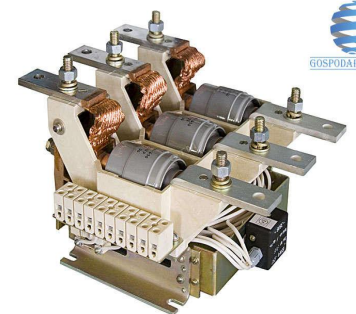
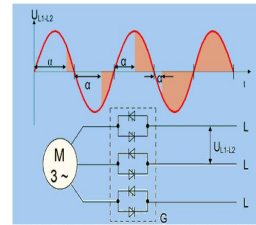
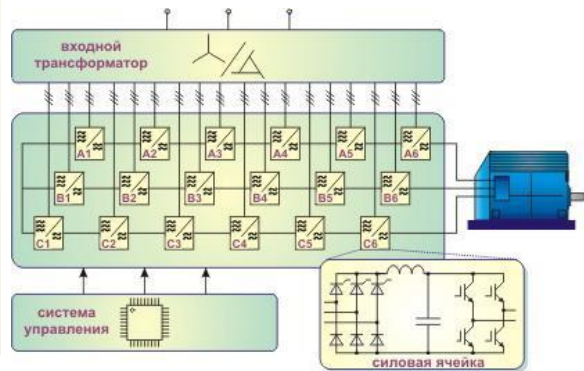
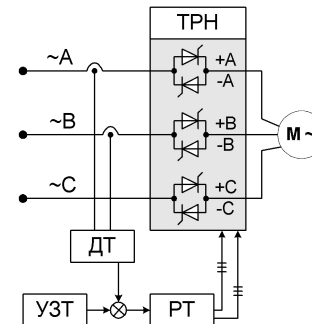
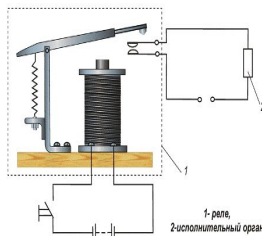


# Электрические аппараты управления и защиты



Вакуумный контактор



**Электрический аппарат** — это электротехническое устройство, которое используется для включения и отключения электрических цепей, контроля, измерения, защиты, управления и регулирования установок, предназначенных для передачи, преобразования, распределения и потребления электроэнергии.

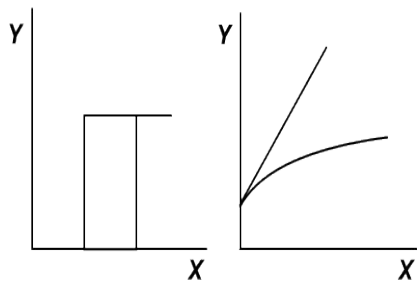
Под электрическим аппаратом понимается широкий круг всевозможных устройств, применяемых в быту, промышленности и энергетике.

Таким образом, учитывая многофункциональное назначение электрических аппаратов объективно можно определить, что электрические аппараты — **это средства для управления потоком электрической энергии.**

**Классификация и требования к электрическим аппаратам** может быть проведена по ряду признаков:

- назначению (основной выполняемой функции),
- области применения,
- принципу действия,
- роду тока,
- исполнению защиты от воздействий окружающей среды,
- конструктивным особенностям и др.

Основной является **классификация по назначению**, которая предусматривает разделение электрических аппаратов на следующие большие группы.



- 1. Коммутационные аппараты распределительных устройств**, служащие для включения и отключения электрических цепей. *К о м у т а ц и я* (от латинского *commutatio* — изменение) может быть дискретной (ступенчатой) или плавной (непрерывной).
- 2. Ограничивающие аппараты**, предназначенные для ограничения токов короткого замыкания (реакторы) и перенапряжений (разрядники). Режимы короткого замыкания и перенапряжений являются аварийными, и эти аппараты редко подвергаются наибольшему нагрузкам.
- 3. Пускорегулирующие аппараты**, предназначенные для пуска, регулирования частоты вращения, напряжения и тока электрических машин или каких-либо других потребителей электрической энергии. К этой группе относятся контроллеры, командоконтроллеры, контакторы, пускатели, УПП, частотные преобразователи.
- 4. Аппараты для контроля заданных электрических или неэлектрических параметров.** К этой группе относятся реле и датчики.
- 5. Аппараты для измерений.** С помощью этих аппаратов цепи первичной коммутации (главного тока) изолируются от цепей измерительных и защитных приборов, а измеряемая величина приобретает стандартное значение, удобное для измерений. К ним относятся трансформаторы тока, напряжения, емкостные делители напряжения.
- 6. Электрические регуляторы.** Предназначены для регулирования заданного параметра по определенному закону. В частности, такие аппараты служат для поддержания на неизменном уровне напряжения, тока

## Требования к электрическим аппаратам

Разделение аппаратов *по областям применения* достаточно условно. Аппараты для электрических систем и электроснабжения объединяют в группу аппаратов распределительных устройств низкого и высокого напряжения. Аппараты, применяющиеся в схемах автоматического управления электроприводами и для автоматизации производственных процессов объединяют в группу аппаратов управления.

По *номинальному напряжению* электрические аппараты разделяются на две группы: аппараты низкого напряжения (с номинальным напряжением до 1000 В) и высокого напряжения (с номинальным напряжением более 1000 В).

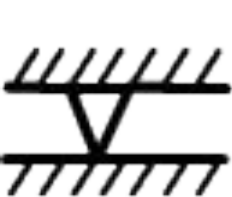
**Защитные оболочки электрических аппаратов.** Для предотвращения соприкосновения обслуживающего персонала с токоведущими или подвижными частями и исключения попадания в аппараты инородных тел устанавливаются специальные защитные оболочки. Согласно ГОСТ 14254—80 защитные свойства оболочки обозначаются буквами IP и двумя цифрами. Первая цифра обозначает степень защиты от прикосновения персонала к опасным деталям аппарата, вторая характеризует защиту от попадания инородных тел.

**Требования к электрическим аппаратам** весьма разнообразны и зависят от назначения, условий эксплуатации, необходимой надежности и т. д.

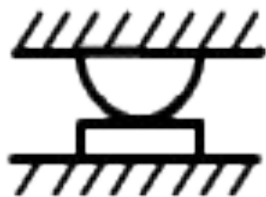
Однако можно сформулировать требования, которые являются общими для всех электрических аппаратов.

1. При номинальном режиме работы температура токоведущих элементов аппарата не должна превосходить значений, рекомендуемых соответствующим ГОСТ или другим нормативным документом.
2. Аппараты, предназначенные для частого включения и отключения, должны иметь высокую износостойкость.
3. Контакты аппаратов, предназначенных для отключений токов КЗ, должны быть рассчитаны на этот режим.
4. Изоляция электрических аппаратов должна выдерживать перенапряжения, которые имеют место в эксплуатации, и обладать определенным запасом, учитывающим ухудшение свойств изоляции с течением времени и вследствие осаждения пыли, грязи и влаги.
5. К каждому аппарату предъявляется ряд специфических требований, обусловленных его назначением. Так, например, выключатель высокого напряжения должен отключать ток КЗ за малое время (0,04—0,06 с).
6. В связи с широкой автоматизацией производственных процессов, применением сложных схем автоматики увеличивается число аппаратов, участвующих в работе. Возможность отказа в работе электрических аппаратов требует их резервирования и создания специальной системы поиска неисправностей. В связи с этим электрические аппараты должны обладать высокой надежностью.
7. Масса, габаритные размеры, стоимость и время, необходимые для установки и обслуживания электрических аппаратов, должны быть минимальными.

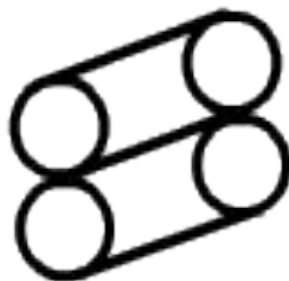
## Электрические контакты



**Точечный  
контакт**



**Линейный  
контакт**



**Поверхностный  
контакт**



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

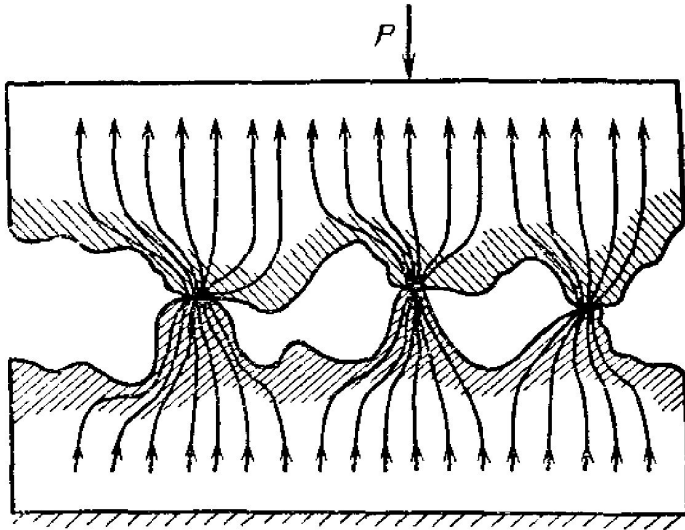
Поверхность проводника, соприкасающаяся с поверхностью другого проводника, **называется контактной поверхностью**.

Сборочная единица в составе электрического аппарата, с помощью которой в процессе работы аппарата производится замыкание или размыкание электрической цепи, называется **контактной системой электрического аппарата**. В контактной системе электрический контакт осуществляется нажатием одного токоведущего элемента на другой при помощи контактных пружин, болтов, резьбовых соединений и т.д. Усилие, с которым сжимаются токоведущие элементы контакта, называется **контактным нажатием**.

У электрического контакта следует различать **кажущуюся и действительную** площади соприкосновения. При самой тщательной обработке контактной поверхности на ней все же будут микроскопические выступы и шероховатости. Поэтому в действительности две поверхности будут соприкасаться не по всей кажущейся площади, а лишь отдельными площадками. По **кажущейся форме соприкосновения** условно различают три типа контактов: **точечный, линейный и поверхностный**.

У точечного контакта соприкосновение происходит только в одной точке, **кажущаяся и действительная** площади соприкосновения совпадают. У линейных контактов соприкосновение происходит по линии. Действительная картина соприкосновения будет определена минимум двумя точками, расположенными на линии. У поверхностного контакта кажущееся соприкосновение происходит по поверхности, а физическое — по ряду точек, расположенных на этой поверхности.

# Переходное сопротивление контакта



В месте перехода тока из одного проводника в другой возникает электрическое сопротивление, которое называется *переходным сопротивлением контакта*.

В результате *стягивания линий тока* к площадке касания их длина увеличивается, а сечение проводника, через которое фактически проходит ток, уменьшается, что вызывает увеличение сопротивления. Сужение сечения приводит к увеличению плотности тока в них, росту потерь и падения напряжения.

С уточнениями на основании опытных данных величина переходного сопротивления определяется выражением

$$R_{\text{п}} = \frac{k_{\text{нх}}}{(0,102 F_{\text{к}})^n}$$

$k_{\text{нх}}$  — коэффициент, зависящий от материала и формы контакта, способа обработки и состояния контактной поверхности;

$F_{\text{к}}$  — сила, сжимающая контакты;

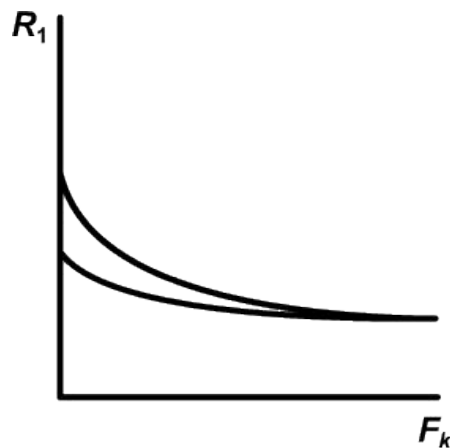
$n$  — показатель степени, характеризующий число точек соприкосновения, для различных контактов имеет следующие значения: точечный контакт  $n = 0.5$ , линейный контакт  $n = 0.5 — 0.7$ , поверхностный контакт  $n = 0.7 — 1.0$ .

