом длительного номинального тока возрастают необходимые значения контактного нажатия, габариты и масса контактов. При токах 10 кА и выше резко увеличиваются габариты и масса аппарата в целом.

2. Эрозия контактов ограничивает износостойкость аппарата.

3. Окисление поверхности и возможность приваривания контактов понижают надёжность аппарата. При больших токах КЗ контактные нажатия достигают больших значений, что увеличивает необходимую мощность привода, габариты и массу аппарата.

По сравнению с твердометаллическими ЖМК обладают следующими преимуществами:

1. Малое переходное сопротивление и высокие допустимые плотности тока на поверхности раздела жидкий металл — электрод (до 120 А/мм²), что позволяет резко сократить габаритные размеры контактного узла и контактное нажатие, особенно при больших токах.

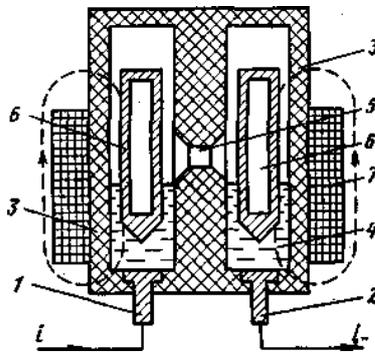


Рис. 2.3. Контактор с жидкометаллическим контактом

1. Отсутствие вибрации, приваривания, залипания и окисления контактов при их коммутации.

2. Высокая механическая и электрическая износостойкость ЖМК, что позволяет создавать аппараты с большим сроком службы.

3. Возможность разработки коммутационных аппаратов на новом принципе [автоматический восстанавливающийся предохранитель и др.] благодаря свойствам текучести жидкого металла.

5. Возможность, работы ЖМК при высоких внешних давлениях, высоких температурах, в глубоком вакууме.

Необходимо отметить и недостатки ЖМК:

1. Обычно применяемые контактные материалы галлий и его сплавы с другими металлами требуют подогрева контактов до момента включения, так как температура окружающей среды может быть ниже температуры затвердевания этих материалов.

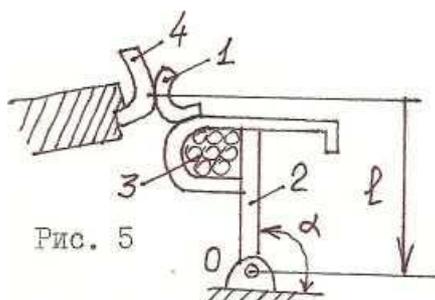
2. Большинство аппаратов с ЖМК требуют определенного положения в пространстве и подвержены влиянию сторонних механических воздействий (ударов, вибраций), что затрудняет их применение.

8) Режимы работы контактов

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

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

Рассмотрим природу вибраций на примере рис. 5. Подвижный контакт 1 связан с контактным рычагом 2 через контактную пружину 3. Неподвижный контакт 4 жестко закреплен на опоре.



Электромагнит контактора воздействует на рычаг 2. В момент сопротивления контактов происходит удар, в результате которого происходят деформация смятия контактов и отброс контакта 1 вправо. Между контактами образуется зазор и загорается дуга. Движение контакта 1 вправо прекратится тогда, когда энергия, полученная им при ударе, перейдет в энергию сжатия пружины 3. После этого контакт 1 под действием пружины 3 начнет перемещаться влево. Произойдет новый удар и новый отброс контакта.

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

Для уменьшения вибрации контактная пружина имеет предварительную деформацию (натяг) при разомкнутых контактах. В момент касания контактов сила нажатия возрастает не с нуля, а с величины предварительного начального нажатия контактов. В некоторых конструкциях между контактным рычагом и подвижным контактом вводится противовибрационный вкладыш из специального пористого материала типа губчатой резины. Этот материал увеличивает затухание колебаний контакта и способствует уменьшению вибраций.

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

С целью снижения вибраций, возникающих от удара якоря, магнитопровод с обметкой крепится не жестко, а на пружинах.

При включении на существующее короткое замыкание вибрация контактов усиливается из-за возникновения отбрасывающих сил в точке касания. Для того чтобы не было сплавления контактов в момент их соприкосновения, необходимо силой предварительного натяга контактной пружины компенсировать электродинамические силы отброса и создать такое нажатие, при котором падение напряжения на переходном сопротивлении не приводит к плавлению касания.

При включении цепи по мере приближения подвижного контакта к неподвижному возрастает напряженность электрического поля между контактами и при определенном расстоянии произойдет пробой промежутка. В аппаратах НН пробой возникает при очень малом расстоянии между контактами.

