

Электрические аппараты

Общее определение

Электрические аппараты - это электротехническое устройство предназначенное для различных целей : включение и отключение электрических цепей, контроль их состояния, управление, измерение и защита электрических и неэлектрических объектов.

Электро-техническое устройство - это промышленное изделие предназначенное для выполнения определенной функции при решении комплексной задачи: производства, распределения, контроля, преобразования и использования электрической энергии.

Режимы работы электротехнических устройств.

Номинальный режим работы - это такой режим, когда элемент электрической цепи работает при значениях тока, напряжениях, мощности указанных в техническом паспорте, что соответствует наивыгоднейшим условиям работы с точки зрения экономичности и надежности (долговечности).

Пример : электрическая лампа.

Нормальный режим работы - режим, когда аппарат эксплуатируется при параметрах режима незначительно отличающихся от номинального.

Аварийный режим работы - это такой режим, когда параметры тока, напряжения, мощности превышают номинальный в два и более раз. В этом случае объект должен быть отключен.

Приемник электрической энергии или **электроприемник** - это устройство предназначенное для преобразования электрической энергии в другой вид энергии (тепловую, механическую, химическую и т.д.).

Электрическая установка - совокупность машин, аппаратов, линий и вспомогательного оборудования (вместе с сооружениями и помещениями в которых они установлены) предназначенные для производства, преобразования, трансформации, передачи, распределения и преобразования ее в другой вид энергии.

Электрические установки по условиям электробезопасности подразделяются в ПУЭ на :

- до 1000 В
- больше 1000 В

(по действующим значениям напряжения).

Классификация электрических аппаратов.

Многообразие видов аппаратов и выполнении ими функций и совмещение в одном аппарате нескольких функций не позволяет строго классифицировать их по одному признаку.

1)Классификация **по назначению**:

1)Коммутационные аппараты.

Основное назначение - это включение, отключение, переключение электрических цепей.

- рубильники
- пакетные переключатели
- различные переключатели
- автоматические выключатели
- предохранитель

Особенность : редкое включение, отключение.

2)Защитные аппараты.

Основное назначение - это защита электрических цепей от токов короткого замыкания и перегрузок

- автоматические выключатели
- предохранитель.

3)Пускорегулирующие аппараты.

Основная функция этих аппаратов это управление электроприводами и другими потребителями электрической энергии. Их еще называют аппараты управления (АУ)

- контакторы
- пускатели
- коммандо-контроллеры
- реостаты

Особенности : частое включение, отключение до 3600 раз в час т.е. 1 раз в секунду.

4)Ограничивающие аппараты.

Функцию ограничителя токов короткого замыкания (ТКЗ) выполняют реакторы, а функцию перенапряжения (разрядники).

5)Контролирующие аппараты.

Основная функция этих аппаратов заключается в контроле за заданными электрическими и неэлектрическими параметрами

- реле
- датчики

6)Измерительные аппараты.

Основная функция - изолирование цепи первичной коммутации (силовой цепи, цепи главного тока) от измерительных цепей, они преобразуют контролирующий параметр в форму удобную для измерения

- трансформаторы тока
- трансформаторы напряжения
- делители напряжения

7)Регулирующие аппараты.

Предназначены для автоматизации, стабилизации и регулирования заданного параметра электрической цепи.

II)Классификация по напряжению:

- 1)До 1000 В (660 В включительно)
- 2)Аппараты больше 1000 В.

III)Классификация по роду тока :

- 1)Постоянного тока
- 2)Переменного тока промышленной частоты
- 3)Переменного тока повышенной частоты

IV)Классификация по роду защиты от попадания в электрические аппараты инородных тел и защиты персонала от прикосновения с токоведущими и подвижными частями, а также от попадания влаги. По ГОСТу 14054-80.

Степень защиты выражается условными буквенно-цифровыми обозначениями (БЦО), которые приняты во всем мире.

IP - международная степень защиты

XX - защита от попадания твердых тел и влаги.

I P X X

↑ Защита от пыли:
↙ От влаги
↘ От твердых тел
1) Защита от пыли:
Если (защита отсутствует.

Если стоит 1 значит защита от преднамеренного доступа, от попадания крупных тел диаметром не менее 52.5 мм $\varnothing \geq 52.5$ мм (ладонь).

Если стоит 2 значит защита от попадания инородных тел $\varnothing \geq 12.5$ мм и длиной 80 мм(палец).

Если стоит 3 значит защита от преднамеренного доступа тела диаметром $\varnothing \geq 2.5$ мм (защита от инструмента).

Если стоит 4 значит защита от преднамеренного доступа тела диаметром $\varnothing \geq 0.1$ мм.(провода).

Если стоит 5 значит полная защита персонала, защита от отложения пыли.

Если стоит 6 значит полная защита персонала, защита от попадания пыли.

2)Защита от влаги:

Если стоит 0 значит защита отсутствует

Если стоит 1 значит защита от капель сконцентрированной воды.

Если стоит 2 значит защита от капель

Если стоит 3 значит защита от дождя (от капель падающих вертикально под углом в 60°)

Если стоит 4 значит защита от брызг любого направления

Если стоит 5 значит защита от струй

Если стоит 6 значит защита от воздействий воды характерных для палубы корабля (волны)

Если стоит 7 значит защита от погружения в воду

Если стоит 8 значит защита от длительного погружения в воду под давлением (глубоководный электрический аппарат).

IP00 - открытое исполнение

IP20 - защищенное исполнение

IP44 - брызгозащищенное исполнение

IP54 - пылезащищенное исполнение

IP66 - морское исполнение

IP67 - герметичное исполнение

V) Классификация по работе в определенных климатических условиях и категории размещения. По ГОСТу 15150-69.

Установлено пять категорий размещения электрических аппаратов:

1) Электрические аппараты предназначенные для работы на открытом воздухе.

2) Электрические аппараты предназначенные для работы на открытом воздухе под навесом, в палатке, механическом кожухе.

3) Электрические аппараты предназначенные для работы в закрытом помещении без отопления (трансформаторные подстанции).

4) Электрические аппараты предназначенные для работы в закрытых помещениях с отоплением.

5) Электрические аппараты предназначенные для работы в помещениях с повышенной влажностью и почве (шахты, подвалы).

ГОСТ 15543-70 конкретизирует предыдущий ГОСТ в части классификации электрических аппаратов в определенных климатических условиях, которые характеризуются изменением в температуре и влажности воздуха, а также пределами их изменения во времени в определенной климатической зоне.

Установлены следующие климатические зоны:

	русское	латинское
1) Зоны умеренного климата	У	N
2) Зоны умеренного и холодного климата	УХЛ	NF
3) Зоны тропически-влажного климата	ТВ	TH
4) Зоны тропически-сухого климата	ТС	TA
5) Зоны тропического климата	Т	T
6) Для всех климатических районов на суше и на море	О	U

Пример: Маркировка магнитного пускателя: ПМА-6122У22Б. Судя по У2 можно сказать, что: У - данный аппарат предназначен для работы в странах с умеренным климатом при нормальных значениях температуры от -40° до +40° при среднемесячной влажности воздуха 80% при 20%.

2 - в помещениях имеющих свободный доступ наружного воздуха.

Классификация электрических установок.

Климатические возможности работы электрических аппаратов необходимо соотносить с категориями электрических установок.

1. Открытые или наружные электрические установки - это электрические установки на открытом воздухе защищены навесом и сетчатым ограждением.

2. Закрытые или внутренние - электрические установки находящиеся в закрытом помещении.

Помещения бывают:

а) Сухие, где относительная влажность не превышает 60% при 20%. Такие помещения называются нормальными при отсутствии в них условий характерных для помещений жарких, пыльных, с химически опасной средой или взрывоопасных.

б) Влажные помещения, такие в которых пары и конденсированная влага выделяется лишь временно с влажностью не более 75%.

в) Сырые помещения, такие в которых относительная влажность длительно превышает 75%.

г) Особо сырые помещения, такие в которых влажность близка к 100% потолок и стены покрыты влагой.

д) Жаркие помещения, такие, где температура длительно превышает +30° .

е) Пыльные помещения, где выделившиеся пыль попадает внутрь электрических аппаратов и электрических машин. Они подразделяются на :

- с проводящей пылью
- с не проводящей пылью.

ж) Помещения с химически активной средой, такие которые содержат пары или образовавшиеся отложения, действующие разрушающе на изоляцию и на токозащитные части.

3. Помещения с повышенной опасностью - это помещения в которых присутствуют следующие условия:

а) Сырость и проводящая пыль.

б) Токопроводящий пол.

в) Высокая температура.

г) Возможность одновременного сопротивления с металлическими корпусами и с заземленными металлическими конструкциями.

4. Особо опасные помещения - это такие которым присущи следующие условия :

а) Особая сырость.

б) Химически активная среда.

в) Одновременное наличие двух и более условий с повышенной опасностью.

Требования предъявляемые к электрическим аппаратам.

Все требования направлены к обеспечению нормальной эксплуатации во всех режимах, достаточно большой срок службы линии, минимальные затраты, отсутствие чрезмерных световых и звуковых эффектов.

Требования определяются:

а) Назначением аппарата

б) Условиями эксплуатации

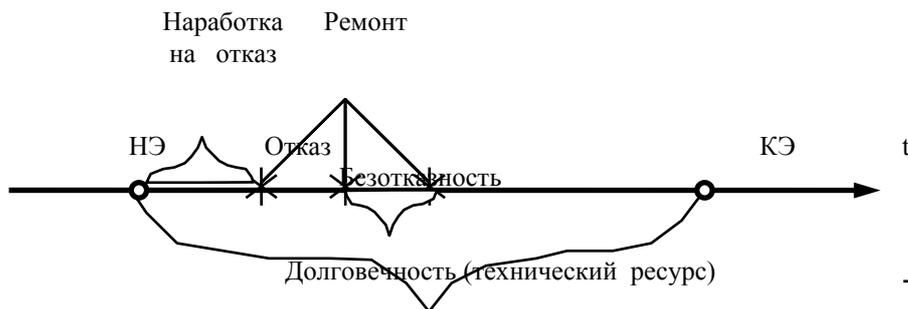
в) Необходимой надежностью электрических аппаратов.

Надежность - основной качественный показатель для основных электрических аппаратов определяемый надежностью узлов. Включает еще три понятия:

1) Безотказность - свойство непрерывно сохранять работоспособность.

2) Долговечность - свойство длительно сохранять работоспособность - сумма интервалов времени безотказной работы.

3) Ремонтопригодность - приспособленность к восстановлению работоспособности.

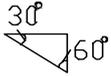
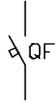


Отказ - состояние электрического аппарата когда одна или группа характеристик выходит за определенные пределы и аппарат теряет свойство работать.

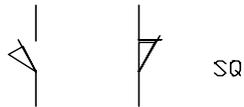
Количественно надежность характеризуется интенсивностью потока отказа

$$\lambda = \frac{n}{N * t} \left[\frac{1}{t} \right]$$

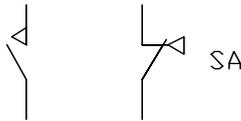
- 5)  - автоматическое срабатывание т.е. данный коммутационный аппарат срабатывает автоматически при превышении какого-либо параметра сверх заданного.
 Размер квадрата : 1.5 X 1.5 [мм]
 Старый ГОСТ : 2 X 1 [мм].



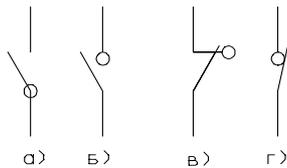
- 6) - путевого или кольцевой выключатель т.е. происходит срабатывание данного коммутационного аппарата при достижении объектом какого-то пространственного положения.



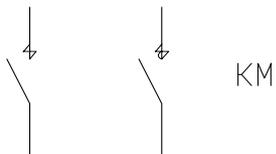
- 7) - самовозврат т.е. контакт возвращается в исходное положение.



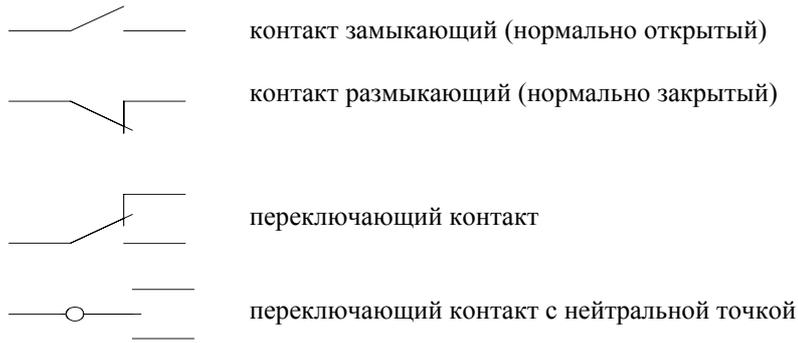
- 8)  - отсутствие самовозврата



- 9)  - дугогашение



Б - Примеры построения контактных коммутирующих устройств.

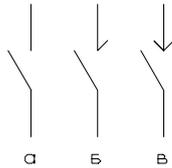


Примеры использования квалифицирующих символов смотри выше.

Дополнительно используемые символы :

1. Контакты импульсные

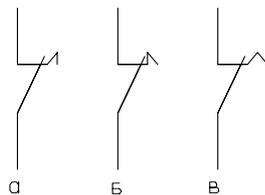
Контакты импульсные - это контакты, которые замыкаются (размыкаются) на незначительный промежуток времени.



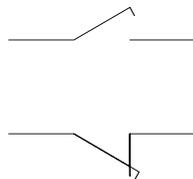
а) - при срабатывании

б) - при возврате

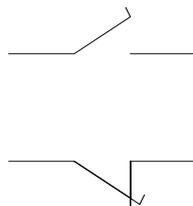
в) - при срабатывании и при возврате



2. Контакты в контактной группе, срабатывающие раньше по отношению к другим контактам:

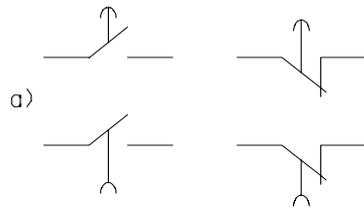


3. Контакты в контактной группе, срабатывающие позже по отношению к другим контактам :

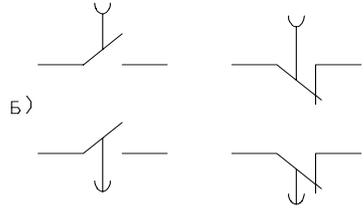


4. Контакты замедления

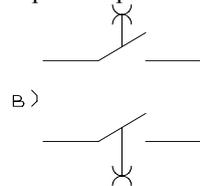
а) При срабатывании



б) При возврате



в) И при срабатывании и при возврате

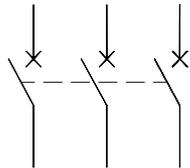


Контакты двухпозиционных коммутационных устройств.

1. Однополюсный выключатель

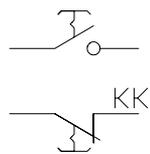


2. Трехполюсный выключатель



Пунктирная линия показывает, что все полюса замыкаются и размыкаются одновременно.

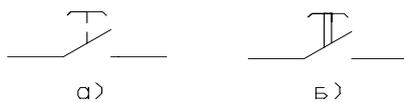
3. Контакт замыкающий нажимного кнопочного устройства без самовозврата.



КК - контакт теплового реле

Возврат элемента управления происходит посредством отдельного привода.

4. Контакт кнопочный с самовозвратом.



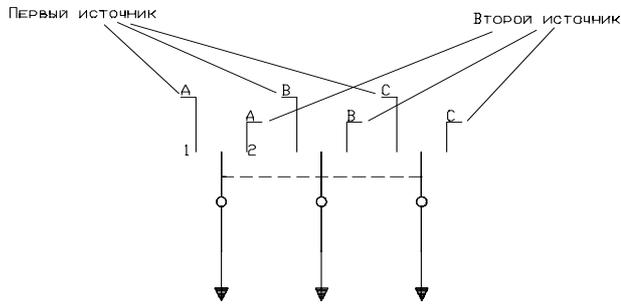
б - это старый ГОСТ.

Многопозиционные коммутационные устройства.

1. Переключатель однополюсный многопозиционный.

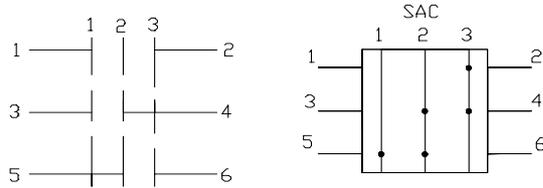


2.Трехпозиционный переключатель с нейтральным положением.



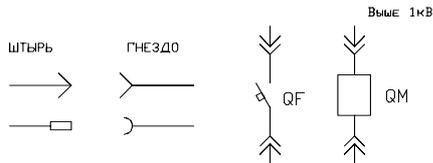
на освещение квартир

3.Ключ управления



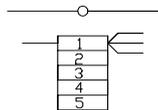
Цепь 1 - 2 разомкнута в первом и втором положении ключа и замкнута в третьем положении ключа.
В - Контакты контактных соединений.

а) Разъемное соединение



выше 1000 В

б) Разборное соединение или клемма



в) Неразборное соединение (пайка)



Размеры УГО (условно - графических обозначений) выполняются как правило в стандарте или пропорционально увеличенные. Ориентация УГО должна быть такая, чтобы обеспечивался наи-более простой рисунок схемы с минимальным количеством изломов и пересечений линий связи.

Линии в электрических схемах.