С увеличением контактного нажатия переходное сопротивление уменьшается. Причем, после снятия за счет остаточной деформации бугорков на поверхности контактов переходное сопротивление становится меньше, чем при увеличении.

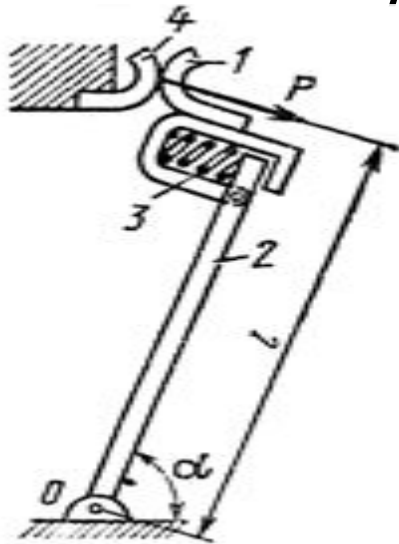
Переходное сопротивление очень чувствительно к окислению поверхности в виду того, что окислы многих металлов являются плохими проводниками. Вследствие окисления переходное сопротивление может возрасти в сотни и тысячи раз.

Таким образом, результирующее переходное сопротивление контактов может быть представлено как сумма сопротивления

$$R_{\text{конт}} = R_{\text{п}} + R_{\text{пл}}$$



## режим замыкания контактов



Подвижный контакт  $1$  связан с контактным рычагом  $2$  и контактной пружиной  $3$ . Неподвижный контакт  $4$  жестко закреплен на опоре. При включении контактора его электромагнит воздействует на рычаг  $2$ , перемещение которого приводит к соприкосновению контактов  $1$  и  $4$ .

В момент соприкосновения контактов происходит удар, в результате которого происходят деформация смятия контактов и отброс контакта  $1$  вправо. Между контактами образуется зазор и под воздействием приложенного к ним напряжения загорается электрическая 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.

На нижнем рисунке  $U$  - напряжение на контактах,  $I$  - ток цепи,  $x$  - перемещение подвижного контакта после соприкосновения.

Пусть контакты соприкоснулись в точке  $A$ . Напряжение на контактах стало равным нулю, ток стал равным  $I$ . Для упрощения примем, что индуктивность цепи равна нулю. После касания подвижный контакт продолжает двигаться влево за счет инерции подвижных частей и деформации материала контактов.

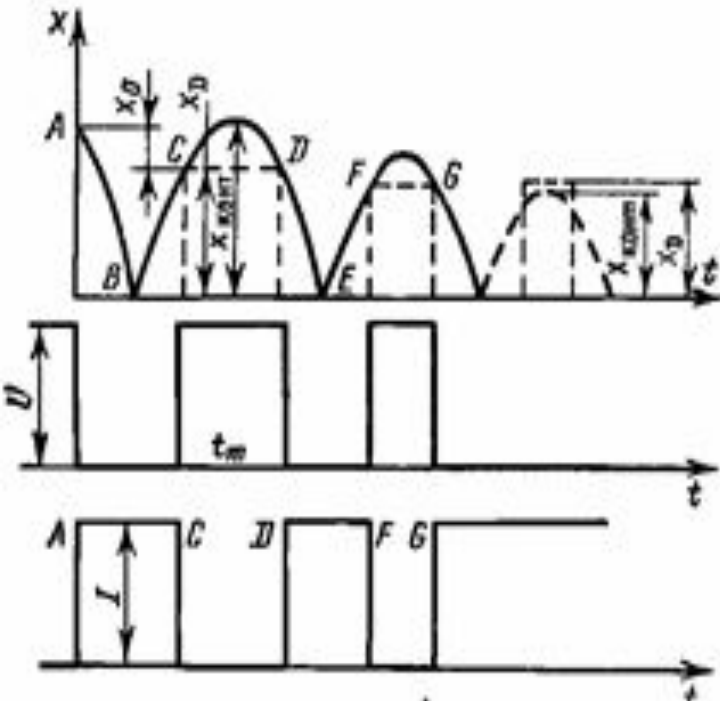
В точке  $B$  контакт останавливается и начинается движение подвижного контакта вправо за счет упругих сил, возникающих из-за деформации контактов. Этот процесс идет до точки  $C$ . В точке  $C$  цепь разрывается,  $I = 0$ , контакт не останавливается, а продолжает движение по инерции до положения  $X_{\text{конт}}$ .

После этого подвижный контакт под действием пружины снова стремится замкнуться, и ток появляется в точке  $D$ . Таким образом, отброс контакта за счет упругих сил материала контактов равен  $X_D$ , а за счет сил инерции -  $x_{\text{конт}}$ . В момент времени  $t_m$  контакты расходятся на расстояние, равное  $X_{\text{конт}} - X_D$ .

Если  $X_{\text{конт}} < X_D$ , то вибрация контактов не приводит к их размыканию.

При вибрации контактов происходит многократное образование электрической дуги. При большом числе включений и отключений возможен быстрый выход контактов из строя.

Для уменьшения вибрации создается предварительная деформация (натяг) контактной пружины при разомкнутых контактах. В момент касания контактов усилие нажатия возрастает не с нуля, а с предварительно установленной начальной величины.



При определении направления усилия учитывается индукция, создаваемая всеми остальными проводниками, за исключением того проводника, для которого оно находится. Рассмотрим направление усилия, действующего между параллельными проводниками (рис. 1.2, а). Проводник 1

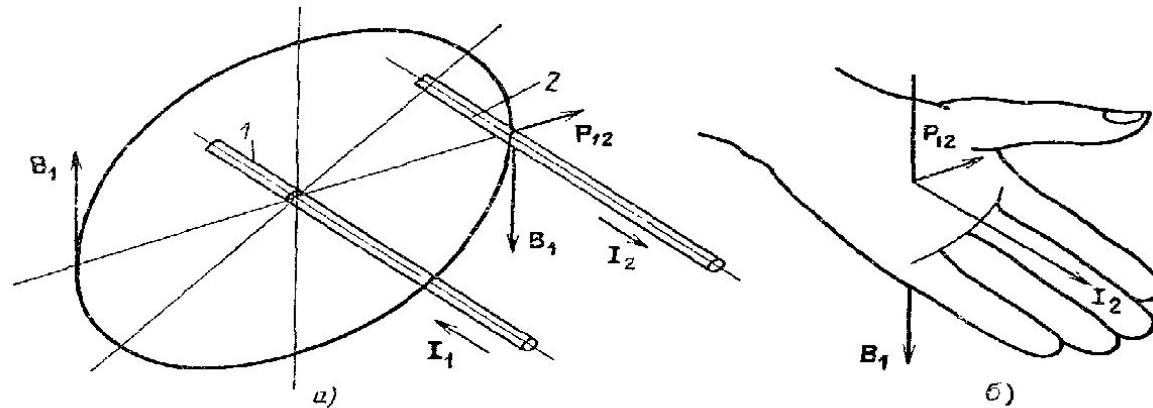


Рис. 1.2. Определение направления ЭДУ с помощью правила левой руки

с током  $I_1$  создает в месте расположения проводника 2 индукцию  $B_1$ . По правилу левой руки (рис. 1.2, б) определяем направление усилия  $P_{12}$ . При этом не следует рассматривать взаимодействие тока  $I_2$  с полем, создаваемым проводником 2.

Если  $l_1 = l_2 = l$ , то

$$P_x = 10^{-7} i_1 i_2 \frac{2l}{a} \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{a}{l}\right)^2} - \frac{a}{l} \right]. \quad (1.10)$$

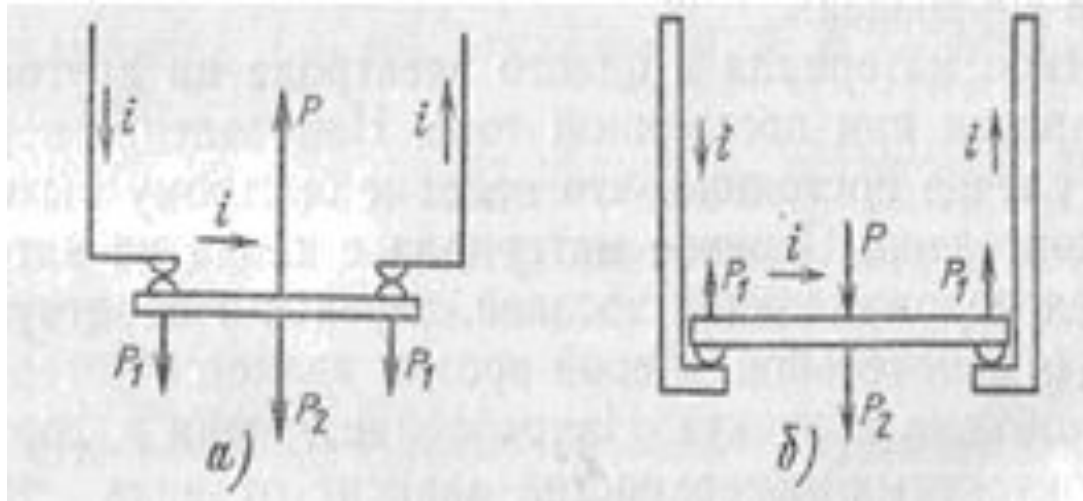
Произведение  $\frac{2l}{a} \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{a}{l}\right)^2} - \frac{a}{l} \right]$ , называемое коэффициентом контура  $k$ , зависит только от размеров проводников и их расположения. Тогда

$$P_x = 10^{-7} k i_1 i_2. \quad (1.11)$$

Если расстояние между проводниками значительно меньше их длины, т. е.  $a/l \ll 1$ , то  $k$  можно принять равным  $2l/a$  (случай бесконечно длинных шин). При  $a/l \leq 0,1$  и  $k = 2l/a$  расчет по (1.11) дает погрешность, не превышающую 5%. Для двух произвольно расположенных парал-



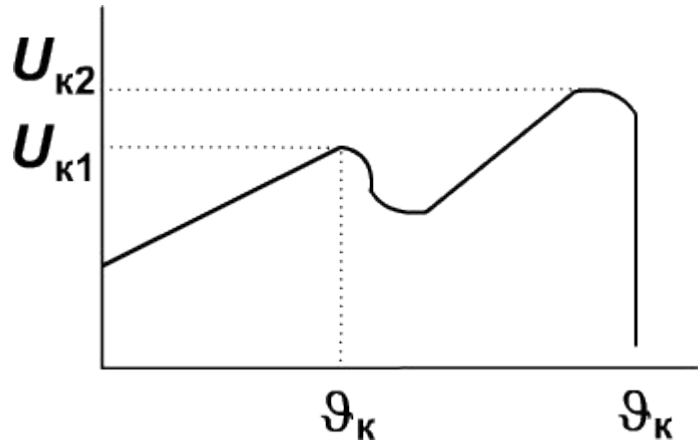
## Использование электродинамических сил для повышения электродинамической стойкости контактов



Электродинамические силы, действующие между токоведущими деталями, необходимо использовать для повышения электродинамической стойкости контактов. Так, например, при кинематической схеме аппарата по рисунку *а* контактная пружина должна создавать усилие  $2P_1$  и усилие  $P_2$ , создаваемое токоведущими деталями.

При кинематической схеме по рисунку *б* электродинамическое усилие, действующее на переключку, позволяет выбрать контактную пружину с меньшим усилием нажатия.