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

Износ контактов в результате переноса материала с одного контакта на другой, т.е. испарение в окружающее пространство без изменения состава материала, называется физическим износом или эрозией.

В аппаратах ВН при сближении контактов пробой происходит при больших расстояниях. Возникшая дуга горит относительно долго, при этом возможно сваривание контактов, особенно при включении на существующее короткое замыкание. За счет применения большого числа последовательно соединенных разрывов уменьшается напряжение, приходящееся на разрыв, что дает снизить время предварительного пробоя до безопасного значения.

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

Для надежной работы контактов необходимо, чтобы при номинальном токе I_H падение напряжения на сопротивлении было меньше U_{K1} :

$$I_H R_{\Pi} \leq U_{K.\text{дон}} = (0.5 \dots 0.8) U_{K1},$$

где $K1$ – точка размягчения материала;

$K2$ - точка плавления материала.

Для расчета контактов на небольшие токи используется эта формула. По заданному току I_H и допустимому $U_{K.\text{дон}}$ определяем R_{Π} , после чего находим необходимое контактное нажатие.

Для односточечных контактов на большие токи

$$F_K = I_H^2 \cdot \frac{B \cdot \pi \cdot H_K \cdot 10^7}{16\lambda^2 \cdot \left(\arccos \frac{T_0}{T_K} \right)^2},$$

где:

F_K - сила нажатия;

I_H - ток действующий;

B - число Лоренца $2.42 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{B^2}{(^\circ C)^2}$;

H_K - число твердости по Виккерсу;

λ - удельная теплопроводность;

T_K - температура точки касания;

T_0 - температура тела контакта.

Формула позволяет по заданному I_H сразу найти F_K , если известно соотношение $\frac{T_0}{T_K}$

$$T_0 = \left(\frac{I^2 \cdot \rho}{k_T \cdot p \cdot q} + \theta_0 + 273 \right),$$

где:

I - действующее значение тока;

ρ - удельное сопротивление материала контактов;

k_T - удельный коэффициент теплоотдачи;

p - периметр сечения контактов;

q - сечение тела контактов;

θ_0 - температура окружающей среды.

Температуру контактной точки можно определить, воспользовавшись, что для надежно работающих контактов $T_K - T_0$ не должна превышать 5 - 10°C.

Если имеется n контактных точек, то расчет проводится для одной контактной точки (ток $\frac{I_H}{n}$) и

$$F_{K.полн} = F_K \cdot n$$

При расчете динамической стойкости контактов

$$I \leq r\sqrt{F},$$

где:

I - ток электродинамической стойкости;

F - сила нажатия;

r - коэффициент, определенный экспериментально, и сведен в таблицу для различных материалов контактов.

Сваривание контактов зависит от конструкции самих контактов и токоведущей цепи аппарата. Электродинамические силы, возникающие в токоведущих частях, необходимо использовать для повышения устойчивости контактов.

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

Это приводит к интенсивному окислению, распылению материала контактов в окружающее пространство, переносу материала с одного электрода на другой и образованию пленок, что влечет износ контактов.

Износ, связанный с окислением, образованием на электродах пленок химических соединений материала контактов со средой называется химическим износом или коррозией. Перенос материала с анода на катод называется положительной эрозией и наоборот отрицательной эрозией.

Направление эрозии и форма износа контактных поверхностей зависят от вида разряда и величины тока.

При $I \leq 5 \cdot A$ срок службы контактов

$$N = \frac{0.6V_0 \cdot v}{V_K \cdot q_0},$$

где:

N - число допустимых отключений;

V_0 - объем контакта, предназначенный на износ;

v - плотность материала;

V_K - эмпирический коэффициент износа;

q_0 - количество электричества, протекающего через промежуток за одно отключение.

Количество электричества, протекающего через дугу

$$q_0 = \int_0^{t_r} i \cdot dt$$

и находится на осциллограмме.

При ориентировочных расчетах

$$q_0 = \frac{1}{2} I_0 \cdot t_r,$$

где:

I_0 - значение тока в момент размыкания;

t_r - время гашения.

При $I > 5A$

$$Q = 10^{-9} r_n \cdot N \cdot I_0^2,$$

где:

Q - износ контакта;

N - число отключений - включений (операций);

I_0 - ток отключения;

r_n - эмпирический коэффициент; определенный: для различных материалов.