Толщины линий выбираются в зависимости от формы схемы и размеров УГО. На одной схеме рекомендуется применять не более трех типов размеров линий по толщине:

в - тонкая ,

2в - утолщенная ,

3в ... 4в - толстая ,

в = 0.2 - 1 мм.

Линии должны состоять из горизонтальных и вертикальных отрезков и иметь минимальное количество изломов и взаимопересечений. Допускается применение наклонных линии связи, но длину этих линий по возможности следует ограничивать.

УГО и линии связи выполняются линиями одной толщины. Рекомендуемая толщина линий в ГОСТе 0,3 - 0,4 мм.

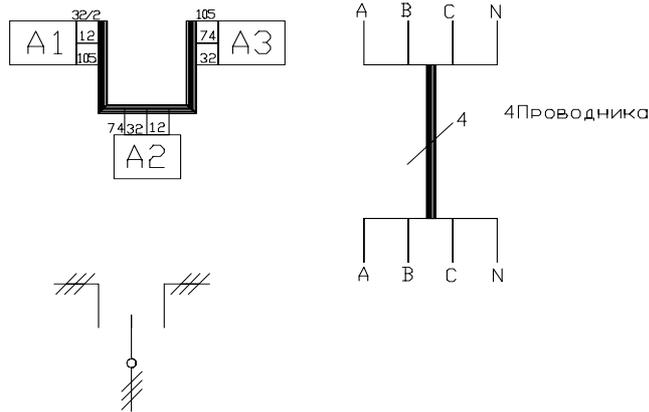
Примеры видов и толщин линий.

Наименование линий ГОСТ 2303-68	Начертание	Толщина	Основное назначение
Сплошная тонкая		в	Линия электрической связи, провод, кабель, шина, линия групповой связи, линия УГО
Сплошная толстая основная		2в, 3в 4в	-----//----- Примечание: для линий групповой связи и силовых электрических цепей применяются утолщенные (2в) и толстые (3в-4в) линии.
Штриховая		в	Линия механической связи, линия экранирования.
Штрихпунктирная тонкая		в	Линия для выделения на схеме групп элементов, составляющ. устройство
Штрихпунктирная с двумя точками		в	Линия разъединительная, для графического разделения частей схемы

Линия групповой связи.

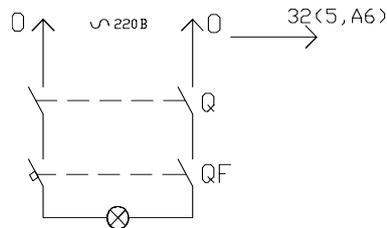
Предназначены для уменьшения количества линий, изображаемых на схеме. Каждая сливаемая линия в месте слияния должна быть помечена цифрой, буквой или их сочетанием. Сливаемые линии не должны иметь разветвленный, т.е. каждый условный номер должен встретиться два раза. При наличии разветвления их количество указывается через дробную черту.

Пример : даны три устройства.



Прерывание линий.

Допускается обрывать линии, если они мешают чтению схемы. Обрывы обозначаются стрелками, около которых БЦО. Если схема продолжается на другой лист, то указывается маркировка и адрес в круглых скобках.



Текстовая информация в схемах.

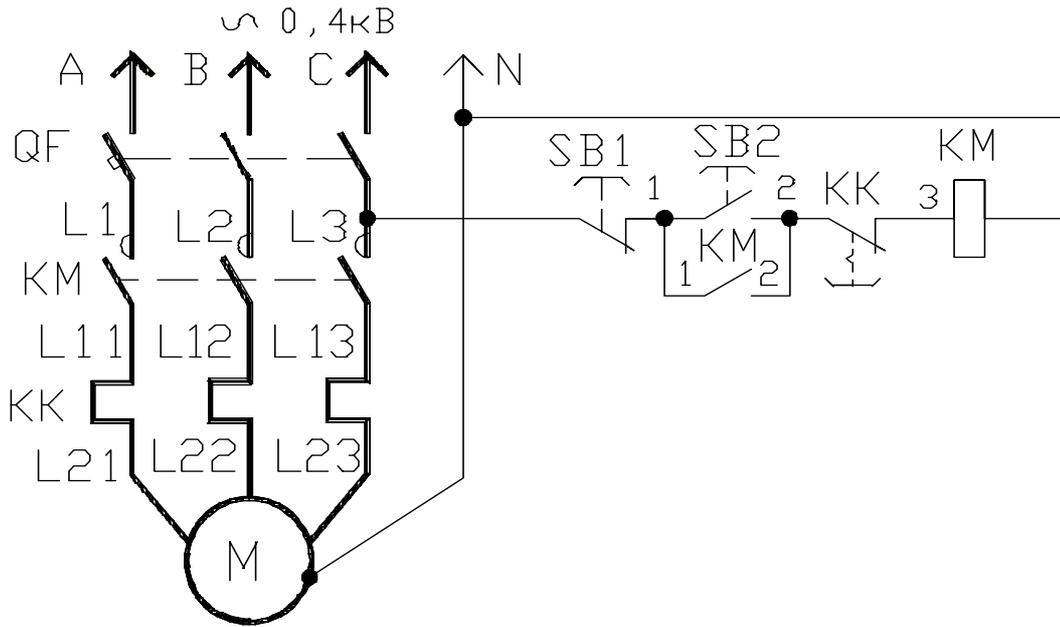
На схемах рекомендуется помещать следующие текстовые данные :

1. Наименование или характеристика электрических сигналов.
2. Обозначение электрических цепей (маркировка).
3. Технические характеристики электрических аппаратов и других устройств в виде текста, таблиц, диаграмм. Текст выполняется по ГОСТу 2701-84 должен быть кратким, точным без сокращений (кроме общепринятых) по возможности справа и сверху от электрического аппарата, рядом с линиями, в конце или в разрыве, на свободном поле, по возможности горизонтально. Таблицы должны иметь наименование, раскрывающее содержание, рас-полагается на свободном поле. Все надписи выполняются чертежным шрифтом по ГОСТу 2304-81. Допускаются шрифты различных размеров.

Обозначение цепей в электрических схемах.

ГОСТ 2709-72 выделяет следующие виды электрических цепей : силовые, защиты, управления, сигнализации, автоматики, измерения. Наиболее распространенный тип маркировки называется независимым. В этом случае одинаковую марку присваивают электрическим цепям, связанным между собой точками с одинаковым потенциалом вне зависимости от того, к каким приборам и аппаратам относятся эти точки. Участки цепи, разделенные электрическими аппаратами или их контактами имеют разную марку, а участки, проходящие через разборные или неразборные контакты имеют одинаковую маркировку. Как правило используются арабские цифры и латинские буквы.

Пример электрической схемы (подключение электрического двигателя).



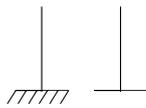
Зависимая маркировка

Применяются для облегчения чтения монтажных схем, цепей вспомогательного тока. При этом каждому виду цепей присваивается определенная буква и определенный порядок цифр цепи постоянного тока, защиты и управления распределительных устройств маркировка с 1 до 99; цепи переменного тока, защиты и управления распределительных устройств маркировка с 101 до 199; у цепей с трансформаторами напряжений маркировка с 201 до 299, цепи трансформаторов тока имеют маркировку с 301 до 399, у цепей аварийной сигнализации маркировка с 501 до 609, у цепей электроприводов маркировка с 701 до 799. Обозначение заземлений и возможных повреждений изоляции.

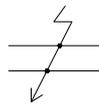
Заземление, электрическое соединение с потенциалом земли



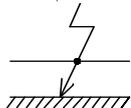
Соединение с корпусом, корпус бывает заземлен.



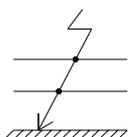
Повреждение изоляции между проводами



Повреждение изоляции между проводом и землей



Двойное замыкание на землю



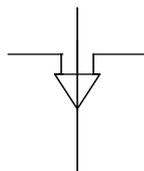
Обозначение муфт в электрических схемах.

Муфта - это устройство для соединения проводов и кабелей.

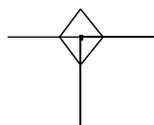
Концевая муфта -



Концевая муфта с ответвлениями -



Соединительная муфта -



Правила техники чтения электрических схем.

Прочитать схему - это значит почерпнуть из нее необходимые сведения.

Чтение и анализ схем неразрывно связаны, т.к. в процессе чтения необходимо оценивать правильно сделанные предположения, пользуясь приемами либо подтверждающими, либо опровергающими.

Что необходимо для чтения схем :

1. Знать и понимать УГО и БЦО и правила их применения
2. Располагать достаточными знаниями ТОЭ
3. Уметь пользоваться приемами чтения и анализа схем :
 - а) При чтении схем всегда необходимо иметь в виду, что электрический ток идет по замкнутому контуру от начала источника электрической энергии к его концу.
 - б) Если в схемах присутствует несколько источников, то каждый из них создает ток, протекающий независимо от токов других источников (мощный физический принцип суперпозиции полей).
 - в) При наличии нескольких контуров электрический ток в них распространяется в них пропорционально сопротивлению каждого из них.

Режимы работы цеховой электрической цепи. Схемы включения электрических приемников.

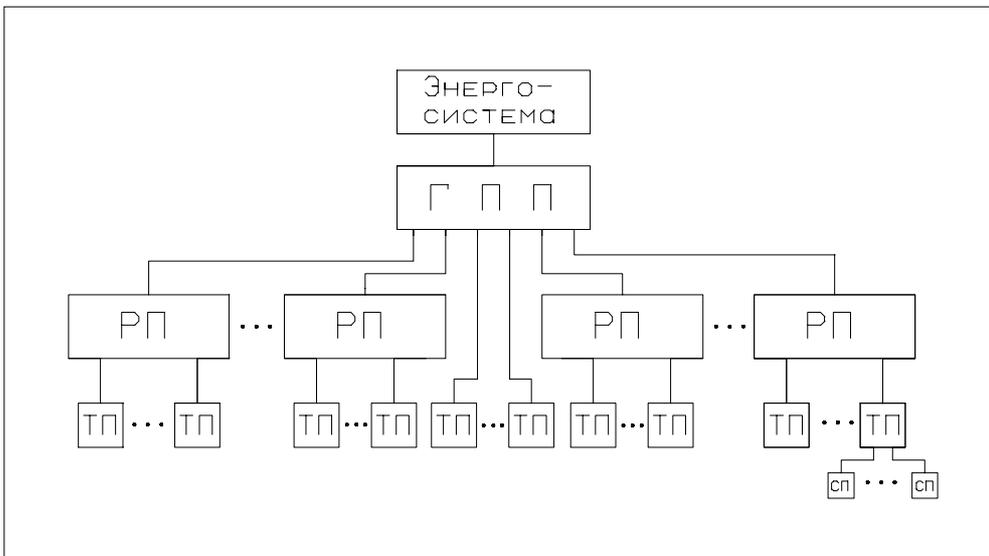
Электрическая сеть - это совокупность подстанций, распределительных устройств и соединяющих их электрических линий, размещенных на определенной территории (район, населенный пункт, завод, цех и т.д.).

Подстанция - это распределительное устройство, электрической установки, служащие для приема, преобразования и распределения электрической энергии.

При изображении электрических сетей используют три вида электрических схем:

1. Структурная схема, служит для общего ознакомления с электроустановкой, в ней дается упрощенное изображение составных элементов в виде прямоугольников и связей между ними.

Пример . Структурная схема электроснабжения завода:



ГПП - главная понизительная подстанция.

РП - распределительная подстанция, это электрическая установка, служащая для приема и распределения электрической энергии.

ТП - трансформаторная подстанция, электрическая установка служащая для приема, распределения и преобразования электрической энергии.

СП - силовой пункт.

2. Функциональная схема.

В ней уже указываются источники, преобразователи с обозначением их мощности, раскрываются некоторые структурные блоки, позволяющие понять функциональные возможности схемы.

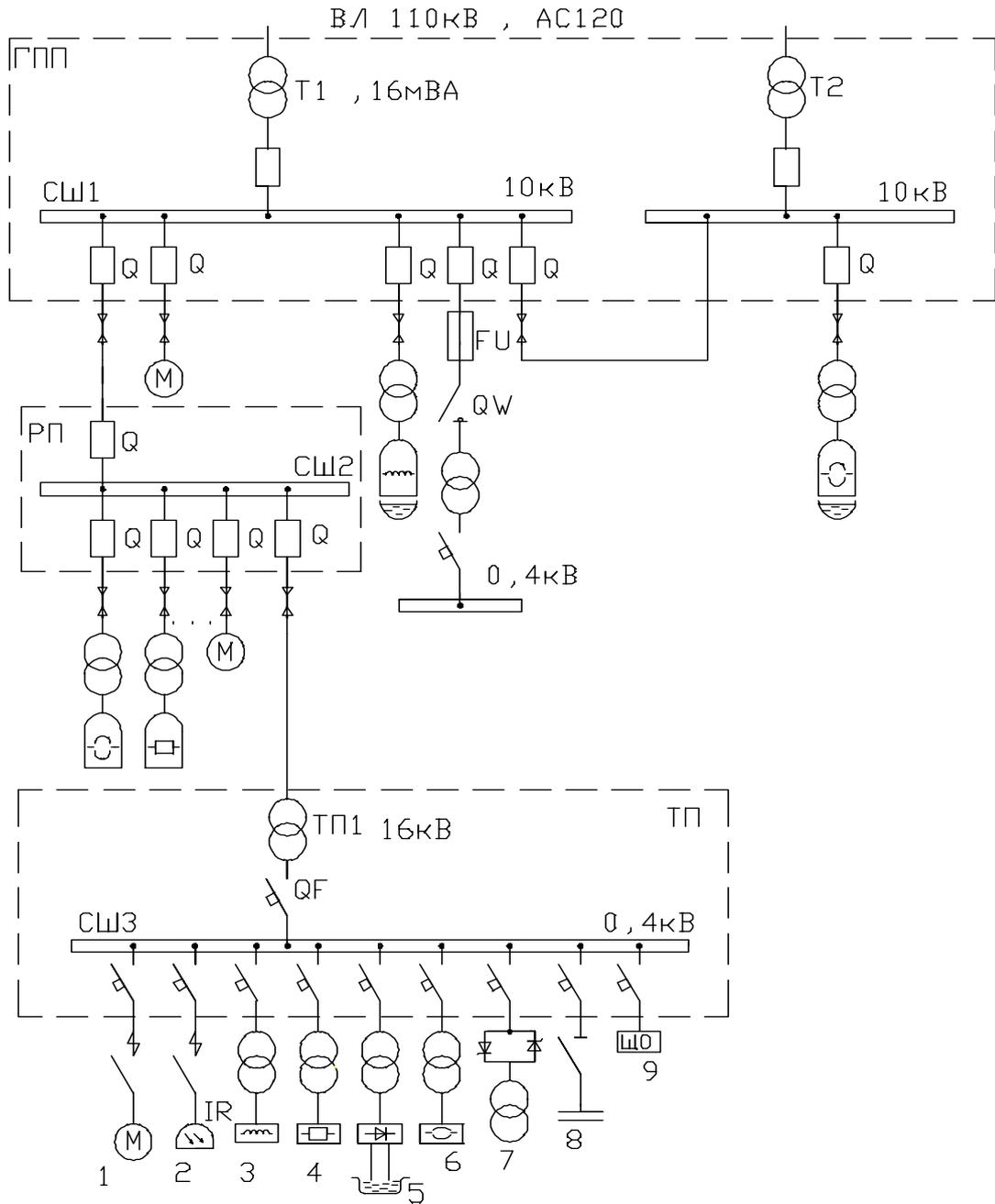
3. Принципиальная схема, облегчает понимание принципа действия электрической схемы во всех подробностях и дает исходный материал для составления спецификаций и заявок на основное оборудование. Для составления схем соединений монтажных схем, для разработки конструктивных (конструкционных) узлов схемы. На принципиальной схеме изображаются все элементы и устройства, необходимые для осуществления и контроля технических процессов. Элементы изображаются в соответствии с УГО. Электрические аппараты показываются на схемах в отключенном положении. принципиальная схема изображается либо в однолинейном, либо в многолинейном положении.

Многолинейное изображение - это когда каждая электрическая цепь изображается отдельной линией и элементы - отдельным УГО.

Однолинейное изображение - в этом случае цепи, выполняющие одинаковые функции изображаются одной линией, а одинаковые элементы в цепях - одним УГО.

Однолинейные изображения рекомендуются для упрощения начертания схемы с большим числом линий связи.

Однолинейная принципиальная схема заводской электрической цепи и схема подключения электрического приемника.



T - трансформатор
 Q - масляный выключатель, высокого напряжения.

▽
 ▽ Кабельная линия.

Сборная шина - это коммутационный узел электрической установки (подстанции) в которой происходит распределение электрической энергии между цепями одного направления.

Электроприёмники :

1. **Электропривод** - это электрическая установка, предназначенная для преобразования электрической энергии в механическую (вращение вала).

2. Установка инфракрасного нагрева (в быту это камин, в промышленности - это электрическая установка для преобразования электрической энергии в энергию электромагнитного излучения в инфракрасной области спектра:

$$\lambda = 0,8 \div 4 \text{ мкм, Infrared.}$$

3. Установка индукционного нагрева (установка для преобразования электрической энергии в тепловую).

4. Установка нагрева методом электрического сопротивления (преобразование электрической энергии в тепловую).

5. Электролизная установка (преобразование электрической энергии в химическую энергию).

6. Электросварочная установка (дуговые сварки), установка, предназначенная для соединения и разъединения деталей.

7. Установка контактной сварки, установка предназначенная для соединения деталей за счет контактного сопротивления.

8. Конденсаторная установка. Установка для компенсации реактивной энергии.