## Режим замкнутого состояния контактов.



Материал	$U_{к1}$ В	$\vartheta_{к1}$ °С	$U_{к2}$ В	$\vartheta_{к2}$ °С
медь	0.12	190	0.43	1083
серебро	0.09	150	0.35	960
алюминий	0.10	150	0.30	658
вольфрам	0.40	1000	1.00	3370

В этом режиме возможны два случая:

- 1) *через контакты проходит длительное время номинальный ток,*
- 2) *через контакты проходит ток короткого замыкания.*

При длительном номинальном токе на переходном сопротивлении контакта выделяется мощность, которая вызывает нагрев контакта. Это приводит к размягчению и плавлению материала контактов. Поэтому контакт характеризуется двумя точками: точкой **размягчения** (рекристаллизации) и точкой **плавления**.

Для надежной работы контактов необходимо, чтобы при номинальном токе падение напряжения на переходном сопротивлении было меньше допустимого

$$I_H R_{\text{н}} < U_{\text{кдоп}} = (0,5 - 0,8) U_{к1}$$

При коротком замыкании через контакты проходят токи в 10—20 раз превышающие номинальные значения. Из—за малой постоянной времени нагрева температура контактной площадки практически мгновенно повышается и может достигнуть температуры плавления. Это может привести к свариванию контактов.

## Режим размыкания контактов, дуговой разряд

При размыкании сила нажатия уменьшается, переходное сопротивление возрастает и 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 *тлеющий*.

Для того, чтобы межконтактный промежуток стал проводящим необходимо создать в нем определенную концентрацию заряженных частиц. Процесс образования заряженных частиц называется процессом ионизации.

Существуют четыре процесса ионизации — термоэлектронная и автоэлектронная эмиссии, ударная и термическая ионизации.

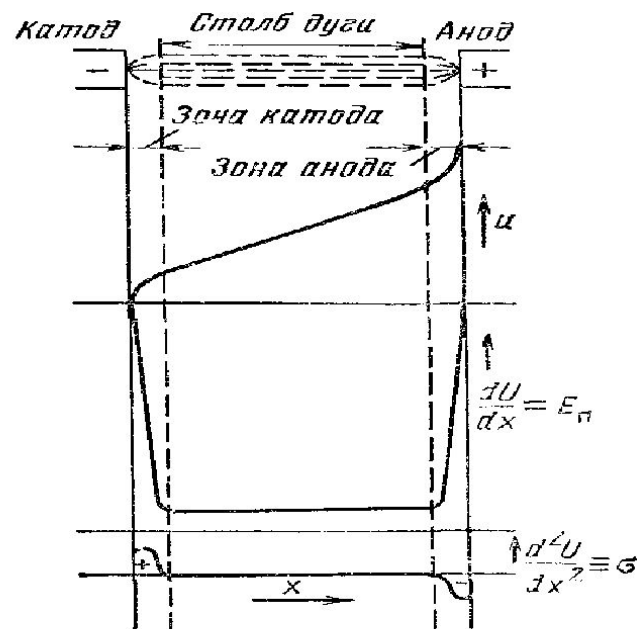
Распределение напряжения, напряженности электрического поля (градиента)  $E_n = dU/dx$  и производной  $d^2U/dx^2$ , пропорциональной объемному заряду  $\sigma$  в дуге, представлено на рис. 4.1.

Падение напряжения у катода составляет 10—20 В и зависит от материала катода и свойств газа, в котором горит дуга. Околоскатодное падение напряжения несколько мень-

Рис. 4.1. Распределение напряжения, напряженности электрического поля и объемных зарядов в электрической дуге

ше потенциала ионизации газа из-за наличия около катода его паров, у которых потенциал ионизации значительно ниже.

В области дугового столба положительные и отрицательные объемные заряды уравновешивают друг друга и результирующий заряд равен нулю. Градиент напряжения на дуге остается постоянным и для дуги, свободно горящей в воздухе, составляет  $(2 \div 3) \cdot 10^3$  В/м. В ДУ градиент напряжения сильно возрастает, достигая  $(2 \div 3) \cdot 10^4$  В/м.



# Вольтамперная характеристика (ВАХ) дуги постоянного тока.

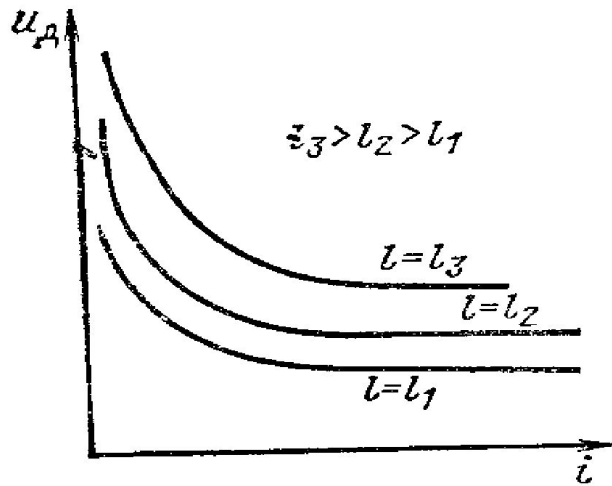
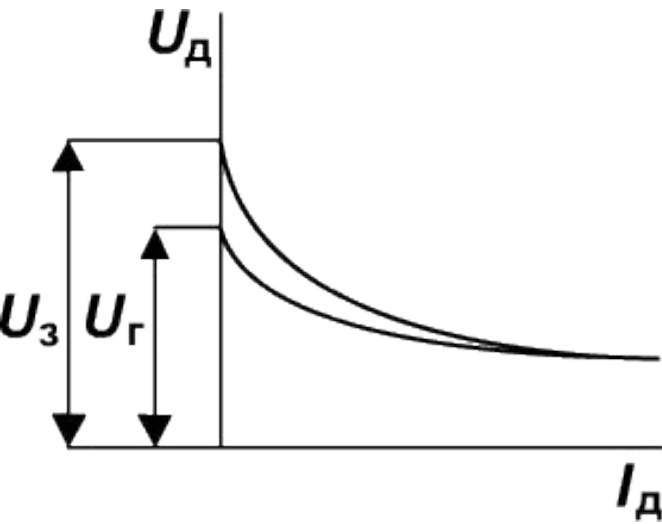


Рис. 4.2. Статические вольт-амперные характеристики дуги при различной ее длине

Электрическая дуга между контактами загорается при некотором **напряжении зажигания**.

Оно зависит от расстояния между контактами, от температуры и давления среды, окружающей дугу, от температуры и материала контактов и др.

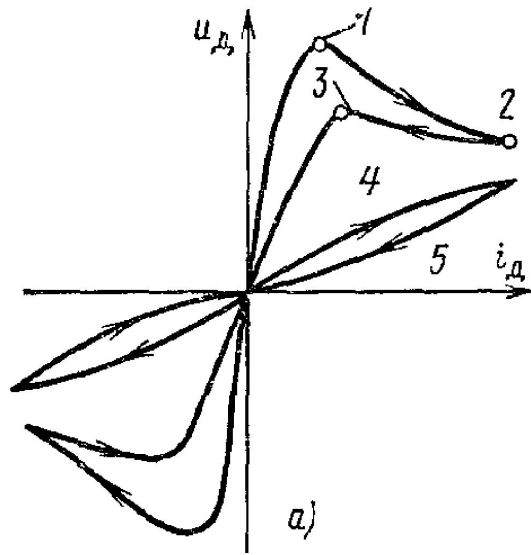
По мере увеличения тока дуги напряжение на ней уменьшается. Это обусловлено интенсивностью процессов ионизации.

Напряжение на дуге при уменьшении тока до нуля называется **напряжением гашения**. Это напряжение всегда меньше напряжения зажигания.

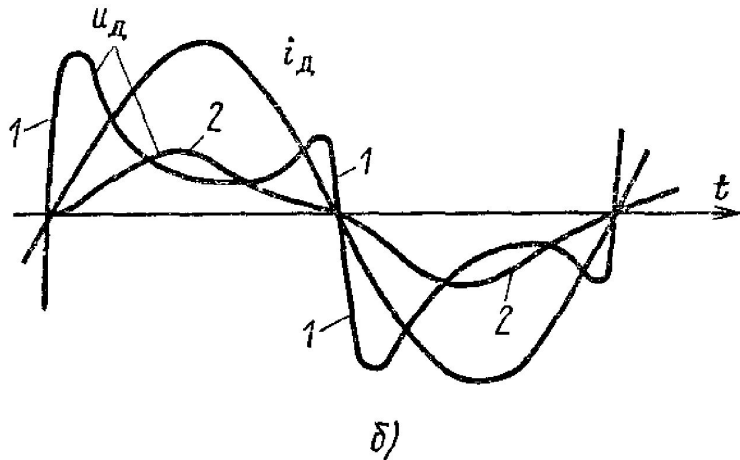
Это объясняется большим нагревом и инерционностью тепловых процессов. Чем большей теплопроводностью и теплоемкостью обладает материал контактов и сама дуга, тем меньше будет разница между **напряжением зажигания** и **напряжением гашения**.

Напряжение на дуге является функцией тока дуги, расстояния между контактами и физических свойств контактов.

# ВАХ переменного тока



При частоте 50 Гц ток в дуге меняется достаточно быстро, и происходящие в ней процессы необходимо рассматривать с помощью динамической ВАХ. При синусоидальном токе напряжение на дуге (рис. 4.8, а) сначала поднимается до точки 1, затем в связи с ростом тока падает до точки 2. После прохождения тока через максимум динамическая ВАХ поднимается и проходит через точку 3 в связи с уменьшением тока. В отрицательный полупериод процесс повторяется. При высокой частоте тока динамическая ВАХ описывается кривыми 4 и 5. Зависимости изменения тока в дуге и напряжения на ней во времени представлены на рис. 4.8, б. При высокой частоте форма напряжения на дуге (кривая 2) приближается к форме тока.



# Процесс гашения электрической дуги при отключении цепи постоянного тока

Уравнение отключаемой цепи имеет вид

$$U = iR + U_{\text{д}} + L \frac{di}{dt}$$

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

$$U = iR + U_{\text{д}}$$

Если это равенство не удовлетворяется, то появляется положительная или отрицательная эдс самоиндукции.

ВАХ дуги и прямая пересекаются в точках 1 и 2.

Если по каким-либо причинам произойдет увеличение тока около точки 2, то в цепи возникает отрицательная эдс самоиндукции ( $-L di/dt$ ), уменьшающая ток до предыдущего значения.

Наоборот, при уменьшении тока в цепи возникает положительная эдс самоиндукции, которая будет увеличивать ток до предыдущего значения.