11) Раствор контактов электрических аппаратов

В электрических аппаратах низкого напряжения раствор контактов в основном определяется [условиями гашения дуги](#) и лишь при значительных напряжениях (свыше 500 В) его величина начинает зависеть от напряжения между контактами. Как показывают опыты, дуга сходит с контактов уже при растворе 1 — 2 мм. Наиболее неблагоприятные условия гашения дуги получаются при постоянном токе динамические усилия дуги настолько велики, что дуга активно перемещается и гаснет уже при растворе 2 — 5 мм.



Согласно этим опытам можно считать, что при наличии магнитного поля гашения дуги при напряжении до 500 В можно принять значение раствора 10 — 12 мм для постоянного тока, для переменного тока принимают 6 — 7 мм для любых значений тока. Излишнее увеличение раствора нежелательно, так как оно ведет к увеличению хода контактных частей аппарата, а следовательно, к увеличению габаритов аппарата.

Наличие мостикового контакта с двумя разрывами позволяет уменьшить ход контакта, сохраняя суммарную величину раствора. В этом случае обычно принимается раствор 4 — 5 мм на каждый разрыв. Особенно хорошие результаты для гашения дуги дает применение мостикового контакта на переменном токе. Чрезмерное уменьшение раствора (меньше 4 — 5 мм) обычно не делается, так как погрешности при изготовлении отдельных деталей могут существенно повлиять на величину раствора. При необходимости получения малых растворов надо предусматривать возможность его регулировки, что усложняет конструкцию. В случае работы контактов в условиях, когда возможно их сильное загрязнение, раствор необходимо увеличивать.

Обычно раствор увеличивается и для контактов, размыкающих цепь с большой индуктивностью, так как в момент погасания дуги появляются значительные перенапряжения и при малом зазоре возможно повторное зажигание дуги. Раствор увеличивается также для контактов защитных аппаратов с целью повышения их надежности.

Значительно возрастает раствор при увеличении частоты переменного тока, так как скорость нарастания напряжения после погасания дуги очень велика, расстояние между контактами не успевает деионизироваться и дуга зажигается вновь.

Величина раствора на переменном токе высокой частоты обычно определяется экспериментально и сильно зависит от конструкции контактов и дугогасительной камеры. При напряжениях 500—1000 В величина раствора обычно принимается 16 — 25 мм. Большие значения относятся к контактам, выключающим цепи с большей индуктивностью и большим током.



Провал контактов электрических аппаратов

При работе контакты изнашиваются. Чтобы обеспечить надежное их соприкосновение на длительный срок, кинематика электрического аппарата выполняется таким образом, что контакты соприкасаются раньше, чем подвижная система (система перемещения подвижных контактов) доходит до упора. Контакт крепится к подвижной системе через пружину. Благодаря этому, после соприкосновения с неподвижным контактом, подвижный контакт останавливается, а подвижная система продвигается еще вперед до упора, сжимая дополнительно при этом контактную пружину.

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

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

Основная функция провала — компенсация износа

контактов, поэтому величина провала определяется прежде всего величиной максимального износа контактов, которая обычно принимается: для медных контактов — на каждый контакт до половины его толщины (суммарный износ — полная толщина одного контакта); для контактов с напайками — До полного износа напаяк (полный износ — суммарная толщина напаяк подвижного и неподвижного контактов).

В случае наличия процесса притирания контактов, особенно переката, величина провала очень часто бывает значительно больше максимального износа и определяется кинематикой подвижного контакта, обеспечивающей необходимую величину переката и проскальзывания. В этих случаях для уменьшения общего хода подвижного контакта целесообразно ось вращения держателя подвижного контакта располагать возможно ближе к контактной поверхности.



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

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

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

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

12) 2.1. Процессы ионизации межконтактного промежутка. В процессе размыкания контактов контактное нажатие уменьшается, переходное сопротивление увеличивается, увеличивается температура нагрева точек соприкосновения контактов и достигает температуры плавления

материала контактов. В результате между контактами возникает жидкометаллический мостик, который при расхождении контактов взрывается. На поверхности контактов остаются нагретые площадки, служащие источниками заряженных частиц в межконтактном промежутке. Для того, чтобы межконтактный промежуток стал проводящим, в нем должна быть создана определенная концентрация заряженных частиц. Процесс образования заряженных частиц называется процессом ионизации. Существует четыре процесса ионизации – термоэлектронная и автоэлектронная эмиссии, ударная и термическая ионизации. Термоэлектронная эмиссия – явление испускания электронов из накаливаемой поверхности. После взрыва жидкометаллического мостика на отрицательном электроде образуется, так называемое, катодное пятно, которое служит основанием дуги и очагом излучения электронов. Плотность тока термоэлектронной эмиссии не велика и может быть достаточной лишь для инициирования дуги. Автоэлектронная эмиссия – явление испускания электронов из катода под воздействием сильного электрического поля. Расходящиеся контакты можно представить как конденсатор переменной емкости, который заряжается через сопротивление цепи, и напряжение на нем растет от нуля до напряжения сети. Напряженность электрического поля в межконтактном промежутке возрастает и проходит через значения, превышающие 10 млн. В/см. Такие напряженности достаточны для вырывания электронов даже из холодного электрода.