9. Щит освещения для питания осветительных установок, где электрическая энергия преобразуется в световую энергию видимого излучения.

$$\lambda = 0.38 \div 0.78 \text{ мкм.}$$

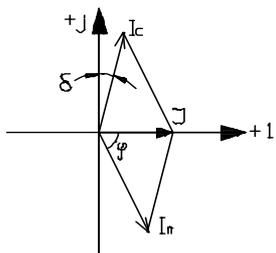
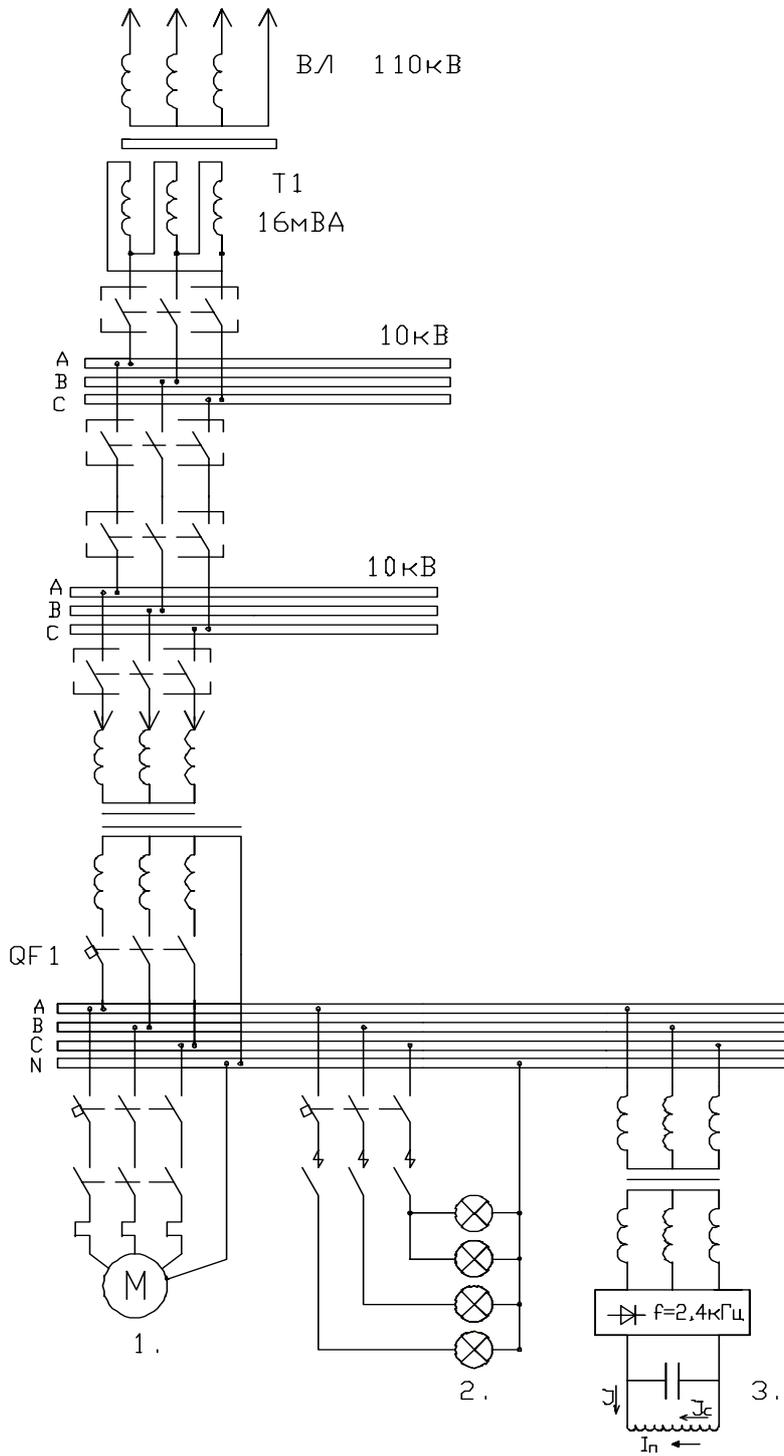
QW - выключатель нагрузки

QF - автоматический воздушный выключатель

Установки со 2 по 7 называются электротехнологическими установками.

Электротехнологическая установка - это технологическая установка, принципиальное действие которой основано на использовании энергии электрического тока, подводимой непосредственно в зону обработки и преобразуемой там в другие виды энергии (тепловую, химическую, механическую).

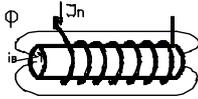
Многолинейная принципиальная электрическая схема заводской электрической сети и схема подключения электрических приемников (фрагмент).



$$\downarrow \Delta P = I^2 \times R_{\text{ЛС}} \downarrow$$

Для передачи такого большого тока требуется большое сечение проводника, чтобы уменьшить потери.

Принцип действия установки индукционного нагрева.



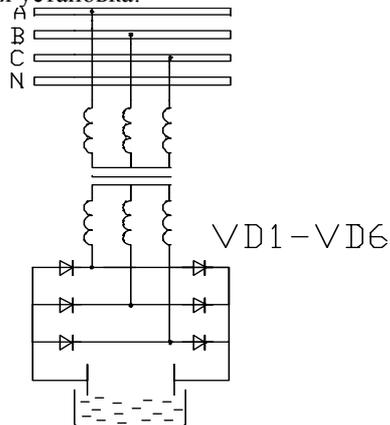
Согласно закону электромагнитной индукции в заготовке индуцируются ЭДС, прямо пропорциональные скорости изменения поля.

Под действием ЭДС согласно закону Ома в заготовке протекает ток $i_{\text{в}} = e / z$. При протекании тока согласно закону Джоуля-Ленца происходит преобразование электрической энергии в тепловую. Ток протекая по любому телу нагревает его.

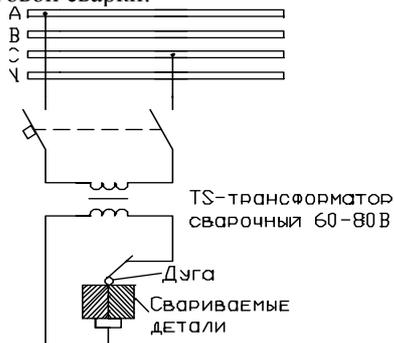
$$W = I^2 * R * t ; W_{\text{в}} = I_{\text{в}}^2 * t$$

4. Печь сопротивления. Схема подключения аналогична подключению схемы установки инфракрасного нагрева.

5. Электролизная установка:

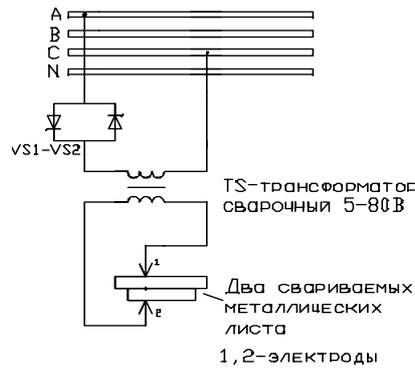


6. Установка дуговой сварки:



Температура столба дуги 7000-8000 К.

7. Машина контактной сварки:



Ток проходя через электроды детали преобразуется в тепловую энергию в месте контактного соединения (согласно закону Джоуля-Ленца).

$$W_Q = I^2 R_{KC} t_{\text{СВАРКИ}}$$

W_Q - тепловая энергия,

R_{KC} - контактное сопротивление.

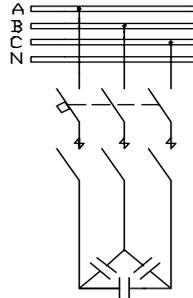
$t_{\text{св}} = 0.01 - 1 \text{ с.}$

Эффективность установки контактной сварки, будет зависеть от того насколько сопротивление контакта будет больше сопротивления подводящей сети.

$$\eta = \frac{W_{KC}}{W_{KC} + W_{\text{ПС}}} = \frac{1}{1 + \frac{R_{\text{ПС}}}{R_{KC}}}$$

Работа тиристорного контактора: тиристорный контактор предназначен для создания небольших длительностей протекания тока и обеспечение высокой коммутационной износостойкостью.

8. Конденсаторная установка.



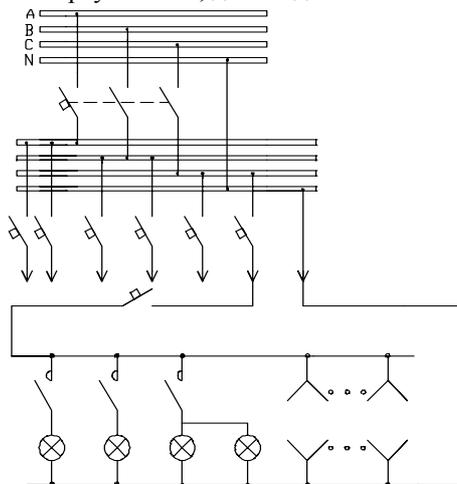
Предназначена для компенсации реактивной энергии группы электроприемников.

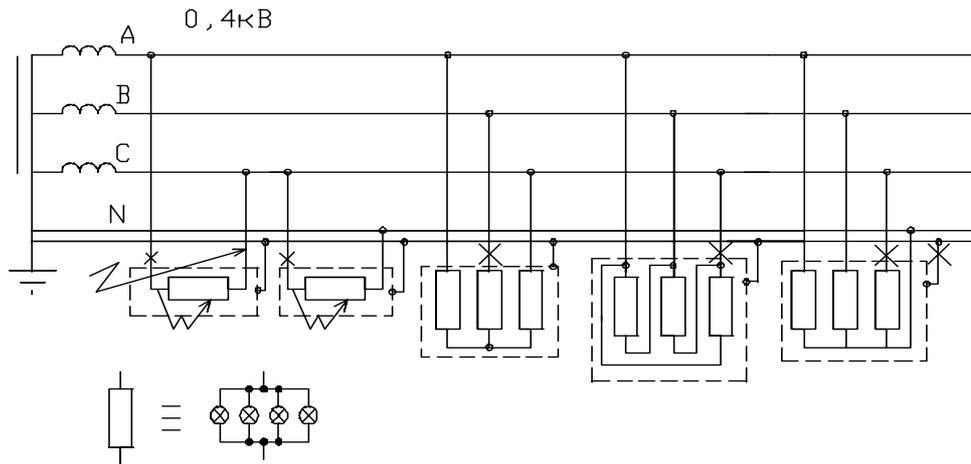
Принцип действия смотри в индукционных установках.

Конденсаторные батареи соединяются в треугольник, для создания большего реактивного тока.

9. ЩО (распределительный щит).

Нормальные и аварийные режимы цеховой электрической сети и электрических приемников.





Нормальные режимы - когда все электрические приемники подключены по нормальным схемам.

В большинстве современных сетей пятого проводника нет.

В этом случае протекают нормальные токи. Величина этих токов определяется по закону Ома.

$$J = \frac{U_{\text{ПР}}}{Z}$$

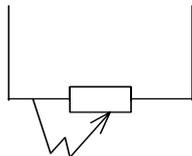
Аварийные режимы возникают при коротком замыкании, витковых замыканиях и обрывах.

1) **Короткое замыкание** - это такое замыкание, когда электрический приемник шунтируется "накоротко". В этом случае ток будет ограничиваться только сопротивлением проводников:

$$J = \frac{U}{Z_{\text{ПР}}}$$

При замыкании на корпус ток короткого замыкания протекает под действием фазного напряжения. Электрический ток также будет определяться сопротивлением фазного и нулевого проводника.

2) **Витковое замыкание** - это замыкание исключающее из схемы часть сопротивления нагрузки, что также увеличивает ток в электрической цепи.



3) **Обрывы (X)**.

При обрывах в цепях электрических двигателей ток в цепях, оставшийся в работе увеличивается.

Резюме : аварийный режим как правило сопровождается увеличением тока по сравнению с нормальным режимом. Увеличение тока приводит к повышенному нагреву проводников (согласно закону Джоуля-Ленца). Под действием этого нагрева происходит разрушение изоляции. Возникают большие ЭДУ, под действием которых возникает разрушение электрических аппаратов и сетей. Поэтому электроприемник и электрические сети требуют защиты от токов при аварийных режимах, которая осуществляется за счет быстрого отключения поврежденного участка от источника питания. Наиболее часто эта защита выполняется в виде автоматических выключателей и предохранителей.

Обрывы ведут к незначительному увеличению тока и отключение происходит спустя некоторое время с помощью тепловых реле.

Замыкание на корпус всегда должны отключаться мгновенно при помощи выключателей, предохранителей и устройств защитного отключения. Это связано с тем, что с корпусом может соприкасаться человек (персонал), который может оказаться под напряжением.

Основы теории электрических аппаратов.

Электродинамические усилия в электрических аппаратах.

(Чунихин стр.31-58)

Физическое силовое воздействие в электрических аппаратах основано на силе Лоренца. Эта сила, которая оказывает магнитное поле на движущиеся в нем электрические заряд.

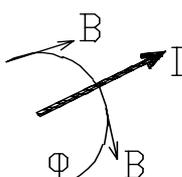
$$F = q [\dot{V} \times \dot{B}]$$

Поскольку электрический заряд в проводниках связан с кристаллической решеткой, то это силовое воздействие передается на весь провод. И для случая с проводниками эта сила называется силой Ампера.

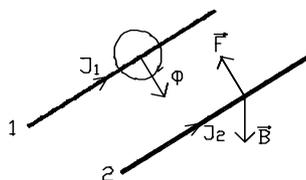
$$dF = I [d\dot{l} \times \dot{B}]$$

$d\dot{l}$ - вектор численно равный элементу проводника и направленный в ту же сторону, что и вектор плоскости тока.

Направление вектора индуктивности B определяется по правилу буравчика.

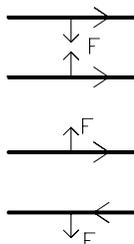


Направление силы определяется по правилу левой руки. Вектор \dot{B} входит в ладонь, четыре пальца направлены вдоль тока, большой отогнутый палец покажет направление силы.



Какое силовое воздействие оказывает первый проводник на второй проводник:

- Определяем направление \dot{B} .
- Определение направления силы. проводники притягиваются.



Эти силы действуют в электрических аппаратах всегда, но в аварийном режиме, когда возникают большие токи и большие магнитные потоки эти силы могут достигать таких значений, что способны изменить геометрию проводника, т.е. разрушить электрический аппарат. Способность электрических аппаратов противостоять ЭДУ (электродинамические усилия) называется электродинамической стойкостью. Данная характеристика приводится в технических характеристиках электрических аппаратов в виде квадрата амплитуды тока i_y^2 . В процессе проектирования каждый аппарат рассчитывается на ЭДУ.

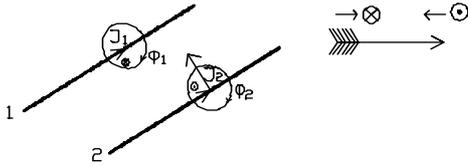
Способы расчета электродинамических усилий:

- На основе взаимодействия электромагнитного поля и тока, по формуле Ампера. По закону Био-Савара-Лапласа только для простых контуров.
- На основе изменения электромагнитной энергии проводника с током. Для сложных контуров.

Из второго способа следствие:

Для определения направления ЭДУ:

Электромагнитная сила всегда направлена в сторону ослабленного электромагнитного поля.



ЭДУ между проводниками.

$$F = i_1 * i_2 * K_k * K_f * \mu_0 / 4\pi$$

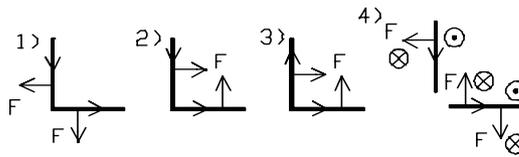
$$\mu = 4 * \pi * 10^{-7} \text{ ГН/м}$$

K_k - коэффициент контура, зависит от взаимного расположения проводников

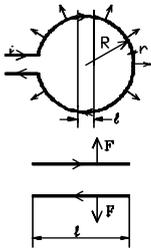
$$K_k = 2 \ln \frac{1}{a}$$

K_f - коэффициент формы, определяется размерами проводника, $K_f=1$ в данном случае.

Направление силы определяется по правилу правой руки.



ЭДУ в кольцевом витке и между кольцевыми витками.



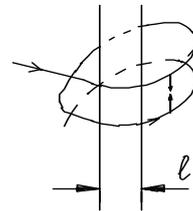
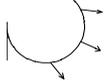
Выделили элемент из этого кольцевого витка.

Любой кольцевой виток стремится разорваться.

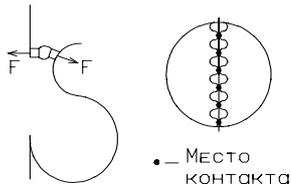
r - радиус провода.

Витки притягиваются друг к другу, поэтому катушка сжимается и разбухает в стороны, а не разрывается.

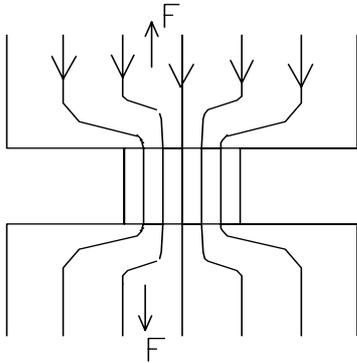
$$F = 10^{-7} \times i^2 \left(\ln \frac{8 \times R}{r} - 0,75 \right)$$



ЭДУ в проводниках переменного сечения.



Контактирование происходит не по всей поверхности в силу неровности.