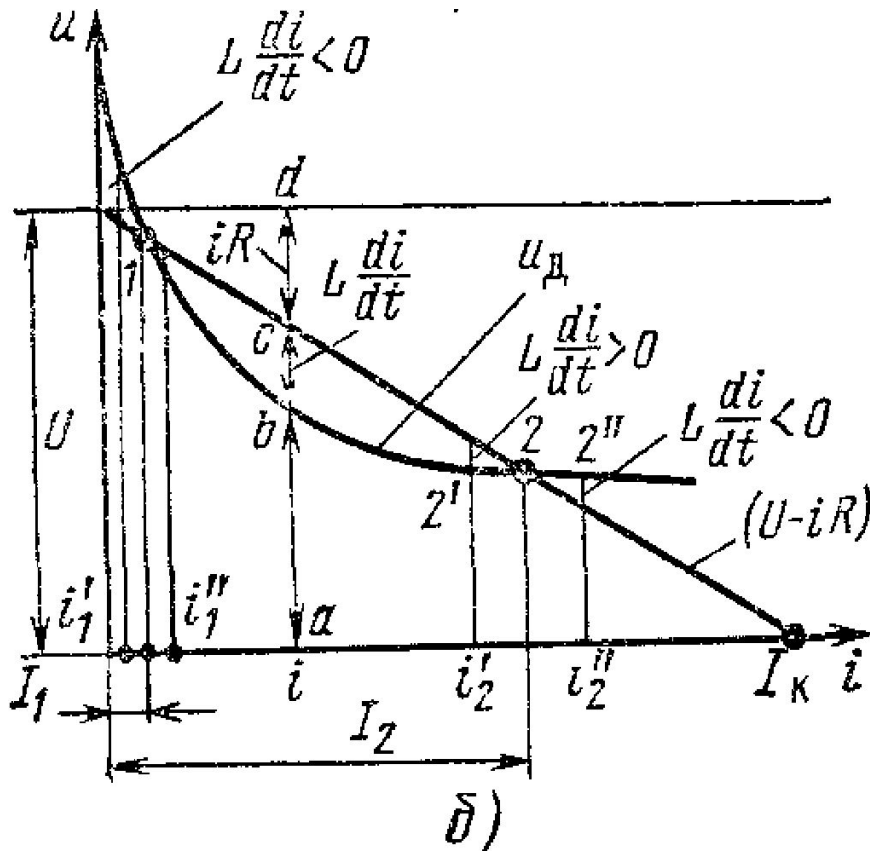
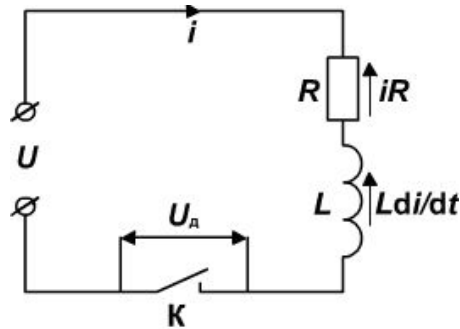
Таким образом, точка 2 является точкой **устойчивого горения дуги**.

Анализируя аналогичным образом изменение тока в точке 1 приходим к выводу, что точка 1 является точкой **неустойчивого горения дуги**, так как при уменьшении тока отрицательная эдс самоиндукции будет уменьшать ток до нуля и дуга погаснет.

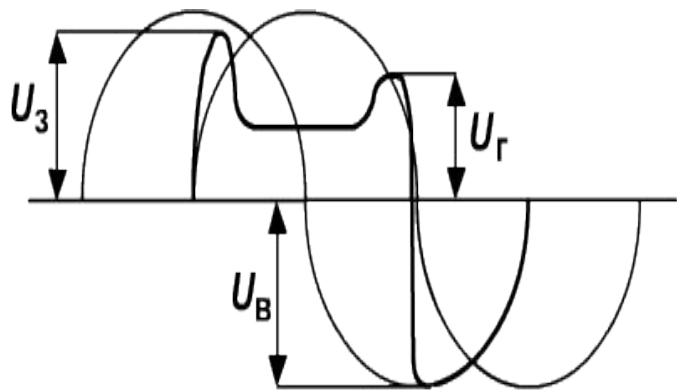
Таким образом, электрическая дуга постоянного тока погаснет, если будет ликвидирована точка устойчивого горения (точка 2), т.е. если ВАХ дуги будет лежать выше прямой и не будет с ней пересекаться.

Отсюда следует, что выражение  $U_{\text{д}} > (U - iR)$  условие гашения дуги постоянного тока.

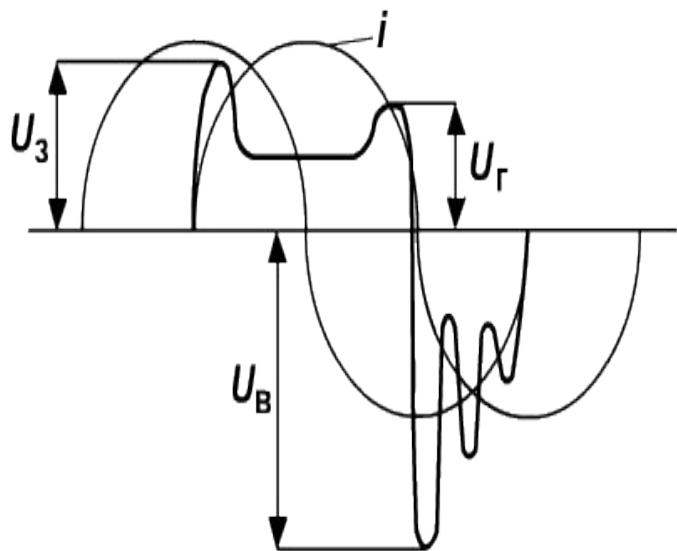
Достигнуть этого можно либо увеличением сопротивления  $R$ , либо повышением падения напряжения на дуге. В первом случае увеличивается угол наклона прямой. Во втором случае ВАХ дуги поднимается выше.



# Особенности гашения дуги переменного тока



а) Аперриодический процесс восстановления



б) Колебательный процесс восстановления

Электрическая дуга переменного тока, как и дуга постоянного тока, окончательно погаснет тогда, когда **скорость деионизации дугового промежутка будет больше скорости его ионизации.**

В период бестоковой паузы в результате интенсивной деионизации уменьшается проводимость дугового промежутка, и он превращается в диэлектрик.

Таким образом, условие гашения дуги переменного тока можно сформулировать так: **если после прохождения тока через ноль электрическая прочность дугового промежутка в каждый заданный момент времени будет больше напряжения на нем, то дуга погаснет.** Если же в какой-либо момент времени напряжение, приложенное к дуговому промежутку, станет выше электрической прочности промежутка, то процесс гашения дуги прекратится и дуга загорится вновь.

Мгновенное значение напряжения на дуговом промежутке, возникающее в процессе восстановления напряжения, называется **восстанавливающимся напряжением**. Восстановление напряжения на дуговом промежутке при индуктивной нагрузке может происходить **аперриодически** или носить **колебательный характер**.

Частота и амплитуда колебаний переходного процесса зависит от параметров цепи и источника питания.

При отключении цепи, обладающей только активным сопротивлением, ток и эдс проходят через ноль одновременно, поэтому восстанавливающееся напряжение будет равно нулю.

**Поэтому отключение активной нагрузки происходит легче, чем индуктивной.**

# Способы гашения электрической дуги

Гашение дуги может быть достигнуто увеличением скорости деионизации дугового промежутка, уменьшением скорости восстановления напряжения, либо совместным использованием обоих этих факторов.

Ко всем дугогасительным устройствам предъявляются следующие требования:

- 1) время гашения дуги должно быть минимальным;**
- 2) энергия, выделяемая дугой должна быть минимальной;**
- 3) при гашении дуги не должно возникать опасных перенапряжений;**

## *Растягивание электрической дуги*

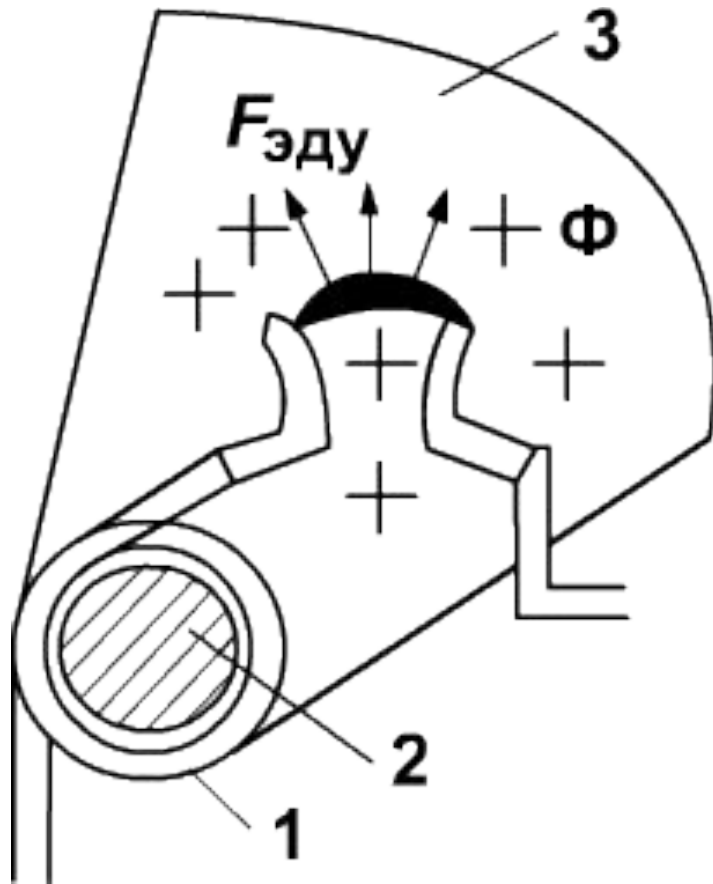
приводит к повышению падения напряжения на дуговом промежутке за счет деионизации, происходящей в стволе дуги.

Однако градиент напряжения ( падение напряжения на единицу длины дуги) составляет небольшую величину — примерно 15 В/см. Поэтому гашение дуги только путем ее растягивания привело бы к увеличению габаритов отключающего аппарата.

Обычно растягивание электрической дуги применяется лишь в низковольтных слаботочных аппаратах. В коммутационных аппаратах (например в контакторах.) растягивание дуги используется в совокупности с другими методами гашения дуги .



# Магнитное дутье



Перемещение электрической дуги в воздушной среде приводит к интенсивной деионизации ствола дуги в связи с:

- 1) усилением охлаждения дуги,
- 2) возрастанием диффузии заряженных частиц из области горения дуги в окружающее пространство,
- 3) с повышением давления внутри дуги в результате уменьшения диаметра ее ствола.

Эффективность каждого из перечисленных факторов, увеличивающих градиент напряжения в дуге, возрастает с повышением скорости ее перемещения. Электрическая дуга перемещается под воздействием электродинамических сил, возникающих в результате взаимодействия дуги с внешним магнитным полем. Внешнее магнитное поле для перемещения электрической дуги в низковольтных аппаратах может быть получено:

- 1) при помощи электромагнитов с катушкой, включаемой последовательно с контактами, между которыми возникает электрическая дуга;
- 2) при помощи электромагнитов с катушкой, включаемой параллельно на напряжение сети;
- 3) при помощи постоянных магнитов.

Способ дугогашения с использованием внешнего магнитного поля называется магнитным дутьем.

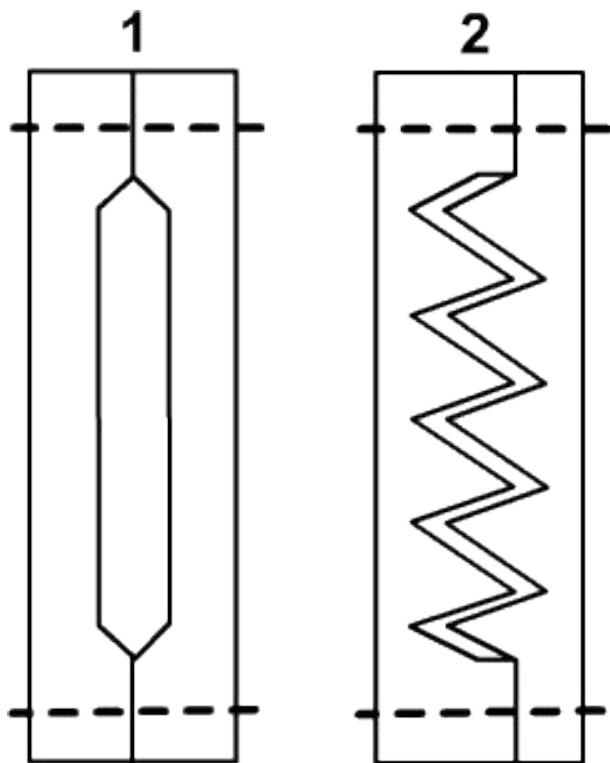
Исключительное распространение получила последовательная дугогасительная катушка.