Ударная ионизация – процесс выбивания электрона из нейтральной частицы воздуха при соударении ее с движущимся электроном. Вновь образовавшийся электрон ионизирует следующую нейтральную частицу. Термическая ионизация, это процесс ионизации межконтактного промежутка под воздействием высокой температуры, которая возникает при горении дуги. Термическая ионизация, это единственный вид ионизации, который поддерживает горение дуги между контактами. Одновременно с процессами ионизации в межконтактном промежутке происходят процессы деионизации. Деионизацией называется процесс образования нейтральной частицы из положительно и отрицательно заряженных частиц. Процесс деионизации может быть двух видов – рекомбинация и диффузия. Рекомбинация, это процесс воссоединения заряженных частиц и образования нейтральной частицы. Диффузия, это процесс перемещения заряженных частиц из межконтактного промежутка в окружающую среду. В результате деионизации сопротивление межконтактного промежутка увеличивается.

16) Гашение дуги в узких щелях. Соприкосновение дуги с поверхностью твердого диэлектрика способствует усиленной рекомбинации заряженных частиц на его поверхности; а также интенсивному отводу тепла из области горения дуги, в связи с хорошим тепловым контактом, возникающим между дугой и диэлектриком. Дугогасительные устройства, использующие этот принцип гашения дуги, представляют собой узкую щель, образованную двумя стенками из дугостойкого изоляционного материала (рис. 22). Ширина щели камеры выполняется меньше диаметра дуги, что увеличивает ее аэродинамическое сопротивление. Поэтому, чтобы загнать дугу в узкую щель, применяется магнитное дутье.

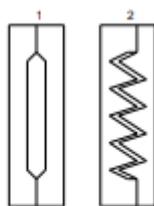


Рис. 22. Камера дугогасительная

В качестве материала для камеры обычно используется асбоцемент и керамика. Керамическая масса по сравнению с асбоцементом более устойчива к выгоранию от действия электрической

дуги. Кроме того, поверхность ее глаже и поэтому сопротивление вхождению дуги в щель меньше, чем в камере из асбоцемента. Дугогасительные устройства с узкой щелью используются в аппаратах как постоянного, так и переменного тока.

18) 2.6.4. Гашение дуги в дугогасительной решетке. Этот метод основан на использовании околоэлектродного падения напряжения. На рисунке 23 показана дугогасительная система на основе дугогасительной (деионной) решетки. Над контактами 1 и 2 расположены неподвижные и изолированные друг от друга стальные пластины 3, образующие дугогасительную решетку. Дуга 4, возникающая при размыкании контактов, под действием электродинамических сил, втягивается в дугогасительную решетку и разбивается на ряд коротких дуг. У каждой пластины решетки возникает околоэлектродное падение напряжения. В результате, за счет суммы околоэлектродных падений напряжения, увеличивается общее напряжение дуги и происходит ее гашение. В дугогасительной решетке, по мере расхождения контактов, дуга последовательно входит в промежутки между пластинами решетки. При этом, напряжение на дуге возрастает приблизительно по линейному закону, а длительность горения дуги будет уменьшаться с возрастанием скорости расхождения контактов и числа пластин, приходящихся на единицу длины дуги. На гашение дуги переменного тока в дугогасительной решетке в основном оказывают влияние процессы, происходящие у катода при прохождении тока через нуль. В этот момент времени околокатодное пространство мгновенно приобретает электрическую прочность порядка 150...250 В.

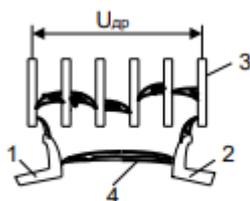


Рис. 23. Решетка дугогасительная

Дугогасительная решетка для гашения дуги переменного тока имеет значительно меньшее количество пластин, чем для дуги постоянного тока, так как в последней $U_{э} = 20...25$ В. При гашении дуги переменного тока действие дугогасительной решетки в 7...8 раз эффективнее, чем при гашении дуги постоянного тока. Поэтому, дугогасительные решетки нашли более широкое применение в аппаратах переменного тока.