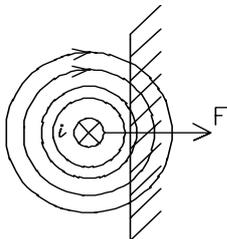
Горизонтальные силы компенсируются а вертикальные будут направлены в разные стороны.

Контакт электрический (любой) всегда стремится саморазорваться , это незаметно при малых токах.

ЭДУ между проводником с током и ферромагнитные массы.

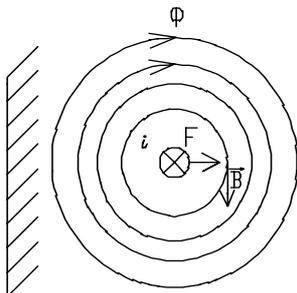
Рассмотрим три случая:

Первый случай:



Магнитное поле между проводником с током и ферромагнитной массой ослаблено.

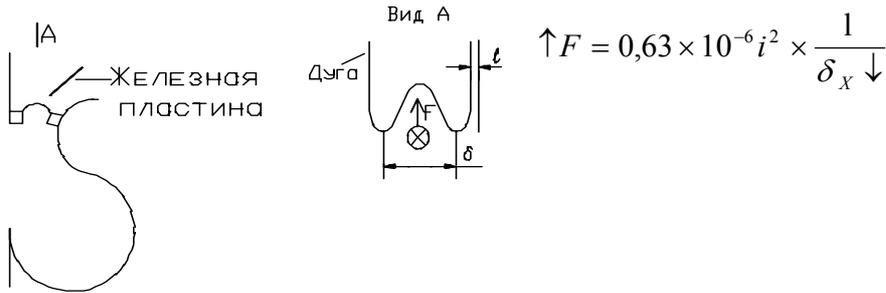
Второй случай:



Проводник с током внутри ферромагнитной массы.

Поле между проводником с током и границей с ферромагнитной массой усилено. Сила будет стремиться затягивать проводник с током внутрь ферромагнитной массы.

Третий случай:



Используют для затягивания и удержания дуги в дугогасительную камеру.

ЭДУ при переменном токе.

Все вышеперечисленное справедливо и для переменного тока, только сила, возникающая при этом будет иметь переменное значение во времени, но не в пространстве.

Рассмотрим это более подробно.

$$i = J_m \times \text{SIN} \omega \times t$$

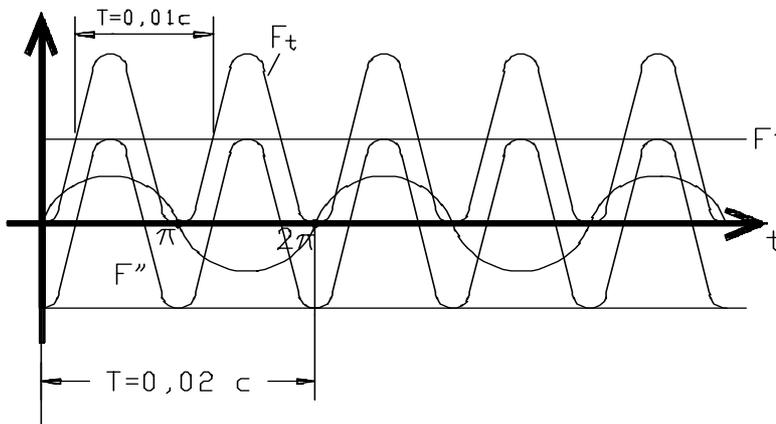
$$F_t = \frac{\mu_0}{4\pi} \times i^2 K_K = C \times i^2 = J_m^2 \text{SIN}^2 \omega \times t$$

$$\text{SIN}^2 \omega \times t = \frac{1 - \text{COS} 2 \times \omega \times t}{2}$$

$$F_t = \frac{C \times I_m^2}{2} - \frac{C \times I_m^2}{2} \text{COS} 2 \times \omega \times t = F' - F' \times \text{COS} 2 \times \omega \times t$$

На переменном токе сила состоит из двух составляющих:

- 1) Из постоянной составляющей
- 2) Переменной составляющей, изменяющейся во времени с удвоенной частотой, и с той же амплитудой F' , что и постоянная составляющая.



Выводы:

- 1) Сила изменяется с двойной частотой.
- 2) В момент перехода тока через ноль сила снижается до нуля.

$$F_m = 2 \times F' = 2 \times \frac{\mu_0}{4\pi} \times K_K \times I_m^2$$

$$I_m = \sqrt{2} \times I$$

При коротком замыкании в первый полупериод возникает ударное значение тока.

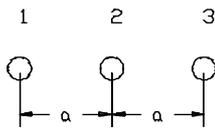
$$i_y = K_y \times \sqrt{2} \times I$$

$$F_{MAX} = C \times i_y^2 = 6,48 \times \frac{\mu_0}{4\pi} \times K_K \times I^2$$

При коротком замыкании возникает ударная сила, которая в 6,48 раз превышает значение на постоянном токе.

Трехфазный ток.

Рассмотрим три проводника, идущие параллельно.



Токи в проводниках сдвинуты на 120° . На проводник 2 оказывает силовое воздействие проводник 1 и проводник 3 и это силовое воздействие будет максимальным:

$$F_{1+3/2} = 0,866 \times \frac{\mu_0}{4\pi} \times K_K \times I_m^2$$

На переменном трехфазном токе ЭДУ меньше, чем на переменном однофазном.

Механический резонанс.

Механический резонанс возникает при совпадении частоты изменения электродинамической силы (100 Гц) с собственной частотой колебания механической системы.

В этом случае деформация механической системы с каждым периодом будет возрастать и в какой-то момент механическая система разрушится (шина оторвется от изолятора). Делают, чтобы частота системы была ниже, чем частота сети.

Нагрев электрических аппаратов.

(Чунихин стр.58-88)

Источники тепловой энергии в электрических аппаратах:

1) Нагрев проводников с током, обычно он называется нагревом методом электрического сопротивления.

$$W_Q = I^2 \cdot R \cdot t \quad - \text{закон Джоуля - Ленца.}$$

Закон Джоуля - Ленца гласит, что в любом теле, обладающем электрическим сопротивлением, выделяется тепловая энергия пропорциональная квадрату тока, сопротивления электрического тела и времени протекания тока.

$$\text{На постоянном токе} - R_{\omega} = \rho \cdot \frac{l}{S}$$

$$\text{На переменном токе} - R_{\omega} = R_{\omega} \cdot K_D$$

$$K_D = K_{\Pi} \cdot K_B$$

K_D - Коэффициент добавочных потерь.

K_{Π} - коэффициент поверхностного эффекта

K_B - коэффициент близости.

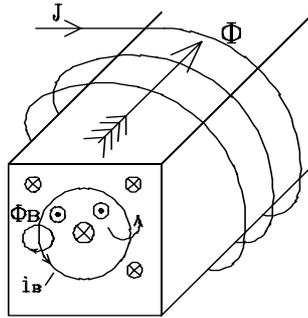
Данная энергия идет на нагрев самого аппарата (токоведущих частей), нагрев прилегающих материалов и нагрев окружающей среды по законам теплопередачи (теплопроводности, конвекции и теплового излучения).

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

1. Магнитопроводы, предназначенные для усиления магнитного поля, создаваемого проводником с током.

Причина нагрева:

Рассмотрим элемент магнитопровода.



При прохождении переменного магнитного потока по магнитопроводу в нем появляется ЭДС согласно закону электромагнитной индукции:

$$e = - \frac{d\Psi}{dt}$$

Под действием этой ЭДС появляется ток, который называется вихревым, такого направления при котором создаваемые им магнитные потоки противодействуют изменению основного магнитного потока (правило Ленца).

При протекании вихревых токов по магнитопроводу согласно закону Джоуля - Ленца происходит преобразование электрической энергии в тепловую.

Для уменьшения потерь данного вида магнитопроводы выполняются шифтованными из пластин электротехнической стали толщиной 0,2 ÷ 0,5 мм, тщательно изолированных друг от друга. Этим самым исключается контур протекания вихревого тока.

Потери на гистерезис - это энергия затраченная на поворот доменов.

Полные потери в магнитопроводе вычисляются по формуле:

$$P_{ж} = (K_{Г} \times B_m^{1,6} + K_{В} \times f \times B_m^2) \times f \times G_T$$

$P_{ж}$ - мощность железа

$K_{Г} = 1,9 \div 2,6$ - коэффициент потерь на гистерезис ;

$K_{В} = 0,4 \div 1,2$ - коэффициент потерь на вихревые токи;

f - частота сети;

B_m - амплитуда вектора магнитной индукции;

G_T - масса магнитопровода [кг].

2. Потери в конструкциях аппарата.

Выделение энергии в стали происходит по той же схеме, что и в магнитопроводе.

Для снижения потерь используются следующие мероприятия:

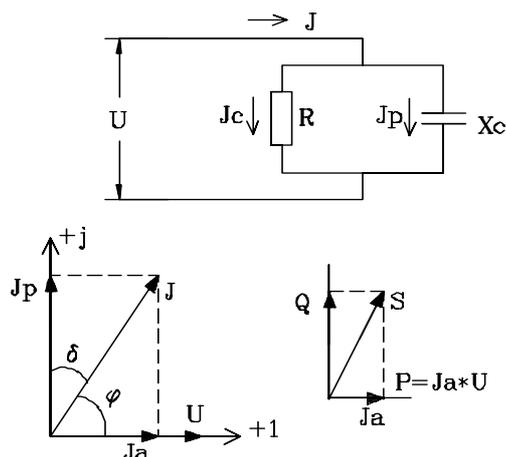
а) Введение немагнитных зазоров на пути магнитного потока.

б) За счет надевания на стальные конструкции коротко замкнутого витка с малым активным сопротивлением. При этом в нем индуцируется ЭДС, протекает ток, от которого возникают магнитные потоки, направленные встречно основному.

в) При токах выше 1000 А не должно быть стальных деталей, а все детали должны быть изготовлены из немагнитных материалов (алюминий, бронза, немагнитные чугуны, пластмассы).

3) Выделение энергии в диэлектрике.

Изоляция моделируется следующей схемой замещения :



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

$$\frac{1}{\omega \times C} = \frac{1}{2 \times \pi \times f \times C}$$

C - ёмкость изоляции ; $\operatorname{tg}(\delta) = 0,005 \div 0,0001$

Появление дефектов в отдельных местах изоляции (при этом снижается $\operatorname{tg} \delta$) возникает местное тепловое выделение, которые способны вызвать тепловой пробой изоляции (изоляция обугливается и становится проводящей).

4) Другие виды источников теплоты в электрических аппаратах:

а) Энергия выделяемая в электрических дугах. У коммутационных аппаратов особенно при частых включениях, отключениях.

б) При трении между собой отдельных элементов электрических аппаратов.

Нагрев электрических аппаратов вызывает ускоренное старение изоляции и повышает скорость окисления электрических контактов, что в конечном итоге снижает срок службы электрического аппарата.

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

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

1. Нагрев самого проводника
2. Нагрев окружающей среды.

Уравнение теплового баланса в дифференциальной форме :

$$P \times dt = C \times G \times d\tau + F \times K_T \times C \times dt \quad (*)$$

C - удельная теплоемкость [Дж/кг×град]

G - масса проводника [кг]

F - поверхность проводника, т.е. поверхность теплоотдачи [M²]

K_T - коэффициент теплоотдачи [Вт/м² ×град]

Коэффициент теплоотдачи определяет то количество теплоты, которое отдается за 1с всеми видами теплопередачи с 1м² теплоотдающей поверхности при разности температуры нагретого тела и окружающего пространства в 1°С

K_T = 10 ÷ 16 на воздухе

K_T = 25 ÷ 100 в масле.

$$\tau = \Theta_{\text{ПРОВ.}} - \Theta_{\text{ОКР.СР.}}$$

τ - это превышение температуры проводника над температурой окружающей среды эта величина переменная (различна для каждого момента времени при нагреве)

$d\tau$ - приращение данного превышения за время dt .

Разделим каждый член уравнения (*) на $C \times G \times dt$

$$\frac{P}{C \times G} = \frac{d\tau}{dt} + \tau \times \frac{F \times K_T}{C \times G}$$

$$const = \tau' + \tau$$

Решение этого уравнения известно из математики.

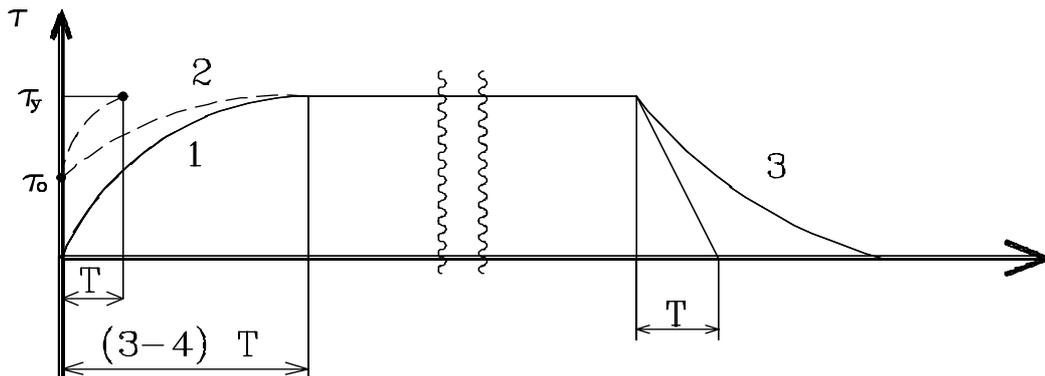
τ_0 - превышение температуры проводника над температурой окружающей среды в начале процесса нагрева при $t = 0$.

τ_y - установившееся превышение температуры. Ищется из уравнения теплового баланса поскольку в установившемся режиме $d\tau = 0$. Тогда :

$$\tau_y = \frac{P \times dt}{K_T \times F \times dt} = \frac{P}{K_T \times F}$$

T - постоянная времени нагрева

$T = \frac{C \times G}{K_T \times F}$ [с] - это время, за которое нагревался бы проводник до значения $\Theta_{уст}$ (установившееся температура), если бы отдачи тепла в окружающую среду не было.



В установившемся режиме все выделяемое тепло отдается в окружающую среду. В обоих случаях нагрева нагрев до установившейся температуры происходит за одно и то же время, изменяется лишь скорость нагрева.

$$\tau = \tau_0 \times e^{-t/T} + \tau_y \times (1 - e^{-t/T})$$

T - всегда может быть рассчитана.

Если время нагрева не превышает $0.1 \times T$ ($t_{нагр.} < 0.1 \times T$), то потерями в окружающей среде пренебрегают.

Чем больше T , тем медленнее нагревается проводник.

Охлаждение проводника.

Допустим ток, протекающий по проводнику прекратился :

$$Pdt = 0 \quad 0 = C \times G \times dt + F \times K_T \times \tau \times dt$$

$$\tau = \tau_0 \times e^{-t/T}$$

При $\tau_0 = \tau_y$ кривая охлаждения является зеркальным отображением кривой нагревания.

Каждый электрический аппарат имеет какую-то свою допустимую температуру.

$$\text{т.е. } \Theta_{\text{доп}} - \Theta_{\text{ОПР.СР}} = \tau_y = \frac{P}{K_T \times F} = \frac{I^2 \times R}{K_T \times F}$$

K_T - коэффициент теплоотдачи

F - поверхность, с которой испускается тепло.

$$I_{\text{доп}} = \sqrt{F \times K_T \times \frac{\Theta_{\text{УСТ}} - \Theta_{\text{ОКТ.СР}}}{R}}$$

$I_{\text{доп}}$ - ток, который допустимо пропускать по проводнику, кабелю, электрическому аппарату.. При этом температура аппарата (кабеля, провода) не превышает допустимое значение. Такой ток называется длительно допустимым.

Для электрических аппаратов этот ток как правило называется **НОМИНАЛЬНЫМ**, это ток, длительное протекание которого не вызывает нагрева электрического аппарата сверх допустимой температуры.

Проанализируем формулу на основе проводника с током.

- 1) При уменьшении сопротивления, ток увеличивается ($R \downarrow$, $I \uparrow$).
- 2) Если увеличить сечение проводника, то поверхность охлаждения увеличится, то увеличится и ток ($F \uparrow$, $I \uparrow$).
- 3) Увеличить коэффициент теплоотдачи, например закопать в землю или создать систему искусственного охлаждения ($K_T \uparrow$, $I \uparrow$).
- 4) Увеличить $\Theta_{\text{доп}}$ за счет использования другого класса изоляции ($\Theta_{\text{доп}} \uparrow$, $I \uparrow$).
- 5) Снизить $\Theta_{\text{ОПР.СР}}$ (температуру окружающей среды), например поместить в жидкий азот ($\Theta_{\text{ОПР.СР}} \downarrow$, $I \uparrow$).

Нагрев аппаратов при коротком замыкании.

$\Theta_{\text{доп}}$ для режима короткого замыкания обычно принимаются:

$$\Theta_{\text{доп.кз}} = (2 \div 4) \Theta_{\text{доп}}$$

Причина этого, то, что К.З. возникают довольно редко и на непродолжительный отрезок времени. В практике пользуются понятием термическая устойчивость.