Основными достоинствами этого способа возбуждения магнитного поля гашения является надежность и независимость направления силы, действующей на дугу, от направления тока.

Изменение направления тока в цепи вызывает и изменение направления поля, создаваемого катушкой.

Направление силы в таком случае, действующей на дугу, остается неизменной.

# 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.

В щель дуга затягивается электродинамическими силами, увеличенными с помощью катушек магнитного дутья.

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 потому 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.

# Гашение дуги в дугогасительной решетке

Этот метод основан на использовании околоэлектродного падения напряжения.

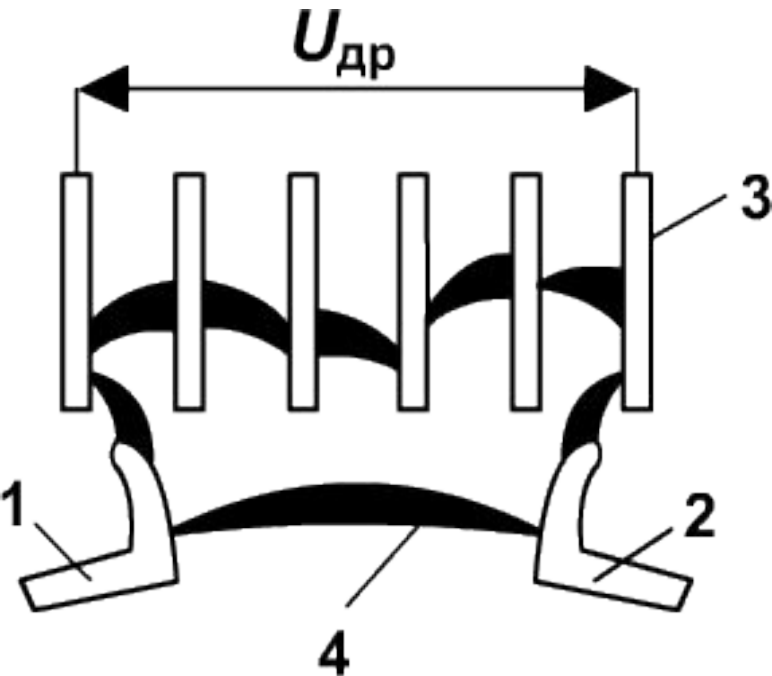
Над контактами 1 и 2 расположены неподвижные и изолированные друг от друга стальные пластины 3, образующие дугогасительную решетку. Дуга 4, возникающая при размыкании контактов, под действием электродинамических сил втягивается в дугогасительную решетку и разбивается на ряд коротких дуг. У каждой пластины 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.

Дугогасительная решетка для гашения дуги переменного тока имеет значительно меньшее количество пластин, чем для дуги постоянного тока, так как в последней = 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 сетях переменного тока.



# Основные конструкции контактов

## Твердометаллические контакты.

### А) Неподвижные разборные и неразборные контакты

Такие контакты служат для соединения неподвижных токоведущих деталей шин, кабелей в проводов. Эти детали могут находиться как внутри электрического аппарата, так и вне его. В последнем случае они служат для присоединения аппарата к источнику энергии или к нагрузке. Контакты соединяются с помощью либо болтов (разборные соединения), либо горячей или холодной сварки.

Рекомендуемые давления одной шины на другую, 104 Па при болтовом соединении приведены ниже.

Материалы соединения:

Медь луженая 500 - 1000

Медь, латунь, бронза нелуженые 600 - 1200

Алюминий 2500



### Б) Подвижные неразмыкающиеся контактные соединения

Такие соединения используются либо для передачи тока с подвижного контакта на неподвижный, либо при небольшом перемещении неподвижного контакта под действием подвижного.

Наиболее простым соединением такого типа является **гибкая связь**.

Неподвижный контакт **1** крепится к каркасу аппарата на изоляционной подкладке.

Подвижный контакт **2** вращается относительно точки **0**, расположенной на контактном рычаге **4**. Этот рычаг изолирован от вала **5**, на который действует электромагнит контактора.

Гибкая связь **6** соединяет подвижный контакт **2** с выводом аппарата.

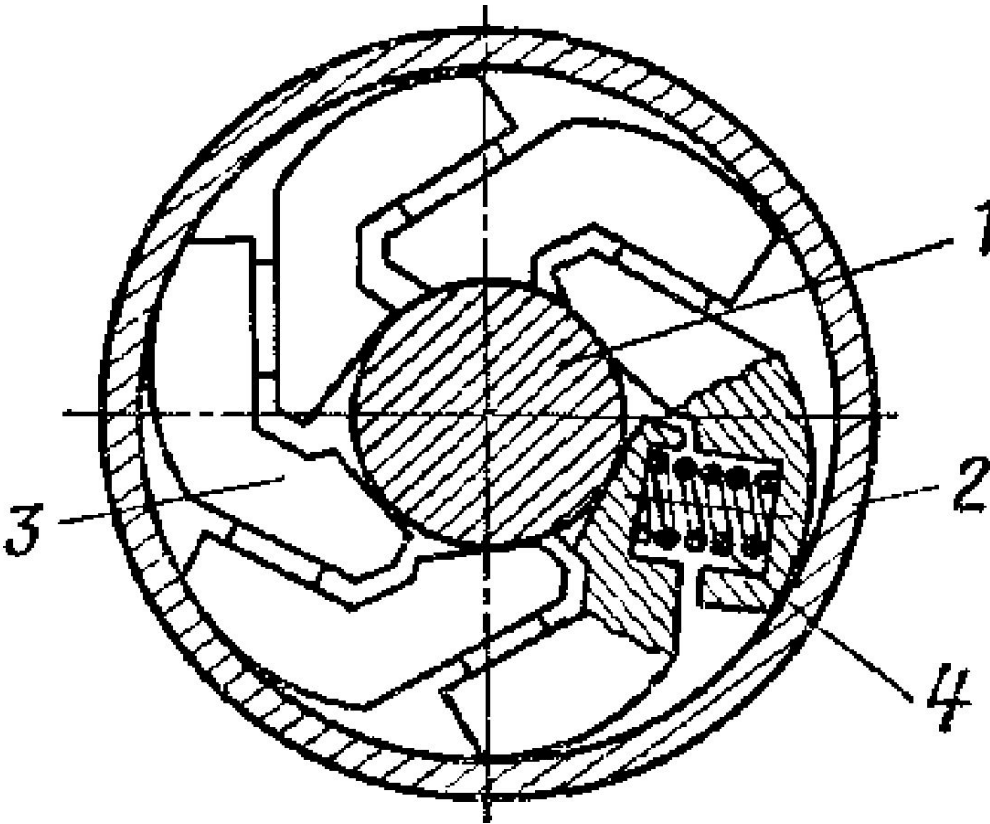
Контактное нажатие создается пружиной **3**.

Для получения необходимой эластичности гибкая связь изготавливается из медной ленты толщиной 0,1 мм и менее или из многожильного жгута, сплетенного из медных жил (0,1 мм и менее).

При наличии резких перегибов гибкая связь быстро разрушается. При больших ходах подвижных контактов длина гибкой связи получается значительной, а ее надежность уменьшается. Поэтому она применяется при перемещениях подвижного элемента не более 0,25 м.

# Основные конструкции контактов

## Твердометаллические контакты.



При больших ходах и больших номинальных токах применяются контактные соединения в виде **скользящих и роликовых токосъемов**.

Подвижный контакт **1 скользящего** токосъема выполнен в виде стержня круглого сечения.

Цилиндрическая обойма **2** соединяется с неподвижным выводом аппарата.

Соединение контакта **1** и обоймы **2** осуществляется пальцами (ламелями) **3**.

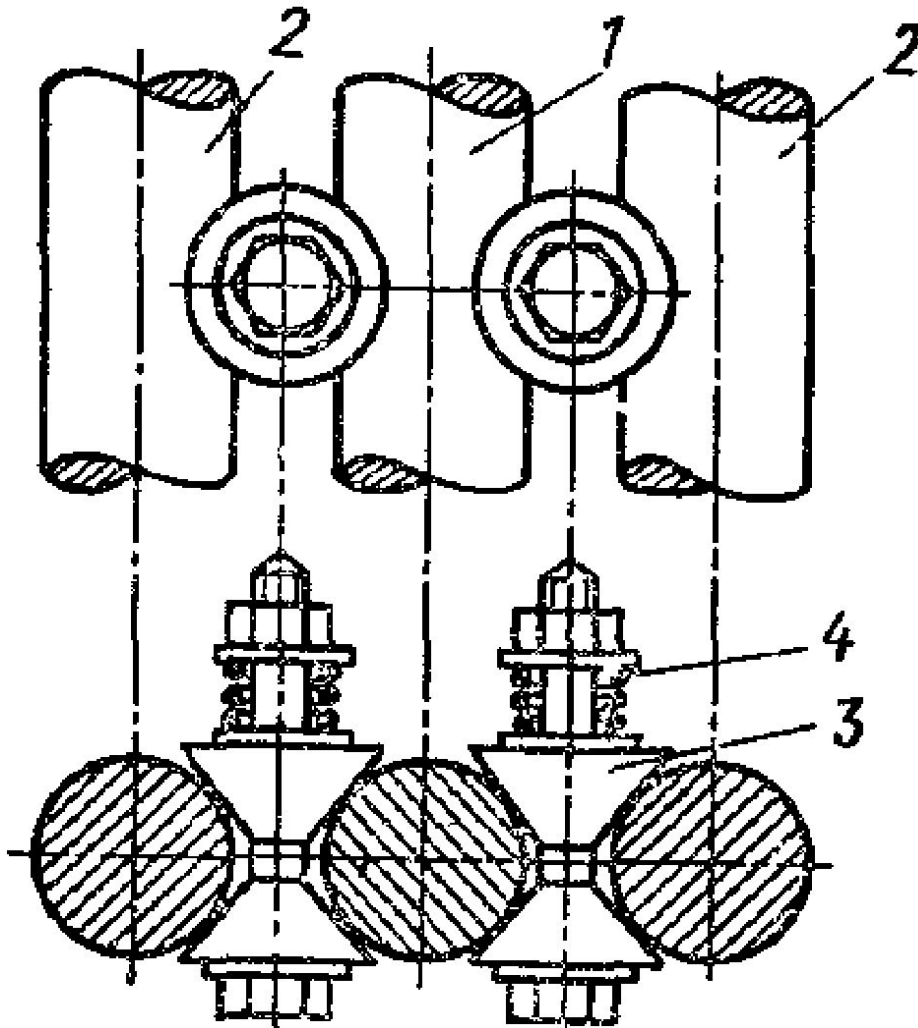
Контактное нажатие создается пружинами **4**.

Подвижный контакт имеет возможность перемещаться поступательно. Неподвижный контакт имеет поверхность касания в виде плоскости, подвижный - в виде цилиндрической поверхности.

Контактирование осуществляется по линии, отчего контакт называется линейным. Недостатком скользящего токосъема является большая сила трения, которая требует значительной мощности приводного механизма.

# Основные конструкции контактов

## Твердометаллические контакты.



Сила трения уменьшается при **роликовом** контакте. Подвижный контакт *1* роликового токосъема выполнен в виде стержня круглого сечения и имеет поступательное движение.