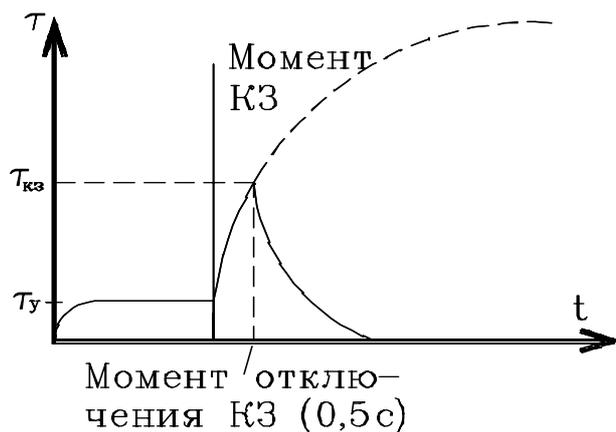
Термическая устойчивость - это способность электрических аппаратов не переходить в состояние отказа при протекании тока определённой величины и длительности без превышения $\Theta_{\text{доп.кз}}$.

В справочниках приводится величина B - тепловой импульс:

$$B = I^2 \times t$$

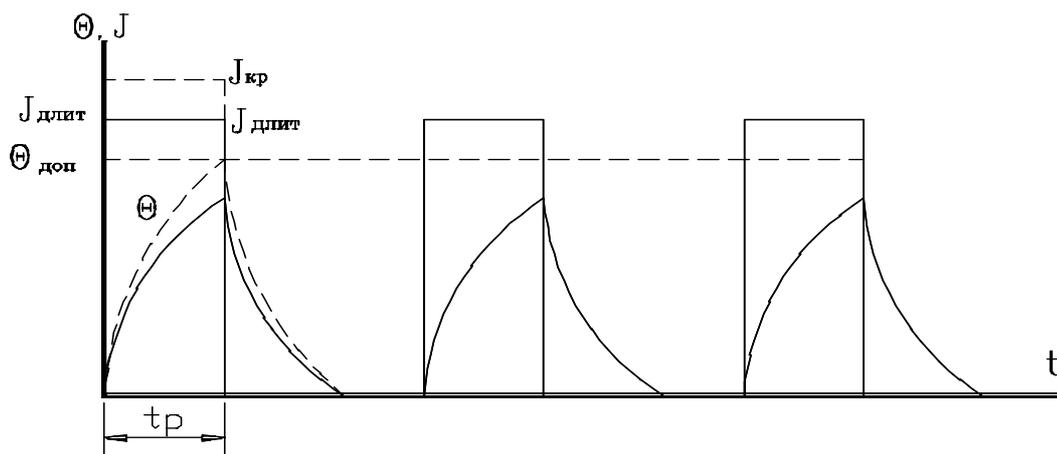
Зная эту величину и время действия защиты можно рассчитать ток, который способен пропустить данный электрический аппарат в режиме К.З.

$$I_{\text{доп.кз}} = \sqrt{\frac{B}{t}}$$



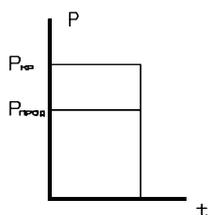
Нагрев электрического аппарата в кратковременном режиме.

Кратковременным режимом - это режим, когда температура электрического аппарата не достигает своего установившегося значения и в период пауз тока температура электрического аппарата успевает снизиться до температуры окружающей Среды.



Температура аппарата не достигает максимального значений, и если режим работы именно такой, то мы можем перегрузить аппарат таким образом, чтобы температура $\Theta_{\text{доп}}$ была достигнута за время работы.

Если перейти к графику мощности :



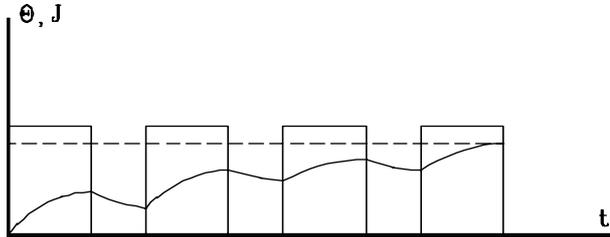
$$\text{Коэффициент перегрузки по мощности : } K_p = \frac{P_{\text{кр}}}{P_{\text{сред}}} = \frac{\tau_{\text{max}}}{\tau_{\text{доп}}} = \frac{1}{1 - e^{-\frac{t_p}{T}}} > 1$$

Коэффициент перегрузки по току :

$$K_I = \sqrt{K_P}$$

Нагрев электрических аппаратов в повторно - кратковременном режиме.

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



Очень характерной величиной является ПВ - понятие продолжительного включения.

$$ПВ = \frac{t_{\Pi}}{t_p + t_{\Pi}} \quad \text{Отношение времени работы электрического аппарата к времени цикла}$$

В данном режиме электрический аппарат тоже можно перегрузить.

$$K_P = \frac{P_{KP}}{P_{\Delta\Delta UT}} = \frac{\tau_{MAX}}{\tau_y} = \frac{1 - e^{-\frac{t_p + t_{\Pi}}{T}}}{1 - e^{-\frac{t_p}{T}}} > 1$$

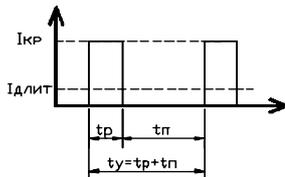
$$K_I = \sqrt{K_P} = \frac{I_{KP}}{I_{\Delta\Delta UT}}$$

ПВ является паспортной величиной электрического аппарата работающего в кратковременном и повторно - кратковременном режиме.

Связь между кратковременным и длительным режимами осуществляются так (на основе закона сохранения энергии) :

$$I_{кр}^2 \times R \times t_p = I_{длит}^2 \times R \times t_{длит}$$

Для составления этого уравнения для закона сохранения энергии возьмём отрезок времени равный времени цикла.



$$t_{цикла} = t_{дл} = t_p + t_{\Pi}$$

Т.к. аппарат один и тот же в уравнении сокращаем R. Выразим значение тока и подставим значение ПВ :

$$I_{длит} = I_{кр} \sqrt{ПВ}$$

Часто в паспорте ПВ задается в % : $I_{длит} = \sqrt{\frac{ПВ\%}{100}}$

Пример: ПВ = 40% ; Iкр = 10А

$$I_{кр} = \frac{I_{длит}}{\sqrt{ПВ_{зад}}} \quad \text{ПВ}_{зад} - \text{это та которую мы задаем сами.}$$

Состоит из длительного и ПКР (повторно-кратковременный режим).

Электрические контакты.

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

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

Классификация :

1. По возможности перемещению контактирующих деталей.

а) **Разборный контакт (контактное соединение)** - это конструктивный узел, предназначенный только для проведения электрического тока, но не предназначенный для коммутации (болтовое соединение "шин", присоединение проводника к зажиму).

б) **Коммутирующие контакты** - это конструктивный узел, предназначенный для коммутации электрической сети (выключатель, контактор рубильник).

в) **Скользящие контакты** - разновидность коммутирующего контакта, у которого одна деталь скользит относительно другой, но электрический контакт при этом не нарушается (контакты реостата, щеточный контакт, шарнирный контакт, проскальзывающий контакт).

2. По форме контактирования.

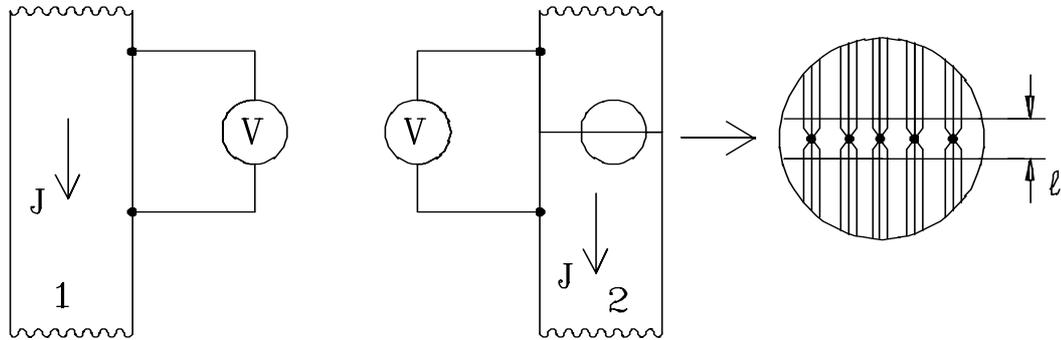
а) **Точечный контакт** (контакт в одной физической площадке: сфера-сфера, сфера-плос-конус, конус-плоскость).

б) **Линейный контакт** - условное контактирование происходит по линии (ролик-плоскость).

в) **Поверхностный контакт** - условное контактирование по поверхности.

Переходное сопротивление электрического контакта.

Возьмем проводник с током и подключим вольтметр потом разорвём и опять подключим вольтметр



$$\Delta U_1 = I \times R_1 \quad \Delta U_2 = I \times R_2$$

$$\Delta U_2 - \Delta U_1 = I \times (R_2 - R_1) \quad R_2 - R_1 = \Delta R$$

ΔR - R_K - контактное сопротивление.

Если под микроскопом взглянуть, то видно, что контакт осуществляется по микровыступам.

Существует две причины возникновения контактного сопротивления:

- 1) Резкое уменьшение сечения проводника в месте контактирования (засчет микровыступов)
- 2) Образование на контакте окисных пленок, удельное сопротивление ρ которых обычно выше, чем ρ основного металла.

Контактное сопротивление определяется следующей зависимостью :

$$R_K = \varepsilon / p^n$$

ε - величина, зависящая от материала, способа его обработки, состояния контактирующей поверхности.

p - сила, сжимающая эти контакты. n - показатель степени, характеризующий число точек соприкосновения:

0.5 - для точечного контакта

0.7 - для линейного контакта

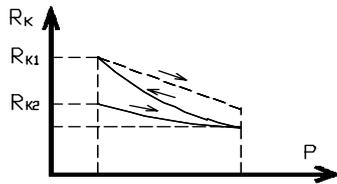
1 - для поверхностного контакта

Значения для ε :

Материал	$\varepsilon \cdot 10^{-3} \left[\frac{OM}{\sqrt{H}} \right]$
медь	1
серебро	0,5
олово	5
алюминий	1,6
сталь	76

Выводы :

1. Контактное соединение зависит от материала и его окисла.
2. Контактное соединение зависит от контактного нажатия.
3. Контактное соединение зависит от состояния контактной поверхности.



4. От условной площадки контактирования. Если будем увеличивать площадь контакта, то будет увеличиваться число физических точек контактирования. Поскольку в пределе $n = 1$, то нет особого смысла увеличивать поверхность соприкосновения контакта.

Часто поверхность соприкосновения выбирается вследствие эффективного рассеивания тепловой мощности, выделяемой в контактах.

$$P_{\text{тепл}} = I^2 \times R_{\text{к}}$$

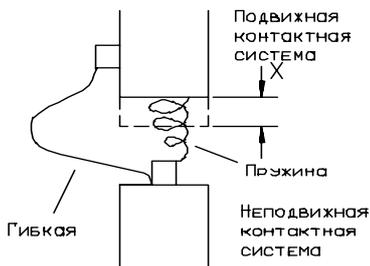
Явление спекания (сваривания) контактов во включенном состоянии.

При прохождении тока в площадке контактирования согласно закону Джоуля-Ленца будет выделяться тепловая энергия.

$$W_{\text{контакта}} = I^2 \times R_{\text{к}} \times t$$

Вследствие нагрева контакта, он еще в большей степени окисляется. Это приведет к увеличению контактного сопротивления $R_{\text{к}}$ и приведет к увеличению энергии, выделяемой в контакте $W_{\text{к}}$. Ток определяется нагрузкой, он постоянный. Процесс может стать лавинообразным и при некоторой температуре на поверхности образуется слой жидкого металла. Контактное сопротивление резко уменьшается, энергия выделяемая тоже резко уменьшается. Металл охлаждается и кристаллизуется (затвердевает). Это явление является отрицательным для коммутирующих контактов. Для борьбы с этим явлением используется понятие - провал контактов, т.е. сжатие контактов при помощи контактной пружины.

Провал контактов - это расстояние, на которое перемещается подвижная контактная система после касания контактов (расстояние на которое перемещается контактная система, если неподвижную контактную систему мысленно убрать).



X - провал контакта [мм] - это паспортная техническая величина, обеспечивающая усилие нажатия.

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

Износ контактов. Дребезг.

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

а) Износ при размыкании. Сила сжимающая контакты уменьшается до нуля, резко возрастает контактное сопротивление, возрастает плотность тока в последней площадке контактирования. Вся энергия стала выделяется в этой площадке, она разогревается и расплавляется. И между расходящимися частями контакта образуется мостик жидкого металла (контактный перешеек), этот мостик рвется и в промежутке между контактами возникает электрический разряд.

Два вида разряда:

- 1) Для меди, при токе 0.5 А и напряжении > 15 В возникает дуговой разряд.

2) При токах $< 0.5 \text{ A}$ - искровой разряд.

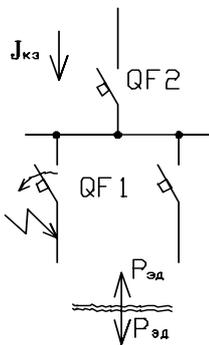
Под действием высокой температуры искры (дуги) часть металла разбрызгивается и выбрасывается из контактного промежутка. При искровом разряде на поверхности контакта образуются лунки и наплывы - эрозия контактов.

б) Износ при замыкании вызван дребезгом контактов.

Дребезг - это отбрасывание подвижной контактной системы за счет упругой деформации неподвижной контактной системы (на расстояние 0.01 - 0.1 мм). Процесс этот идет с затуханием (с затухающей амплитудой). При каждом отбросе возникает электрическая дуга (искра), смотри первый случай, вызывающая износ контактов. Дребезг может быть опасным, когда величина амплитуды колебаний системы превосходит величину упругой деформации системы. При этом происходит разрыв цепи. В противном случае возникает неопасный дребезг. Теоретически дребезга избежать невозможно, поэтому при проектировании электрического аппарата добиваются, чтобы дребезг был неопасным.

Работа контактной системы в условиях короткого замыкания.

В условиях короткого замыкания возникает опасность сваривания контактов, находящихся в замкнутом состоянии за счет электродинамического отброса и увеличение контактного сопротивления.



До момента короткого замыкания ток протекает по обоим выключателям.

Рассмотрим QF2:

В площадке контактирования возникают силы электродинамического отброса, она противодействует контактной пружине, тогда образовавшийся мостик из жидкого металла. QF1 разомкнулся, ток $J_{кз}$ уменьшился, металл стал затвердевать, контакт выключателя QF2 вернулся в исходное положение и металл окончательно затвердел т.е. контакт приварился при протекании тока короткого замыкания.

При сквозных $J_{кз}$ возникает электродинамический отброс, дуга, оплавление и последующее сваривание при возвращении в исходное положение.

Рассмотрим аппарат QF1.

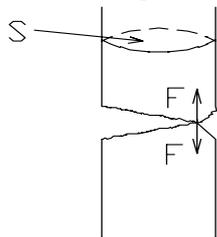
При отключении $J_{кз}$ происходит частичное оплавление и выгорание контактов за счет энергии электрической дуги.

Меры по снижению износа контактов:

1. Применение дугостойких материалов.
2. Используют способы быстрого перемещения дуги по контакту.
3. При помощи способов компенсации электродинамических сил отброса.

Это способы компенсации электродинамических сил в электрических контактах.

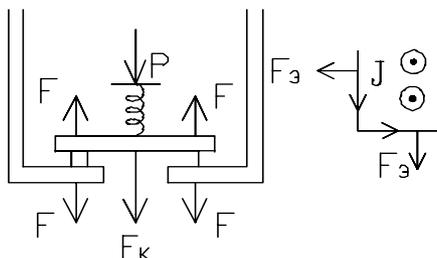
Электродинамические силы отброса возникают вследствие сужения линий тока, при этом возникает продольная сила, направленная внутрь проводника.



$$F = 10^{-7} \times i^2 \times \ln\left(\frac{S}{f_0}\right)$$

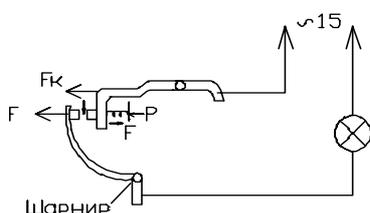
Способы компенсации этой силы имеют также электродинамическую основу.

а) Мостиковый контакт



P - сила контактного нажатия;
 F_k - компенсационная сила.

б) Рычажный контакт



При увеличении электродинамических сил, увеличиваются и F_k , поэтому размыкания не произойдет.

Материалы для контактных соединений.

(Чунихин стр.106-110)

Требования к этим материалам:

1. Высокая электропроводность и теплопроводность.
2. Стойкость против коррозии.
3. Стойкость против образования пленок с высоким ρ .
4. Малая твердость материала, для уменьшения силы нажатия.
5. Высокая твердость для уменьшения механического износа при частых включениях и отключениях.
6. Малая эрозия.
7. Высокая дугостойкость (температура плавления).
8. Высокое значение тока и напряжения, необходимые для дугообразования.
9. Простота обработки и низкая стоимость.

Нет в природе таких материалов.

- 1). Медь удовлетворяет всем пунктам, кроме 2^{го} и 5^{го}.
- 2). Серебро, удовлетворяет всем требованиям за исключением дугостойкости. Используют в качестве накладок на рабочие поверхности из меди.
- 3). Пластина, золото, молибден. Используются на малые токи при малых напряжениях, т.к. не образуют окисных пленок.
- 4). Вольфрам и его сплавы (с молибденом и платиной) используются на малые и большие токи в качестве дугостойкости контактов.
- 5). Металлокерамика - механическая смесь двух практически не сплавляющихся, металлов получаемая методом спекания их порошков или пропиткой одного расплавом другого. Один из материалов имеет большую проводимость, другой обладает механической прочностью, дугостойкостью, тугоплавкостью (серебро, вольфрам, Ag-Ni, Ag-Графит, Ag-окись кадмия, Ag-молибден). Металлокерамика применяется в качестве дугогасительных контактов, в качестве ос-новных основных контактов на токи до 600 А. Алюминий для коммутирующих контактов не используется, применяется только в разборных соединениях, при ормировании его медью или серебром. Применяются также его сплавы.

Основные конструкции контактов.

(Чунихин 110-118)

1. *Неподвижные разборные контакты* для жесткого соединения неразборных деталей. Контакт должен быть надежен, не ослабевать при эксплуатации, контактное сопротивление должно быть линейным.

Рекомендации: 1) Шины соединить при помощи нескольких болтов, увеличение поверхности контактирования.

2) Соединение через переходную пластину. Переходная пластина - это медная фольга, покрытая с обеих сторон легкоплавким металлом.

2. *Подвижные контакты* (неразмыкающиеся контактные соединения). Для передачи тока с подвижного на неподвижный контакт.

Пример: Гибкая связь

1) Медная лента толщиной 0.1 мм.

2) Роликовый съём

3) Шарнирный контакт.

3. *Коммутирующие разрывные контакты* на малые токи делают *одноточечное* контактирование. Причина: чтобы при малых нажатиях получить высокое удельное давление контактов. На токи десятки тысяч ампер контакты делают *многоточечными* и они бывают:

а) Рычажные (проскальзывающие, перекатывающиеся).

б) Мостиковые.

в) Врубные.

г) Торцевые.

д) Розеточные.

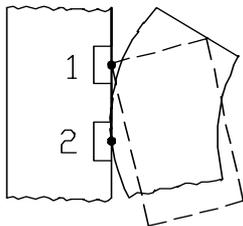
Эти контакты бывают *одноступенчатыми* и *многоступенчатыми*.

В *многоступенчатых* контактах существуют минимум две пары параллельных контактов:

1. Основные или рабочие. Для проведения тока в режиме.

2. Дугогасительные играют основную роль при включении, отключении.

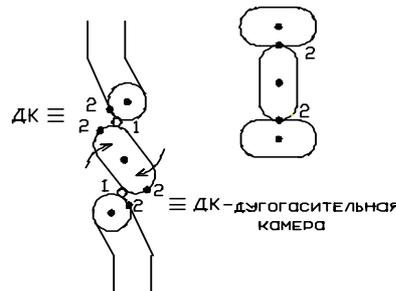
Перекатывающий проскальзывающий контакт.



2 - рабочая точка.

1 - точка первого касания при замыкании и последнего при размыкании.

Контакт группы Шнайдеров
Фирма Merlin Gerlin.



Герметичный контакт

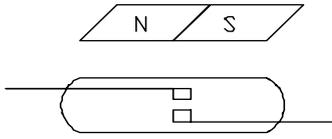
(геркон)

Контакты обычно работают в среде атмосферного воздуха, покрываются пылью, окислами, которые возникают при химических реакциях под воздействием электрической дуги, подвергаются действию агрессивных и воздушных паров. Это понижает надежность контактов, особенно при малых токах и напряжениях когда вообще может прекратиться проводимость. Для предотвращения этого контакт помещают в баллон.

В баллоне : водород , аргон , инертный газ или вакуум с парами при давлении 0.13-0.0013Па .

Контакт управляется магнитами

Такой контакт по характеристикам приближен к бесконтактным устройствам, (трансформаторы) по быстродействию 100Гц с ресурсом $10^7 - 10^9$ включений и отключений (контакт в системе охранной сигнализации).



Недостаток : малая конденсационная мощность - 60 Вт.

Например : герсикон (Герметичный, Силовой, Контакт) рассчитан на 180А с частотой 1200 включений - отключений в час.

Основы теории горения и гашения дуги.

Размыкание электрической цепи ,как правило, всегда сопровождается электрическим разрядом между контактами. Воздушный промежуток на какой-то момент времени ионизируется и становится проводящим. Физический процесс отключения состоит в деионизации т.е. превращение его обратно в диэлектрик. Обычно воздух хороший изолятор (1 см. воздушного промежутка выдерживает 30 кВ.).

Ионизация - процесс отделения от нейтральной частицы одного или нескольких электронов и образование в следствии этого электронов и положительно заряженных частиц (ионов).

Причины образования электрического разряда:

1. При расхождении контактов возрастает контактное сопротивление. Выделяется больше энергии в месте последнего контактирования появляется мостик жидкого металла, он рвется как контакты расходятся, и промежуток ионизируется вследствие термической ионизации и термоэлектронной эмиссии и становится проводящим.

Термическая ионизация - это процесс ионизации под воздействием высоких температур.

Термоэлектронная эмиссия - явление испускания электронов с поверхности накаливания.

2. При расхождении контактов возрастает напряжённость электрического поля между контактами.

$$E = U / X \quad ; \quad X - \text{расстояние.}$$

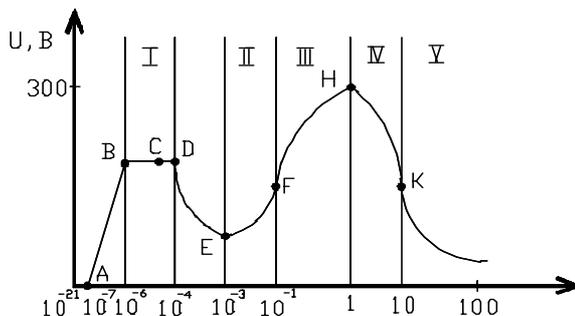
Автоэлектронная эмиссия - это явление испускания электронов под воздействием сильного электрического поля.

3. Под воздействием ионизации толчком. Это приобретение электроном скорости в конце свободного пробега, достаточной для выбивания электрона из нейтральной частицы. Разность потенциалов, необходимая для приобретения скорости, то есть потенциал ионизации : 13 ÷ 16 В для газов, 7,7 В для меди). Одновременно проходят процессы рекомбинации и диффузии.

Рекомбинация - это процесс образования нейтральных частиц.

Диффузия - это процесс выноса заряженных частиц из межэлектронного промежутка в окружающее пространство. Интенсивность гашения дуги будет определяться интенсивностью этих процессов.

Вольт-амперная характеристика газового разряда с металлическими электродами.



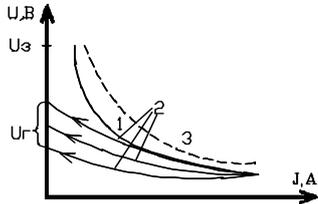
- I - температурный разряд,
II - нормально тлеющий разряд,

- III - аномально тлеющий разряд,
- IV - переходная область - переход от тлеющего разряда к дуговому,
- V - область дугового разряда.

В проводнике первые четыре области не рассматривают.

Вольт - амперная характеристика электрической дуги.

Это зависимость падения напряжения на дуге от тока при постоянной длине и медленном изменении тока (статическая характеристика).



Характеристики 2.

Если мы будем уменьшать ток от значения I_0 до нуля, то характеристика не пойдёт по начальной. Чем быстрее уменьшается ток, тем ниже расположится характеристика. Эти характеристики получили название динамические характеристики. Они показывают, что ионизированное состояние дуги не успевает за изменением электрического тока (хотя ток и упал до нуля ионизированное состояние промежутка изменилось незначительно), т.е. дуга инерционна.

I_0

U_3 - напряжение зажигания дуги ,

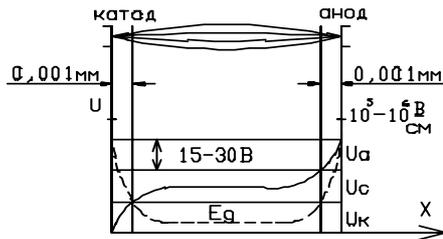
U_r - напряжение гашения дуги.

Для более длинной дуги характеристика пойдёт выше (длина дуги 3 больше длины дуги 1). Для поддержания горения более длинной дуги требуется большее напряжение.

Напряжение на дуге : $U_g = U_3 + E_g l_g$, U_3 - около электродное падение напряжения , $U_3 = U_k + U_a$, U_k - напряжение на катоде, U_a - напряжение на аноде, $E_g l_g$ - падение

напряжения на столбе дуги, E_g - продольный градиент напряжения на створе дуги , $E_g = \frac{dU}{dX}$,

l_g - длина дуги.

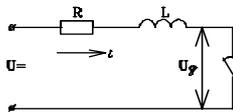


----- - График напряжённости.

Околоэлектродное падение напряжения как правило не зависит от длины дуги.

Условие гашение дуги постоянного тока.

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



Второй закон Кирхгофа :

$$U = U_g + iR + L \frac{di}{dt}$$

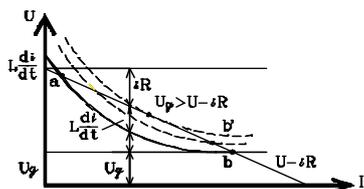
Если дуга горит устойчиво, то изменение тока происходить не будет т.е.

$$L \frac{di}{dt} = 0 \quad \text{т.е.} \quad U = U_g + iR$$

Для погасания дуги необходимо, что бы ток всё время уменьшался т.е. $L \frac{di}{dt} < 0$

и тогда напряжение на дуге будет

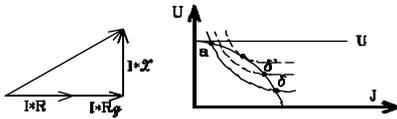
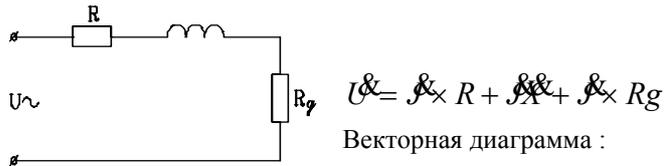
$$U_g > U - iR$$



В точках а и б $L \frac{di}{dt} = 0$, точка б - точка устойчивого горения дуги. $U - iR$ - резистивная характеристика источника питания.

Для погасания дуги необходимо, чтобы вольт-амперная характеристика дуги на всём своём протяжении лежала выше резистивной характеристики источника питания. При расхождении контактов точка б перемещается вверх по вольт-амперной характеристике. В этом случае всегда будет обеспечиваться условие гашения дуги, так как в какой-то момент времени напряжение на дуге будет больше, чем резистивная характеристика.

Условие гашения дуги на переменном токе.



$$U_g = \sqrt{U^2 - I^2 \times X^2} - I \times R$$

Внешняя (резистивная) характеристика - это зависимость напряжения на выходе источника питания от тока нагрузки.

Любое отклонение вправо из точки а приводит в точку б. Любое отклонение влево из точки а приводит к погасанию дуги.

Перенапряжение при гашении дуги постоянного тока.

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

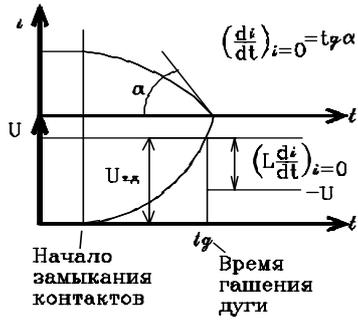
Рассмотрим второй закон Кирхгофа : $U = U_g + iR + L \frac{di}{dt}$; в момент нуля тока при $i = 0$:

$$U = L \frac{di}{dt} + U_{г.д.} \Rightarrow \text{напряжение гашения дуги : } U_{г.д.} = U - L \frac{di}{dt}$$

Так как при гашении дуги идёт уменьшение тока : $L \frac{di}{dt} < 0$ (отрицательная величина). и отсюда

$$U_{г.д.} = U + \left| L \frac{di}{dt} \right|$$

Данное увеличение напряжения на контактах относительно источника называется перенапряжением. Оно тем больше, чем больше индуктивность электрической цепи и чем больше скорость изменения тока.



Для количественной характеристики перенапряжения вводят понятие коэффициент перенапряжения :

$$K = U_{г.д.} / U = 1 + \frac{L \left(\frac{di}{dt} \right)_{i=0}}{U}, \quad K > 1.$$

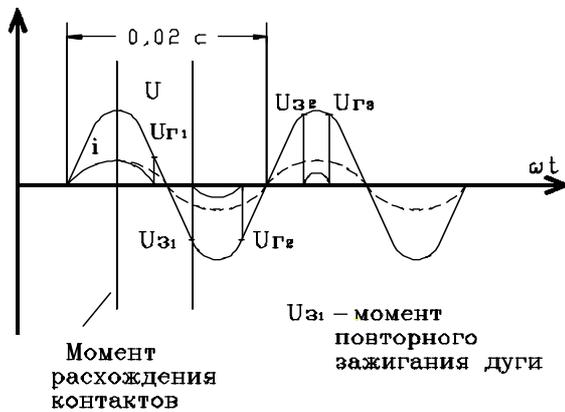
Напряжение на контактах может в десятки раз превысить напряжение сети. Это опасно для изоляции. Гашение происходит быстро, перенапряжения не возникает.

Гашение дуги на переменном токе.

На переменном токе напряжение сети периодически изменяется.

а) Активная нагрузка $\cos \varphi_n = 1$.

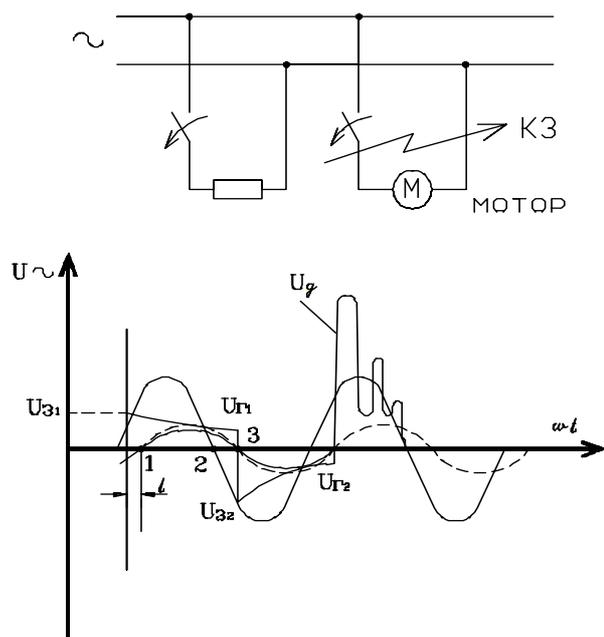
Осциллограмма :



При растягивании дуги вольт-амперная характеристика дуги поднимется вверх. Увеличится диэлектрическая прочность промежутка, и увеличится напряжение зажигания и гашения дуги. Возникает ситуация, что напряжение источника питания будет недостаточным для электрического пробоя промежутка. При совпадении момента прохождения тока через ноль и момента начала расхождения контактов дуга вообще может не возникнуть. Это явление называется безискровая коммутация :

1. Ток дуги при гашении становится прерывистым , т.е. протекает не полный полупериод.
2. Дуга с частотой сети гаснет и зажигается. В момент погасания дуги активно идут процессы рекомбинации.
3. Процесс дугогашения легче , чем на постоянном токе.

б) Индуктивная нагрузка.



Контакт моделируется как ёмкость, возникает колебательный контур :

U_3 - напряжение, достаточное для зажигания дуги.

В момент расхождения контактов напряжение сети будет больше напряжения зажигания дуги и ток не прервётся (точка 1). Когда ток снизится до нуля (точка 3) напряжение на контактах будет достаточным для повторного зажигания дуги, т.е. ток будет непрерывен, дуга зажигается вновь лишь изменив свой знак. Когда напряжение сети будет уменьшаться и будет переходить через “ноль” (точка 2), ток в сети будет существовать за счёт энергии, накопленной в индуктивности. Если следующий полупериод напряжения сети будет недостаточным для повторного зажигания дуги, то ток дуги оборвется, то при этом на концах возникает перенапряжение и колебательный процесс, так как индуктивность будет стремиться разрядиться через колебательный контур, образуемый ёмкостью контактов. Перенапряжение может достигать двойного напряжения сети. Отключение индуктивной нагрузки сложнее, чем активной. Здесь нет обрыва тока.

в) Гашение дуги переменного тока повышенной частоты (до 10 кГц). В моменты времени безтоковых пауз температура дуги не успевает снизиться и процесс ионизации идёт хуже. Условие гашения дуги повышенной частоты приближается к условиям гашения дуги постоянного тока.

Способы гашения дуги.

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

Для гашения дуги используют три явления :

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

$$U_g = U_{\Sigma} + E_g l_g$$

$$U_g > U_{нп} (3), E_g \uparrow, l_g \uparrow.$$

Возможные способы гашения дуги, применимые в электрических аппаратах (используются все три воздействия) :

1. Растягивание дуги.

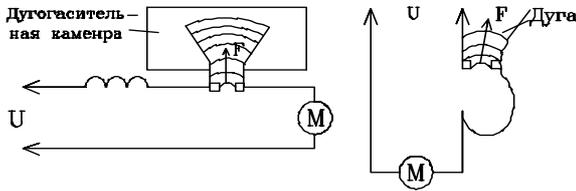
Самый простой, но самый не эффективный способ. при этом увеличивается падение напряжения на столбе дуги вследствие увеличения активного сопротивления дуги R_g : $U_g = iR_g$. Площадь поверхности дуги увеличивается интенсивнее идут процессы рекомбинации, улучшаются условия её охлаждения. Однако для того, чтобы, например, погасить дугу с током $I = 100\text{А}$ и напряжением $U = 220\text{В}$ требуется растянуть дугу на расстояние $25 \div 30\text{ см}$, что практически в электрических аппаратах сделать невозможно (увеличиваются габариты). Поэтому данный способ используется в качестве основного только у слаботочных электрических аппаратов (реле, магнитные пускатели, выключатели).