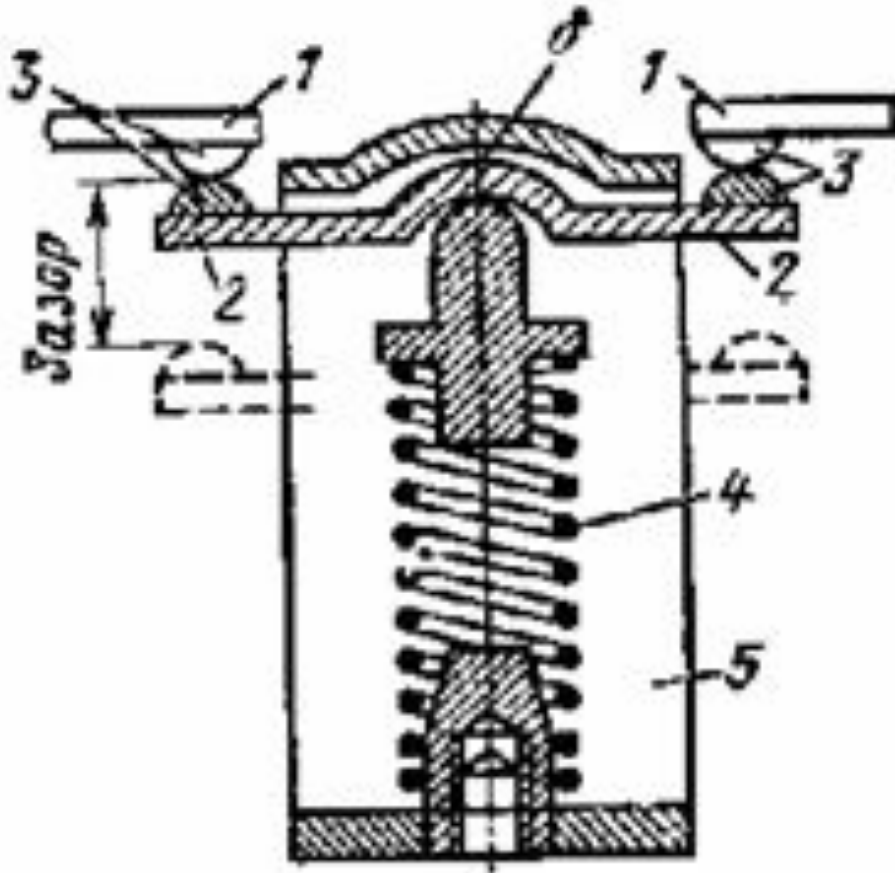
Токосъемные стержни *2* также имеют круглое сечение и соединены с выводом аппарата. Соединение стержня *1* и стержней *2* осуществляется с помощью конусных роликов *3*, которые катятся по поверхности стержней *1* и *2*.

Контактное нажатие создается пружинами *4*.

Число роликов зависит от номинального тока и тока КЗ. Этот контакт для своего перемещения требует небольших усилий и широко применяется в современной аппаратуре высокого напряжения.

# Основные конструкции контактов

## Твердометаллические контакты.



Наиболее характерные недостатки твердометаллических контактов следующие:

1. С ростом длительного номинального тока возрастают необходимое значение 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 надежность аппарата

### В. Разрывные контакты

Контакты многих аппаратов разрывают цепь с током, большим, чем минимальный ток дугообразования. Возникающая электрическая дуга приводит к быстрому износу контактов.

Для надежного гашения дуги необходимо определенное расстояние между неподвижным и подвижным контактами, которое выбирается с запасом.

*Расстояние между неподвижным и подвижным контактами в отключенном состоянии аппарата называется зазором контактов.*

Число площадок касания и стабильность переходного сопротивления зависят от конструкции крепления подвижного и неподвижного контактов.

Подвижные контакты, имеющие возможность устанавливаться в положение с максимальным числом контактных площадок, называются *самоустанавливающимися*. Контактный узел с самоустанавливающимся контактом дан на рисунке.

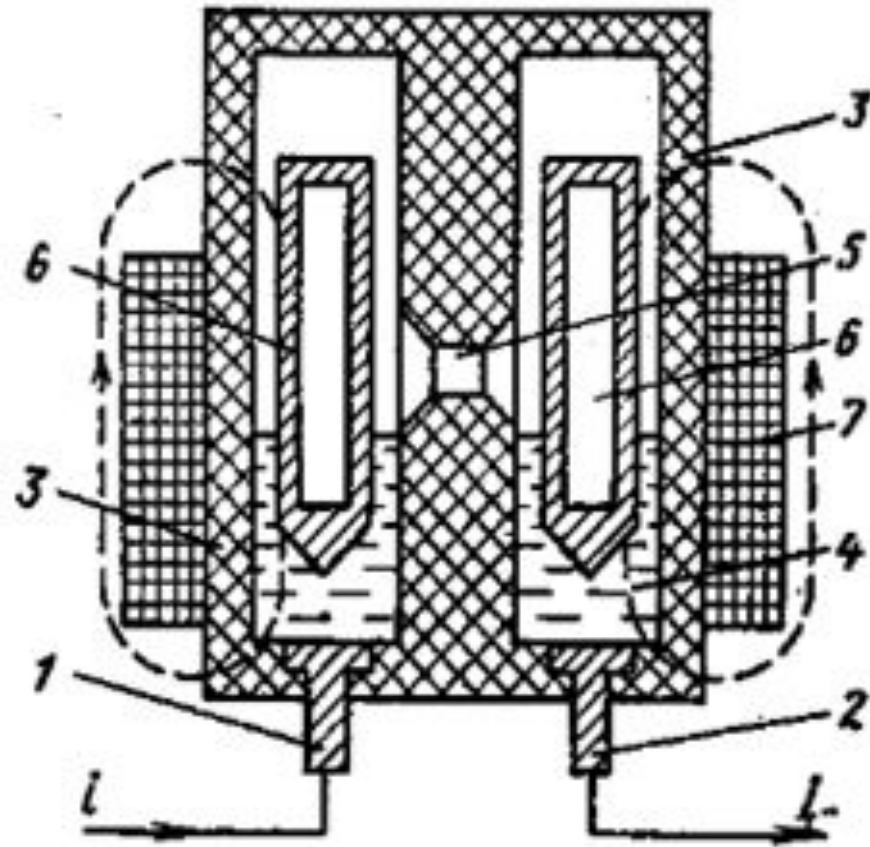
Неподвижные контакты 1 и подвижный мостиковый контакт 2 в месте касания имеют сферические (или цилиндрические) напайки 3, выполненные из серебра или металлокерамики. Контактное нажатие создается пружиной 4.

После касания контактов скоба 5, связанная с приводом аппарата, продолжает свое движение вверх на величину хода, равную провалу  $\delta$ . *Провалом называется расстояние, на которое переместится подвижный контакт, если убрать неподвижный.*

Контактный узел с *перекатыванием подвижного контакта* широко применяется в контакторах с медными контактами.

# Основные конструкции контактов

## жидкометаллические контакты



К электрическим аппаратам обычно предъявляется требование сохранять работоспособность в интервале температур 40о С. Очевидно, что жидкий металл должен сохранять свое состояние в указанном интервале. Из известных материалов только ртуть находится в жидком виде при температуре ниже 0°С и может быть в чистом виде пригодна для ЖМК. Высокая токсичность паров ртути существенно осложняет технологию ее применения.

В ЖМК перспективно применение диэлектрического или металлокерамического твердого каркаса, пропитанного жидким металлом. В этом случае жидкий металл удерживается в капиллярах каркаса и образует на его поверхности пленку, с которой происходит контактирование. Такие ЖМК могут занимать любое положение в пространстве.

Рассмотрим принцип действия контактора с **жидкометаллическим контактом (ЖМК)**

Внешняя цепь подключается к электродам **1 и 2**. Корпус **3** выполнен из электроизоляционного материала.

Полости корпуса заполнены жидким металлом **4** и соединяются между собой отверстием **5**.

Внутри полостей корпуса плавают пустотелые **ферромагнитные цилиндры 6**.

При подаче напряжения на катушку **7** цилиндры **6** опускаются вниз.

Жидкий металл поднимается и через отверстие **5** соединяет электроды **1 и 2**, контактор включается.

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/мм<sup>2</sup>), что позволяет резко сократить габаритные размеры контактного узла и контактное нажатие, особенно при больших токах.
2. Отсутствие вибрации, приваривания, залипания и окисления контактов при их коммутации.
3. Высокая механическая и электрическая, износостойкость ЖМК, что позволяет создавать аппараты с большим сроком службы.
4. Возможность разработки, коммутационных аппаратов на новом принципе (восстанавливающийся предохранитель) благодаря свойствам текучести жидкого металла.
5. Возможность работы ЖМК при высоких внешних давлениях, высоких температурах, в глубоком вакууме.

Необходимо отметить и недостатки ЖМК:

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



# Материалы контактов

К материалам контактов современных электрических аппаратов предъявляются следующие требования:

- 1) **высокие электрическая проводимость и теплопроводность;**
- 2) **высокая коррозионная стойкость в воздушной и других средах;**
- 3) **стойкость против образования пленок с высоким электрическим сопротивлением;**
- 4) **малая твердость для уменьшения необходимой силы нажатия;**
- 5) **высокая твердость для уменьшения механического износа при частых включениях и отключениях;**
- 6) **малая эрозия;**
- 7) **высокая дугостойкость (температура плавления);**
- 8) **высокие значения тока и напряжения, необходимые для дугообразования;**
- 9) **простота обработки, низкая стоимость.**

**Медь.** Положительные свойства: высокие удельная электрическая проводимость и теплопроводность, достаточная твердость, что позволяет применять при частых включениях отключения довольно высокие значения и , простота технологии, низкая стоимость.

Недостатки: достаточно низкая температура плавления, при работе на воздухе покрывается слоем прочных оксидов, имеющих высокое сопротивление, требует довольно больших сил нажатия. Для защиты меди от окисления поверхность контактов покрывается электролитическим способом

**Серебро.** Положительные свойства: высокие электрическая проводимость и теплопроводность, пленка оксида серебра имеет малую механическую прочность и быстро разрушается при нагреве контактной точки.

Контакт серебра устойчив благодаря малому напряжению на смятие см. Для работы достаточны малые нажатия (применяется при нажатиях 0,05 Н и выше). Устойчивость контакта, малое переходное сопротивление являются характерными свойствами серебра.

Недостатки: малая дугостойкость и недостаточная твердость препятствуют использованию его при наличии мощной дуги и частых включениях и отключениях.

**Алюминий.** Положительные свойства: достаточно высокие электрическая проводимость и теплопроводность.

Недостатки: 1) образование на воздухе и в активных средах пленок с высокой механической прочностью и высоким сопротивлением; 2) низкая дугостойкость (температура плавления значительно меньше, чем у меди и серебра); 3) малая механическая прочность; 4) из-за наличия в окружающем воздухе влаги и оксидов медный и алюминиевый контакты образуют своеобразный гальванический элемент.

**Вольфрам.** Положительные свойства: высокая дугостойкость, большая стойкость против эрозии, сваривания. Высокая твердость вольфрама позволяет применять его при частых включениях и отключениях.

Недостатки: высокое удельное сопротивление, малая теплопроводность, образование прочных оксидов и сульфидных пленок. В связи с образованием пленок и их высокой механической прочностью вольфрамовые контакты требуют большого нажатия.

**Металлокерамические материалы.** Материалы, обладающие необходимыми свойствами, получают методом порошковой металлургии (металлокерамики).

Полученные таким методом материалы сохраняют физические свойства входящих в них металлов. Дугостойкость металлокерамики обеспечивается такими компонентами, как вольфрам, молибден. Низкое переходное сопротивление контакта достигается использованием в качестве второго компонента серебра или меди.

В аппаратах низкого напряжения чаще всего применяется металлокерамика **КМК-А10** из серебра и оксида кадмия.

# Основные законы магнитных цепей электрических аппаратов.

**Магнитной цепью** называется совокупность ферромагнитных деталей и немагнитных промежутков между ними, через которые замыкается магнитный поток, создаваемый магнитодвижущей силой катушки или постоянного магнита.

Магнитные цепи ЭММ бывают неразветвленные и разветвленные и содержат следующие основные элементы.

Подвижная часть магнитной цепи называется **якорем 1**.

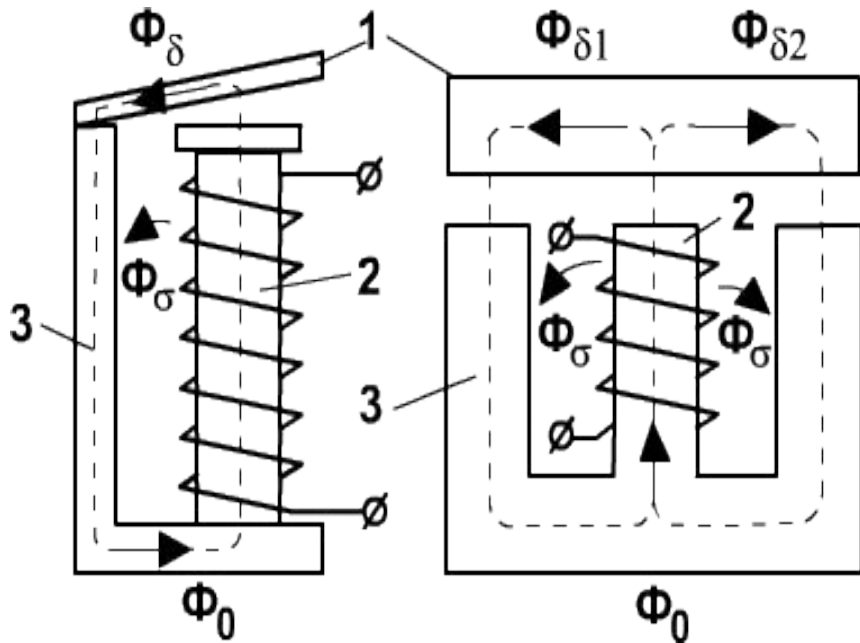
Часть м.ц., на которой расположена намагничивающая обмотка, называется **сердечником 2**.

Часть м.ц., соединяющая сердечник с якорем называется **ярмом 3**.

Намагничивающая обмотка создает м.д.с., под действием которой возбуждается **магнитный поток**  $\Phi$ . Этот поток замыкается как через зазор, так и между другими частями магнитной цепи, имеющими различные магнитные потенциалы.

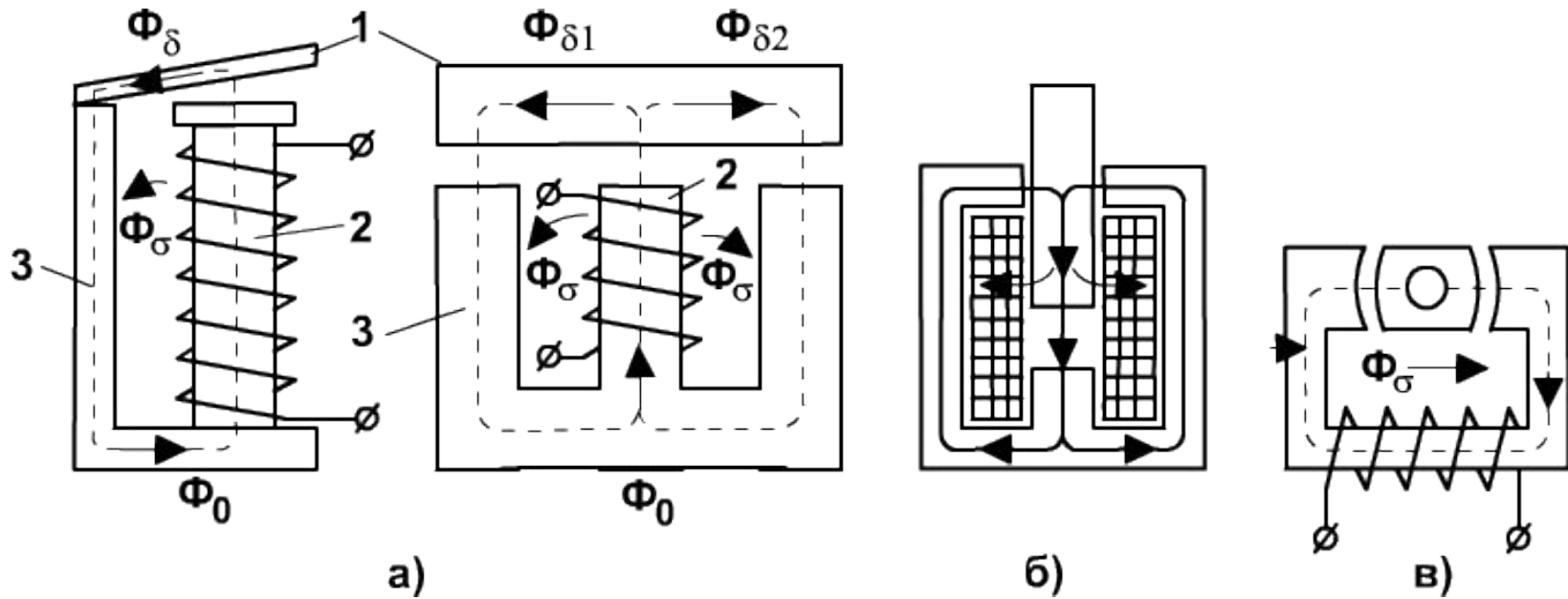
Воздушный зазор, меняющийся при перемещении якоря, называется рабочим зазором. Соответственно поток, проходящий через рабочий зазор, называется рабочим потоком. Все остальные потоки в магнитной цепи называются потоками рассеяния. Поток в основании или в сердечнике равен

$$\Phi_0 = \Phi_\delta + \Phi_s$$



По конструкции ЭММ можно свести к нескольким основным группам:

- а) с внешним притягивающимся якорем
- б) с втяжным якорем
- в) с поперечно движущимся якорем



По роду тока м.ц. бывают постоянного и переменного тока. Отличительной особенностью м.ц. переменного тока является шихтованный из листов электро технической стали сердечник и наличие короткозамкнутого экрана. Шихтовка сердечника позволяет уменьшить влияние потерь в стали от вихревых токов и гистерезиса на работу ЭММ, а к.з. экран уменьшает вибрацию якоря.

# Законы Кирхгофа для магнитных цепей

*Первый закон Кирхгофа.* Алгебраическая сумма магнитных потоков в узле магнитной цепи равняется нулю

$$\sum_{k=1}^n \Phi_k = 0$$

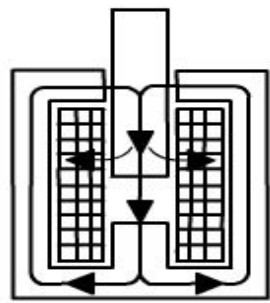
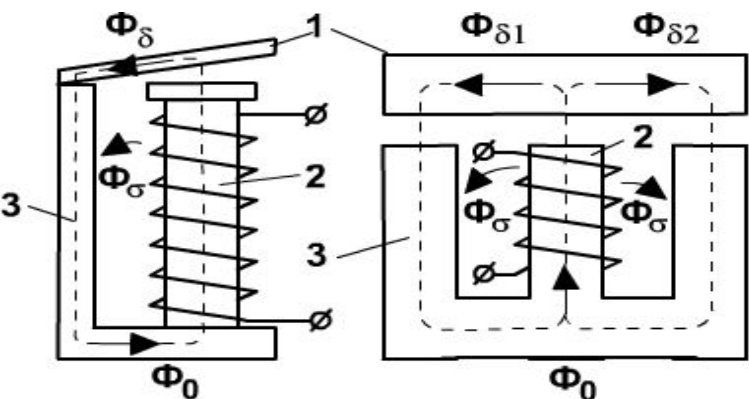
*Второй закон Кирхгофа.* Алгебраическая сумма **падений магнитного потенциала** в замкнутом контуре магнитной цепи равна алгебраической сумме **м.д.с.**, действующих в этом контуре при постоянном магнитном потоке  $\Phi = \text{const}$ .

$$\Phi R_{M1} + \Phi R_{M2} + \dots + \Phi R_{Mi} = (IW)_1 + (IW)_2 + \dots + (IW)_k \quad \text{ИЛИ} \quad \sum_{i=1}^n \Phi R_{Mi} = \sum_{k=1}^m (IW)_k$$

# Схемы замещения магнитной цепи

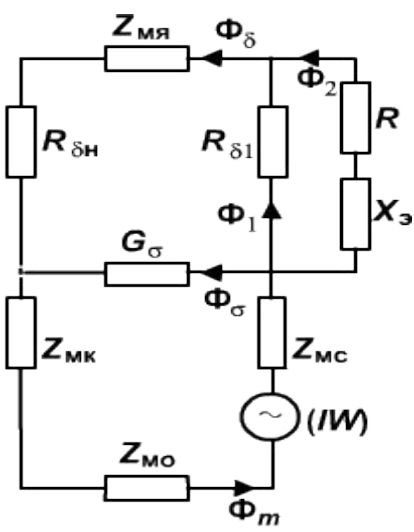
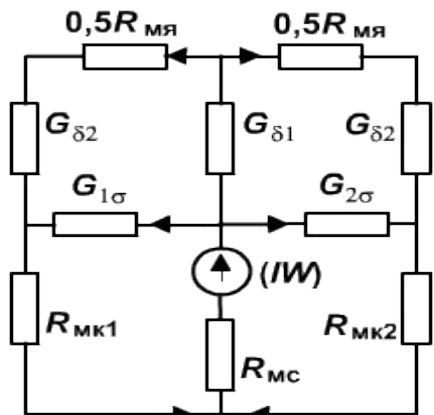
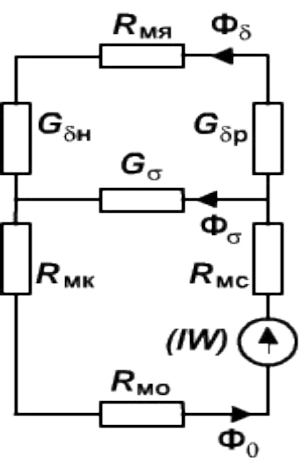
Магнитная цепь			Электрическая цепь		
Обозначения		Размерность	Обозначения		Размерность
Магн. поток	$\Phi$	$Вб = В \cdot с$	Ток	$I$	А
М.д.с	$l/w$	А	Э.д.с	$E$	В
Магн. напряж.	$U_m$	А	Электр. напряж.	$U$	В
Магн. сопрот.	$R_m$	$А/В \cdot с = 1/Г$	Электр. сопрот.	$R$	Ом
Магн. провод.	$G_m$	Г	Электр. провод.	$G$	$1/Ом$

Для удобства расчета магнитную цепь заменяют эквивалентной электрической цепью. В электрической схеме замещения *м.д.с.* заменяется *э.д.с.*, магнитный поток — электрическим током, магнитные сопротивления — электрическими сопротивлениями.



Принцип составления схемы замещения магнитной цепи.

Магнитная цепь условно разбивается на участки с равномерным сечением и постоянной магнитной проницаемостью.



Затем каждый участок магнитной цепи заменяется элементом электрической цепи, а распределенная на участке мдс заменяется источником ЭДС.

# Расчет магнитных проводимостей воздушных зазоров

При расчете магнитной цепи и определении тяговой характеристики электромагнита необходимо знать магнитную проводимость рабочего воздушного зазора и проводимости потоков рассеяния. Величина магнитной проводимости определяется конфигурацией поверхностей полюсов, ограничивающих воздушный зазор, их размерами и величиной воздушного зазора.

Существуют несколько методов расчета магнитных проводимостей.

Наиболее распространенными из них являются аналитический метод, метод вероятного пути потока (метод Роттерса), метод расчетных полюсов и метод построения картины поля. Рассмотрим более подробно лишь один из этих методов, а именно аналитический.