2. Охлаждение дуги.

Основной источник зарядов - термическая ионизация и если принудительно дугу охлаждать (воздухом, маслом), то она эффективно гасится. Это самый эффективный способ, но самый дорогой и применяется в электрических аппаратах выше 1000 В.

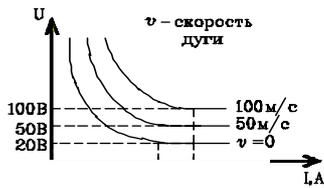
3. Магнитное дутьё.

Включает в себя и первый и второй способы.



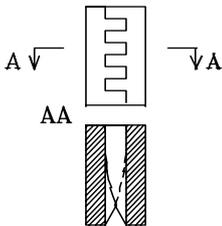
При расхождении контактов возникает электрическая дуга. Взаимодействие магнитного поля с током дуги приводит к образованию силы (направление определяется по правилу левой руки). Под действием этой силы дуга быстро перемещается, встречает аэродинамическое сопротивление (сопротивление воздуха), интенсивно охлаждается, а на рогах происходит её дополнительное растяжение. Чем больше

скорость движения дуги, тем интенсивнее идет охлаждение и вольт-амперная характеристика дуги резко подымается вверх.



4. Гашение в продольных щелях.

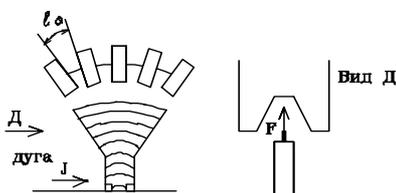
Так как дугу требуется не просто погасить, а в малом объёме при малых звуковых и световых эффектах, то магнитное дутьё всегда является составной частью дугогасительного устройства (камеры). Конструктивно камера представляет из себя продольную щель.



Дуга охлаждается и за счет движения вверх и за счет теплообмена со стенками камеры. Дуга удлиняется за счет конфигурации схемы в два раза. Это основной способ гашения дуги. Материал щели - дугостойкий теплоёмкий материал на основе асбоцемента, керамики и пластмассы. Даже после погасания дуги остаётся пламя дуги, которое может быть выброшено за пределы камеры, это опасно для обслуживающего персонала, и пожароопасно. Потому над дугогасительной камерой устанавливаются решётки из теплопроводящих металлических пластин. Высокая теплоёмкость, теплопроводность и разная поверхность их соприкосновения с пламенем, значительный путь, который пламя проходит в пластине способствует полной деионизации пламени.

5. Гашение дуги в дугогасительной решетки.

В первых четырёх способах воздействие происходило на ствол дуги. Этот способ используют околоэлектродное падение напряжение. Над контактами устанавливаются неподвижные изолированные друг от друга металлические пластин.



Пластины образуют дугогасительную решетку. Дуга за счет электродинамических усилий "загоняется" в решетку, где разбивается на ряд последовательно включенных коротких дуг. У каждой пластины решётки возникают околоэлектродные падения напряжения. Засчёт суммы околоэлектродных падений напряжений суммарное падение напряжения становится больше, чем даваемое источником питания, и дуга гаснет.

Дополнительно она охлаждается :

- а) Засчёт воздуха при перемещении её вверх,
- б) Засчёт отвода теплоты в пластины.

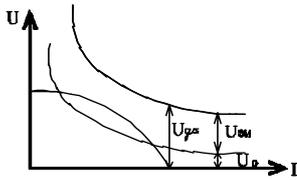
Для эффективного выжигания дуги в пластины, они выполняются из ферромагнитного материала, а в целях уменьшения окисления и увеличения теплопроводности эти пластины покрываются медью.

$$Ug\Sigma = U_3(m+1) + Eg l g = U_3m + U_3 + Eg l g = U_3m + U_{30} , \quad l g = l_0(m + 1),$$

- m - количество миниатюрных дуг,
- l₀ - длина единичной дуги,
- U₃₀ - напряжение на открытой дуге,

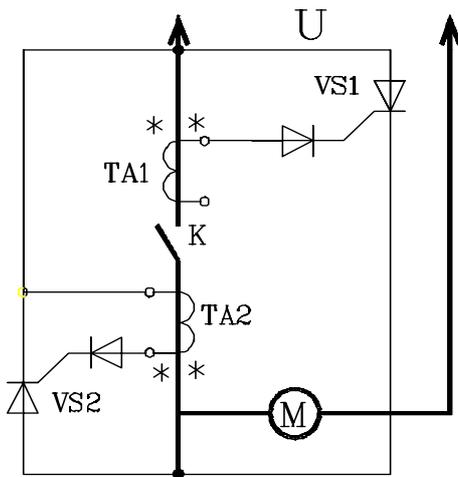
$$U_{go} = U_o + Egl g .$$

То есть статическая вольт-амперная характеристика дуги в решётке будет по форме такой же, как вольт-амперная характеристика открытой дуги, но перенесённой на сумму околоэлектродного падения напряжения вверх.



Решётка - основной способ гашения дуги на переменном токе, в 7-8 раз эффективнее, чем способ на постоянном токе. Дуга гаснет при первом же переходе тока через ноль в первый же полупериод после попадания в решётку. Для деионизации пламени также используется дугогасительная решётка.

Бездуговая коммутация в цепи переменного тока.

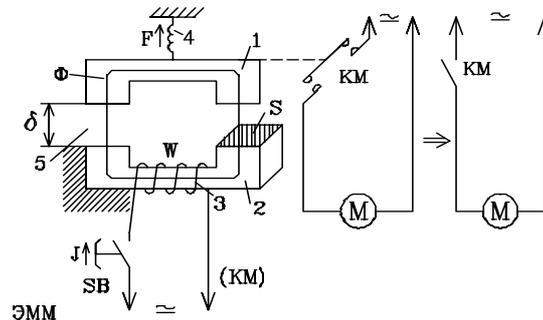


В нормальном режиме ток через тиристоры VS1 и VS2 не протекает, так как они шунтированы контактом К. В момент размыкания контакта К появляется падение напряжения и ток переходит в цепь того тиристора, направление которого проводимости которого соответствует полярности тока. Прямое падение напряжения на тиристорах составляет 1,5 - 2 В и дуга на контакте К не возникает. При переходе тока через ноль проводящий тиристор не откроется, так как нет управляющего сигнала в цепи управления.

Электромагнитные механизмы.

Большинство электрических аппаратов имеет в своём составе электромагнит. Рассмотрим его простейшую конструкцию.

Принципиальная схема включения двигателя на постоянном или переменном токе.



1 - якорь, подвижная часть ЭММ (электромагнитного механизма), с ней механически связано то, что необходимо переместить, перевернуть (контакт магнитного пускателя, вал выключателя, защёлку расцепителя).

2 - сердечник, неподвижная часть ЭММ, жёстко закреплена.

3 - обмотка, W - количество витков.

4 - возвратная пружина.

5 - воздушный зазор, δ -величина воздушного зазора, мм.

S - площадь сердечника и якоря.

Принцип действия :

При подаче напряжения на катушку, по ней протекает ток. Ток создаёт магнитный поток и намагничивающую силу $F=I \cdot W$ согласно закону полного тока, под действием которой якорь намагничивается и притягивается к полюсам сердечника. Из физики известно, что сила прямо пропорциональна квадрату магнитного потока : $P_{ЭМ} = K \cdot \Phi^2$, $P_{ЭМ} = (B^2 \cdot S) / \mu_0 (0)$,

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

Законы теории электромагнитного поля :

$$H \cdot l = I \cdot W \quad (1) - \text{закон полного тока,}$$

$$l = 2 \cdot \delta \quad (2),$$

$$H = B / \mu \quad (3) - \text{связь между напряжённостью и индуктивностью,}$$

$$\Phi = B \cdot S \quad (4) S - \text{площадь полюсов электромагнита.}$$

Из (1) и (2) :

$$H = \frac{W \cdot I}{l} = \frac{W \cdot I}{2 \delta} \quad (5)$$

Из (3) и (4) :

$$H = \frac{B}{\mu} = \frac{\Phi}{S \cdot \mu} \quad (6)$$

$$\frac{\Phi}{\mu \cdot S} = \frac{W \cdot I}{2 \cdot \delta} \quad (7)$$

$$\Phi = \frac{\mu \cdot S \cdot W \cdot I}{2 \cdot \delta} = \frac{W \cdot I}{\frac{2 \cdot \delta}{S \cdot \mu}} = \frac{F}{R \cdot \mu}$$

$$\Phi = \frac{F}{R_M} - \text{Закон Ома для магнитной цепи}$$

$$R_M = \frac{1}{\mu} \times \frac{2 \delta}{S}$$

Подставляем закон Ома для магнитной цепи в формулу (0) :

$$P_{ЭМ} = \left(\frac{I \times W}{R_M} \right)^2 \times K = K' \times I^2$$

Сила с которой якорь притягивается к сердечнику пропорциональна квадрату тока.

Классификация электромагнитных механизмов :

1. По роду тока:

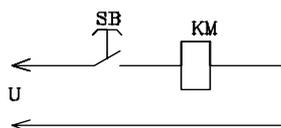
а) ЭММ постоянного тока,

б) ЭММ переменного тока.

Имеется в виду ток, протекающий по катушке.

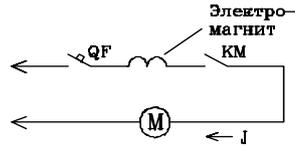
2. По способу включения катушки:

а) С параллельной катушкой ток в катушке в этом случае определяется параметрами самой катушки и напряжением, подводимым к ней. Катушка выполняется с большим числом витков из тонкого проводника с большим сопротивлением, ток, протекающий по ней, незначителен, поэтому применяют кнопку.



б) С последовательной катушкой.

В этом случае ток в катушке определяется сопротивлением устройства, которое включено последовательно в цепь электромагнита



3. Классификация по характеру движения якоря.

- а) Поворотные ЭММ, якорь поворачивается вокруг оси или опоры.
- б) Прямоходовые, якорь перемещается поступательно.

4. По способу действия.

- а) Притягивающие. Совершая определённую работу притягивают якорь.
- б) Удерживающие. Для удержания грузов (защёлка распейтеля).

Электромагниты постоянного тока.

Электромагнитный поток в данной конструкции создаётся обмоткой постоянного тока. Действие не зависит от направления тока.

Основные характеристики:

1. Тяговая статическая характеристика - зависимость электромагнитной силы от величины зазора :

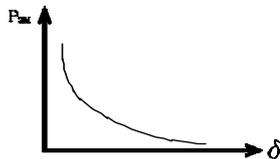
- Р_{эм} = f(δ) При U = const для ЭММ с параллельной обмоткой
- При I = const для ЭММ с последовательной обмоткой.

Применение формулы Максвелла для электромагнита с двумя зазорами :

$$P_{эм} = \frac{B^2 \times S}{\mu_0} \times \frac{\delta}{S} = \frac{\Phi^2}{\mu_0 \times S}$$

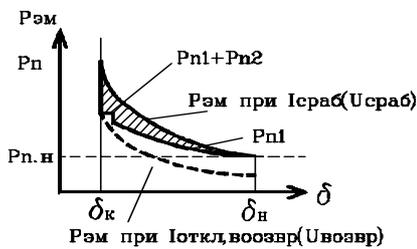
$$\Phi = \frac{F}{R_M} = \frac{I \times W}{\frac{1}{\mu} \times \frac{2\delta}{S}} \Rightarrow P_{эм} = \left(\frac{I \times W}{\frac{1}{\mu} \times \frac{2\delta}{S}} \right)^2 \times \frac{1}{\mu_0 \times S} = \frac{\mu_0 \times S}{4\delta^2} \times (I \times W)^2$$

Р ≅ κ × 1/δ² - электромагнитная сила обратно пропорциональна величине зазора.



Якорь по мере притягивания двигателя с ускорением, сила всё время увеличивается.

2. Согласование тяговой характеристики с нагрузкой электромагнита. Оно производится сопоставлением тяговой характеристики и характеристик противодействующих пружин путём построения в одних осях тяговой характеристики и характеристик противодействующих пружин. Такое согласование даёт возможность сделать заключение о работоспособности электромагнита



- δ_н - начальный зазор,
- δ_к - конечный зазор,
- Р_п - сила противодействующей пружины,
- Р_{пн} - начальная сила,
- Р_{п1} - пробивающая сила пружины,
- Р_{п2} - сила контактной пружины, возникает в момент замыкания магнитной системы и начинают действовать силы контактных пружин, обеспечивая провал контактов. Электромагнитная сила при токе срабатывания или напряжении срабатывания Р_{эм}.

Для нормального срабатывания ЭММ необходимо, чтобы тяговая характеристика включений отключений всё диапазоне изменения хода якоря проходила выше противодействующей пружины. Для чёткого возврата, отпущения якоря, необходимо, чтобы тяговая характеристика проходила ниже противодействующих характеристик. Если будет общая точка, то происходит зависание электромагнита.

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

4. Параметры электромагнитов :

а) Потребляемая мощность электромагнита в установившемся режиме (якорь замкнут). Считается, что весь ток идёт на нагрев катушки и в паспорте приводится активная мощность :

для последовательной катушки,

для параллельной катушки

б) Коэффициент запаса - отношение МДС (магнитно - движущей силы) при установившемся режиме к МДС троганья :

$$K_3 = \frac{F_Y}{F_{ТРОГ}} = \frac{I_Y}{I_{CPAB}} > 1$$

в) Напряжение (ток) срабатывания, возврата, коэффициент возврата.

Напряжение (ток) срабатывания - это минимальное значение при котором происходит срабатывание электромагнита.

Напряжение (ток) возврата - это максимальное значение, при котором якорь возвратится в исходное положение.

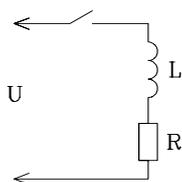
Коэффициент возврата - это отношение МДС, при которой происходит возврат якоря к МДС срабатывания :

$$K_B = \frac{F_{BOЗB}}{F_{CPAB}} = \frac{I_{BOЗB}}{I_{CPAB}} > 1$$

$$K_B = \frac{U_{BOЗB}}{U_{CPAB}} < 1$$

$$K_B = 0,1 \div 0,9$$

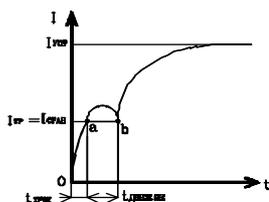
Динамика срабатывания электромагнитов постоянного тока.



Второй закон Ома $U = i \times R + \frac{d\Psi}{dt}$

$\Psi = i \times Lg$, где Lg - это динамическая индуктивность (переменная величина в процессе движения якоря).

$$U = i \times R + Lg \frac{di}{dt} + i \frac{dLg}{dt}$$



Момент замыкания магнитной системы.

а) Участок 0 - а.

Магнитная система разомкнута, $Lg = \text{const}$.

б) Участок а - б.

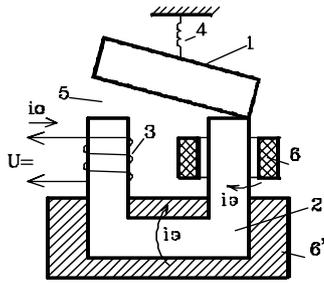
Якорь движется, зазор δ уменьшается, значение динамической индуктивности растёт. Возникает ЭДС самоиндукции, действующая против ЭДС сети и это приводит к снижению тока.

в) Магнитная система замкнулась, Ld - стала величиной постоянной.

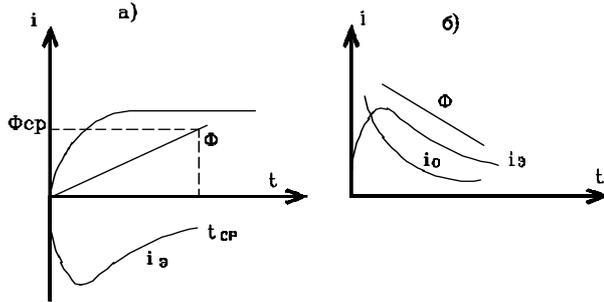
Время троганья + время движения якоря = время срабатывания.

Для ускорения срабатывания электромагнита стараются уменьшить движение якоря. Это достигается в основном за счёт уменьшения вихревых токов в переходном режиме. Вихревые токи создают магнитный поток согласно закону полного тока, направленный встречно основному магнитному потоку.

В некоторых случаях необходимо сделать замедление времени срабатывания (реле времени). Используют все факторы, увеличивающие время троганья и время движения якоря. Наиболее распространённое положение электромагнита - демпфирование при помощи короткозамкнутых обмоток, надеваемых на полюса сердечника из материалов с малым удельным электрическим сопротивлением. Рассмотрим такую конструкцию.



- 1 - якорь
 2 - сердечник
 3 - катушка
 4 - возвратная пружина
 5 - воздушный зазор
 6 - короткозамкнутая гильза
 6' - корпус из силумина в котором находится сердечник, короткозамкнутый виток намотан вокруг магнитопровода.



Вихревые токи, возникающие в короткозамкнутых витках в переменном режиме задерживают изменение магнитного потока и тем самым создают замедление, как при срабатывании, так и при отпускании якоря. При отпускании якоря замедляющий эффект выше 8-12 раз, чем при срабатывании, так как индуктивность замкнутой системы больше, чем разомкнутой.

i_0 - ток, протекающий по обмотке;

$i_э$ - ток электромагнита, вихревые токи, протекающие по короткозамкнутым виткам,

Поток, создаваемый током, возникающим в короткозамкнутых витках, и основной магнитный поток геометрически складываются. Поэтому результирующий магнитный поток нарастает (спадает) более медленно, чем это было бы без короткозамкнутых витков. В результате время срабатывания и время отпускания якоря увеличивается.