1.1. *Аналитический метод.* Если линии магнитного поля в воздушном зазоре параллельны, а эквипотенциальные поверхности представляют собой параллельные плоскости, то магнитная проводимость определяется по формуле

$$G_m = \frac{\mu_0 S}{\delta}$$

Для полюсов простой конфигурации с размерами полюсов  $a \times b$  магнитная проводимость будет равна

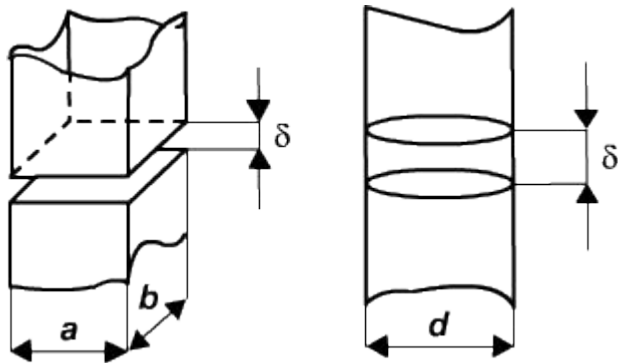
$$G_M = \mu_0 \frac{a \cdot b}{\delta}$$

для полюсов цилиндрической формы с диаметром  $d$

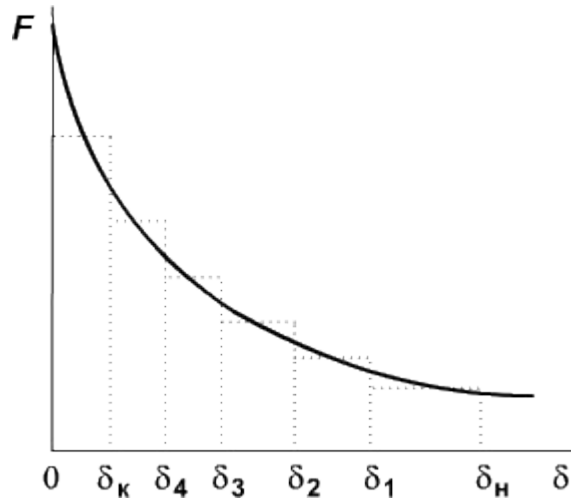
$$G_M = \mu_0 \frac{\pi d^2}{4\delta}$$

Однако даже для таких простых конфигураций полюсов из—за существования поперечных сил в магнитном поле линии магнитной индукции стремятся занять возможно больший объем, выпучиваясь по краям полюсов, образующих воздушный зазор. Выпучивание искажает поле и делает его неравномерным вблизи краев. Поэтому фактически магнитное поле в зазоре является неравномерным и вышеприведенные формулы для расчета проводимостей весьма не точны. Практически этими формулами можно пользоваться для определения всей проводимости между полюсами плоской формы, если размеры  $a$ ,  $b$  и  $d$  значительно больше, т. е.

$$\frac{\delta}{a} \leq 0,2; \quad \frac{\delta}{b} \leq 0,2; \quad \frac{\delta}{d} \leq 0,2;$$



# Тяговые силы электромагнитов постоянного тока



Если система работает при постоянной намагничивающей силе (т.е.  $I = \text{const}$ ),

Если система работает при постоянном потокоцеплении (т.е.  $\Phi = \text{const}$ ),

Если не учитывать потери мдс в стали, тогда

$$F = - (IW)^2 \frac{\mu_0 S}{\delta^2}$$

# Тяговые силы электромагнитов переменного тока

Тяговая сила электромагнитов переменного тока, так же как и электромагнитов постоянного тока, может быть определена либо по формуле Максвелла, либо по формуле, полученной из анализа энергетического баланса.

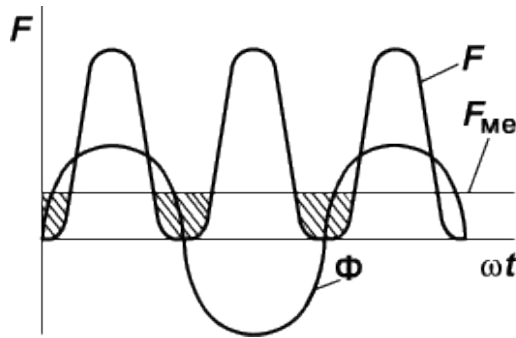
Пренебрегая искажением формы кривой потока (в связи с возможным насыщением магнитопровода), можно считать, что изменение магнитного потока во времени происходит по синусоидальному закону

$$\Phi = \Phi_M \sin \omega t$$

тогда тяговая сила по формуле Максвелла будет равна

$$F = 4,06 \cdot 10^4 \frac{\Phi^2}{S} = 4,06 \cdot 10^4 \frac{\Phi_M^2}{S} \sin^2 \omega t$$

$$\sin^2 \omega t = \frac{1 - \cos 2\omega t}{2}$$



но

Подставляя в формулу тяговой силы, получим

$$F = 2,03 \cdot 10^4 \frac{\Phi_M^2}{S} - 2,03 \cdot 10^4 \frac{\Phi_M^2}{S} \cos 2\omega t = F - F_M \cos 2\omega t = F' - F'' = F_M (1 - \cos 2\omega t)$$

Отсюда видно, что тяговая сила электромагнитов переменного тока содержит две составляющие — постоянную и переменную. Последняя изменяется во времени по закону  $\cos 2\omega t$  и имеет амплитуду, равную постоянной составляющей.

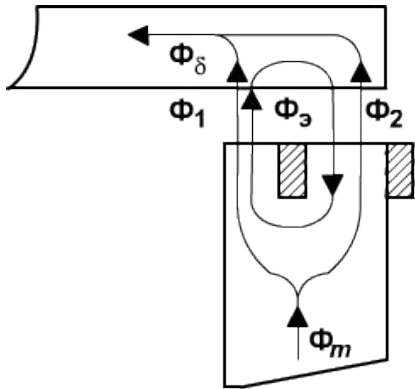
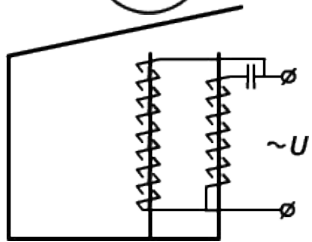
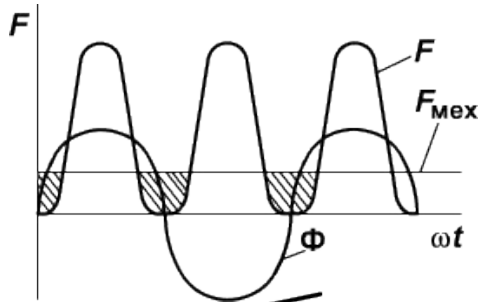
Тяговая сила электромагнита переменного тока имеет пульсирующий характер и дважды за период, когда магнитный поток  $\Phi$  равен нулю, равна нулю.

Среднее за период значение тяговой силы равно ее постоянной составляющей

Так же как и для электромагнита постоянного тока, формула Максвелла дает достаточно точные результаты лишь при малых значениях воздушного зазора, когда можно принять, что поток в зазоре распределен равномерно по поверхности полюса.



# Вибрация якоря однофазных электромагнитов и способы ее устранения



Мгновенное значение тяговой силы электромагнита переменного тока дважды за период равно нулю. В эти моменты времени якорь под действием противодействующих сил будет отходить от сердечника. Затем, когда тяговая сила вновь превысит механическую, якорь опять притянется. Таким образом, возникает вибрация якоря, которая ускоряет износ отдельных частей электромагнита.

Устранить это нежелательное явление в однофазном электромагните переменного тока можно путем создания в воздушном зазоре между якорем и сердечником двух магнитных потоков, сдвинутых по фазе.

Принципиально такая задача может быть решена двумя способами:

1) расщеплением магнитопровода на две части, каждая из которых имеет свою катушку намагничивания, при этом токи в катушках не должны совпадать по фазе.

Этот способ неэкономичен и практически не применяется.

2) Применение экрана (короткозамкнутого витка), охватывающего часть площади торца магнитопровода в воздушном зазоре. Этот метод нашел широкое применение в однофазных электромагнитах переменного тока.

Сдвиг по фазе между потоками и возникает в связи с появлением в зазоре потока экрана.

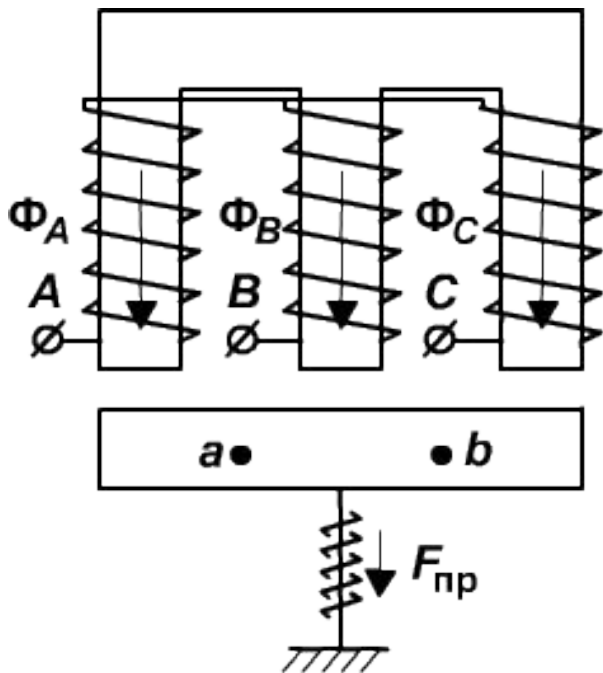
Результирующая тяговая сила электромагнита с экраном будет также пульсирующей, как и при отсутствии экрана, но минимальное значение силы будет больше нуля. Максимальное и минимальное значение тяговой силы будут равны:

$$F = 2,03 \cdot 10^4 \left( \frac{\Phi_1^2}{S_1} + \frac{\Phi_2^2}{S_2} \right) - 2,03 \cdot 10^4 \left[ \frac{\Phi_1^2}{S_1} \cos 2\alpha t + \frac{\Phi_2^2}{S_2} (\cos 2\alpha t - 2\psi) \right] = F' - F''$$

# Трехфазный электромагнит

Трех фазный электромагнит можно рассматривать как три однофазных, токи в которых сдвинуты друг относительно друга на  $120^\circ$ . Такой же сдвиг имеют и магнитные потоки в

$$\Phi_A = \Phi_M \sin \alpha t, \quad \Phi_B = \Phi_M \sin(\alpha t - 120); \quad \Phi_C = \Phi_M \sin(\alpha t - 240);$$



Если допустить, что в магнитном отношении все три фазы симметричны и насыщение отсутствует, то величина силы,

$$F_A = \frac{1}{2} F_M (1 - \cos 2\alpha t), \quad F_B = \frac{1}{2} F_M [1 - \cos(2\alpha t - 240)], \quad F_C = \frac{1}{2} F_M [1 - \cos(2\alpha t - 480)]$$

Результирующая сила, действующая на якорь равна сумма этих сил

$$F = \frac{3}{2} F_M = \text{const.}$$

Таким образом, в трехфазном электромагните результирующая сила, действующая на якорь, во времени не меняется. Однако и в этом электромагните вибрация полностью не устраняется.

При прохождении потока в каждой фазе через ноль сила, развиваемая этой фазой, также равна нулю. В результате точка приложения равнодействующей электромагнитной силы оставшихся двух фаз перемещается между точками  $a$  и  $b$ ).

Поскольку точка приложения противодействующей силы неизменна, то возникает перекатывание якоря, т.е. вибрация. Устраняется такая вибрация путем укорочения среднего стержня.

У трехфазных электромагнитов результирующая сила на якоре в 1,5 раза больше максимальной и в 3 раза больше средней силы однофазного электромагнита.