Электромагниты переменного тока.

Наименование параметров и характеристики аналогичны электромагнитам постоянного тока. Основное отличие в характере силы тяги электромагнитов переменного тока. так как ток, протекающий по катушке изменяется по синусоидальному закону, то и магнитный поток также синусоидален. Поэтому электромагнитная сила также изменяется по гармоническому закону :

$$P_{ЭМ} = \frac{\Phi}{\mu_0 \times S}$$

$$\Phi = \Phi_m \times \sin(\omega t)$$

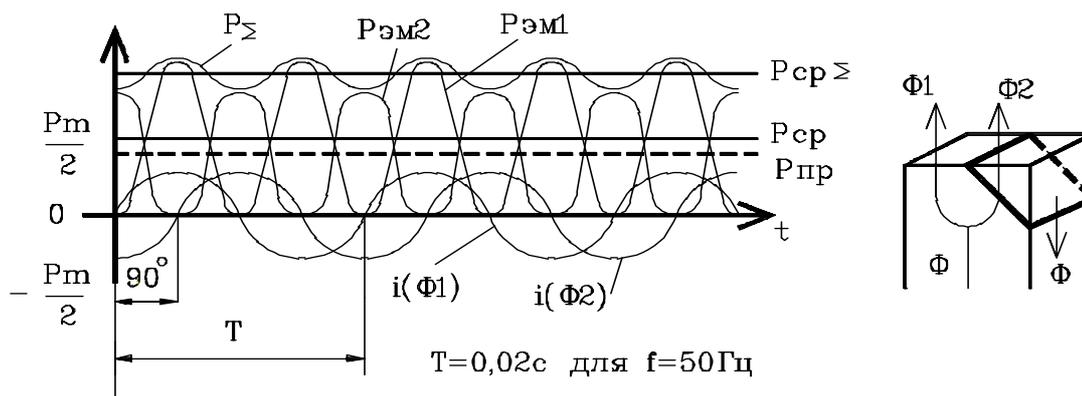
$$\sin^2 \omega t = 1/2 (1 - \cos 2\omega t)$$

$$P_{ЭМ} = \left(\frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \right) = \frac{P_m}{2} - \frac{P_m}{2} \times \cos 2\omega t \quad \text{т.е. мгновенное значение силы пульсирует с двойной частотой.}$$

Среднее значение силы вычисляется следующим образом :

$$P_{CP} = \frac{1}{T} \int_0^T P_{ЭМ} \times dt = P_m / 2$$

Среднее значение силы = $P_m / 2$.



Среднее значение силы = $P_m/2$.

Чтобы якорь хорошо притянулся необходимо, чтобы среднее значение $P_{ср}$ было больше силы противодействующей пружины $P_{пр}$. Но существуют моменты времени, когда $P_{пр} > P_{эм}$. Тогда якорь старается оторваться от пружины, но не успевает в силу своей инерции. В результате получается вибрация якоря и шум при работе электромагнита переменного тока.

Меры по устранению вибраций:

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

2. Использование короткозамкнутых витков, расщепляющих полюс якоря. рассмотрим это подробно. Смотри рисунок выше.

На большую часть полюса насаживается короткозамкнутый виток. Поток Φ_2 , проходящий под этой частью полюса будет отставать от Φ_1 на $60 \div 65^\circ$. Средняя сила становится на всем протяжении больше силы противодействующей пружины и вибрации не происходит.

Сравнение тяговых характеристик электромагнитов постоянного и переменного тока.

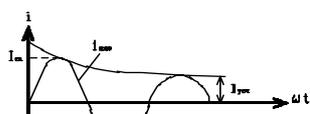
1. Так как среднее значение силы ЭММ переменного тока = $P_m/2$, то при тех же затратах электромагнит постоянного тока развивает усилия в два раза выше, чем электромагнит переменного тока. Электромагниты переменного тока менее экономичны.

2. При движении якоря с уменьшением зазора наблюдается два явления :

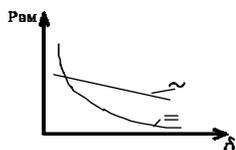
а) Уменьшается магнитное сопротивление,

б) Уменьшается значение тока в катушке якоря в следствие резкого возрастания индуктивного сопротивления.

Т.е. при заданном напряжении сети возникают в начальный момент времени большой ток вследствие малого индуктивного сопротивления катушки, а значит большое значение МДС, т.е. наблюдается форсировочная способность (большое значение МДС в начальный момент времени) электромагнита переменного тока, поэтому электромагниты переменного тока могут работать при больших зазорах, чем электромагниты постоянного тока.



P_m изменяется незначительно, она увеличивается вследствие уменьшения потоков рассеяния.



$$P_{эм} = \frac{\Phi^2}{2\mu_0 S} = \frac{i^2 * W^2}{R_M^2 * 2 * \mu_0 * S} = \frac{U^2}{2 * \mu_0 * W^2 * \omega^2};$$

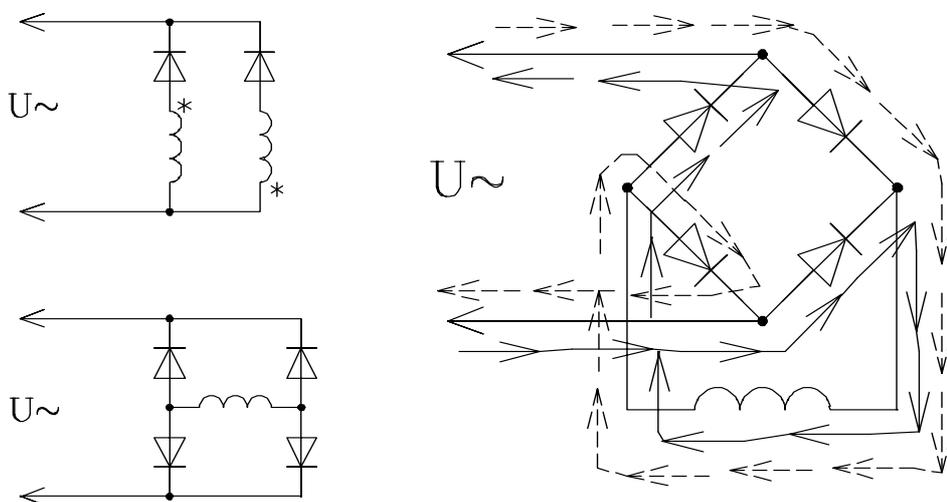
$$i = \frac{U}{x} = \frac{U}{\omega * L} = \frac{U}{\omega * \frac{W^2 * S}{\delta}};$$

Рэм независит от величины магнитного зазора, но зависит от частоты переменного тока.

Недостатки электромагнитов переменного тока :

1. При заданной площади полюсов средняя сила тяги в два раза меньше чем у электромагнитов постоянного тока.
2. Требуется реактивная мощность.
3. Электромагнитная сила зависит от частоты.
4. Магнитопровод обязательно выполняется шихтованным, т.е. выполнен из пластин электротехнической стали, изолированных друг от друга.
5. Возникают дополнительные потери в магнитопроводе и короткозамкнутом витке.

Поэтому часто используют электромагниты постоянного тока и имеющиеся в наличие источники переменного тока, используют электромагниты работающие на выпрямленном токе.

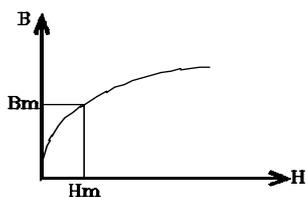


Пунктиром показан путь прохождения тока при положительной полуволне, а сплошной линией соответственно на отрицательной.

Пересчет катушек магнитных пускателей (контакторов переменного тока) параллельного включения при переходе на новое напряжение.

Из электротехники известна связь между напряжением и вектором магнитной индукции, которая возникает в магнитопроводе : $U = 4,44 * f * W * S * B_m$, $E = d\Phi / dt$,
 f - частота , W - количество витков, S - площадь полюсов электромагнита, B_m - максимальный вектор магнитной индукции.

Вектор магнитной индукции следует оставить без изменения. Если снизить напряжение, то можно уменьшить частоту.



$$U_1 / U_2 = 4,44 * f * W_1 * S * B_m / W_2$$

$$W_2 = W_1 * U_2 / U_1 \quad (1)$$

$$F = I_1 * W_1 = I_2 * W_2 \downarrow$$

Уменьшение числа витков должно компенсироваться увеличением тока

$$W_1 / W_2 = I_2 / I_1 \quad (2).$$

Объединяем (1) и (2) : $U_1 * I_1 = U_2 * I_2$ т.е. полная мощность и в первом и включений отключений втором случае должна быть неизменной. При переходе на другое напряжение соотношение между активным и индуктивным сопротивлением изменяется незначительно. Поэтому

принимают что активная мощность изменяется незначительно.

$$\frac{P_1}{P_2} = 1 = \frac{U_1^2}{R_1} \times \frac{R_2}{U_2^2} \text{ т.к. } R = \rho \times \frac{l}{S} = \rho \times \frac{l_1 \times W}{\frac{\pi d^2}{4}}$$

$$\frac{U_1^2}{U_2^2} = \frac{R_1}{R_2} = \frac{W_1 \times d_2^2}{W_2 \times d_1^2} ; \frac{U_1}{U_2} = \frac{d_2}{d_1} ; d_2 = d_1 \sqrt{\frac{U_1}{U_2}} \quad (3)$$

Пример использования.

Дано : катушка $U_1 = 220 \text{ В}$, $W_1 = 2700$, $d_1 = 0.2 \text{ мм}$. Пересчитать её на $U_2 = 380 \text{ В}$, $W_2 = ?$, $d_2 = ?$ По формуле (1) $W_2 = W_1 \times U_2 / U_1 = 2700 \times 380 / 220 = 4700$.

По формуле (3) $d_2 = d_1 \times \sqrt{\frac{U_1}{U_2}} = 0,2 \times \sqrt{\frac{220}{380}} = 0,15 \text{ мм}$

Аппараты распределительных устройств низкого (до 1000 В) напряжения .

1. Неавтоматические выключатели.
2. Предохранители.
3. Автоматические воздушные выключатели.
4. Трансформаторы тока.
5. Низковольтные комплектные устройства.

Неавтоматические выключатели:

- 1) Рубильник,
- 2) Переключатели,
- 3) Пакетные выключатели.

Рубильник и переключатель предназначены для ручного, непосредственного или дистанционного замыкания, размыкания или переключения электрических цепей.

Рассчитан на отключение незначительных токов (0,2 на постоянном токе и 0,3 на переменном токе ; при наличии дугогасительного устройства 0,5). Пакетные выключатели и переключатели предназначены для переключения в нескольких электрических цепях одновременно. Используются для пуска двигателей небольшой мощности. Применяются до 250 А, частота 300 включений отключений в час. Для более меньшей нагрузки частота может достигать 20000 включений.

Предохранители.

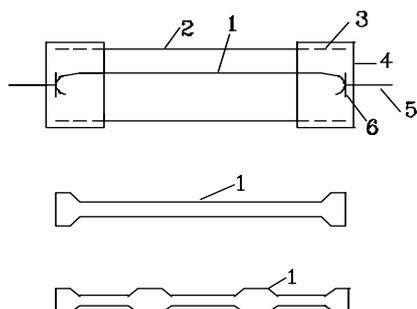
Предохранитель - это коммутационный электрический аппарат, защищающий электроустановку от перегрузок и токов короткого замыкания посредством разрушения специально предусмотренных для этого токоведущих частей под действием тока, превышающего определенное значение.

Основные элементы предохранителей:

1. Плавкая вставка, которая включается в защищаемую цепь последовательно.
2. Дугогасящее устройство, которое гасит дугу, возникающую после плавления вставки.

Конструкция, принцип действия предохранителей, их характеристики

1. Предохранители с гашением дуги в закрытом объеме.
ПР-2 предохранитель разборный.



- 1 - плавкая вставка, выполняется из легкоплавкого металла. Например цинк; пары цинка имеют высокий потенциал ионизации ($\rho = 0,06 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $\Theta_{\text{пл}} = 419^\circ \text{ C}$).
 - 2 - трубчатый фибровый патрон (цилиндр). Фибра при нагревании выделяет газ.
 - 3 - латунная или алюминиевая обойма с резьбой.
 - 4 - латунный (алюминиевый) колпачок.
 - 5 - контактный нож (медь).
 - 6 - диск, жестко закрепленный с контактным ножом.
- Колпачок 4 с помощью диска 6 прижимает плавкую вставку к обойме.

Принцип действия:

При протекании тока перегрузки или короткого замыкания плавкая вставка нагревается (согласно закону Джоуля-Ленца), расплавляются и сгорают суженные участки плавкой вставки, в этих местах возникают электрические дуги. Под действием высокой температуры стенки из фибры патрона выделяют газ, в результате давление в патроне за доли полупериода (0,01 с) увеличится до 4-8 МПа. Вольтамперная характеристика дуги поднимается, что способствует ее быстрому гашению. Предохранитель работает бесшумно, без выброса пламени и газов, поэтому предохранители могут монтироваться в непосредственной близости друг от друга.

В нормальном режиме нагрев плавкой вставки имеет характер установившегося процесса, при котором вся выделяющаяся в плавкой вставке энергия отдается в окружающую среду. При этом все части предохранителя нагреваются до температуры 60-100°C, которая не должна превышать допустимых значений из-за возможности повреждения изоляции.

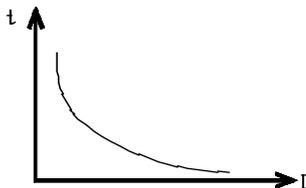
Характеристики:

- 1) **Номинальный ток плавкой вставки** - это ток, на который рассчитана плавкая вставка для длительной работы. Длительное протекание данного тока не вызывает плавление вставки.
- 2) **Номинальный ток предохранителя** - это ток наибольшей плавкой вставки, предназначенной для данной конструкции предохранителя. На этот ток рассчитана вся токоведущая система.
- 3) **Предельный ток отключения** (предельная отключающая способность, предельная коммутационная способность - ПКС). Это наибольший ток, который предохранитель может отключить без каких-либо повреждений, препятствующих его дальнейшей работе после смены плавкой вставки.
- 4) **Номинальное напряжение предохранителя** - это наибольшее возможное напряжение, на котором может использоваться данный предохранитель. От напряжения зависит и ПКС.

Для ПР-2 :

I_n , А		15	60	100	200
I_b , А		6,	15,20,	60,	100,
		10,	25,35,	80,	125,
		15	45,60	100	160, 200
ПКС	220 В	0,8	1,8	11	11
	380 В	8	4,5	11	11
	500 В	7	3,5	10	10

- 5) **Время - токовая характеристика** - это зависимость времени перегорания плавкой вставки от тока (защитная характеристика). Характеристика является обратнозависимой и приводится в паспорте для каждого номинального тока предохранителя. Обратной зависимый характер вытекает из закона Джоуля-Ленца.



$$t = \frac{W_Q}{I^2 \times R_{\text{Пл.Вст.}}} = \frac{C \times G_B (\Theta_{\text{Пл}} - \Theta_H)}{I^2 \times R_{\text{Пл.Вст.}}}$$

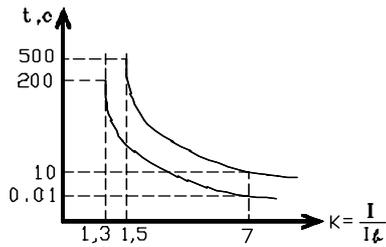
$$t = \frac{1}{I^2}$$

C - удельная теплоемкость материала,

$\Theta_{\text{пл}}$ - температура плавления,

Θ_H - начальная температура.

Пример характеристики для ПР-2 :



Для построения характеристики конкретной плавкой вставки в зависимости от именованных единиц тока, ось абсцисс переводят в именованные единицы по формуле:

$$K = \frac{I}{I_B}$$

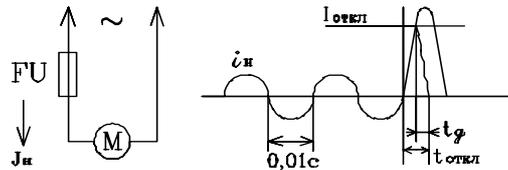
6) **Максимальный ток неплавания** - это наибольший ток, при котором плавкая вставка не перегорает в течение двух первых часов. Обычно этот ток составляет:

$$\frac{I_{MAX.НЕПЛА}}{I_B} = 1,3 \div 1,5$$

7) **Минимальный ток плавления** - то наименьший ток, при котором плавкая вставка должна расплавиться в течение 1-2 часов:

$$\frac{I_{MIN.ПЛА}}{I_B} = 1,6 \div 1,9$$

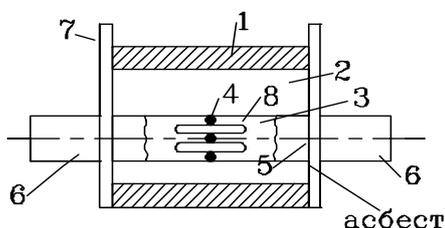
8) **Эффект токоограничения предохранителя** - это явление перегорания плавкой вставки раньше, чем ток короткого замыкания достигнет своего установившегося значения.



2. Предохранители с мелкозернистым наполнителем.

ПН2, НПН2, ПП17.

Данные предохранители обладают более совершенными характеристиками.



1 - корпус из прочного фарфора или стеатита,
 2 - наполнитель кварцевый, тщательно просушенный при температуре $120 \div 180^\circ \text{C}$, песок
 3 - ленточная плавкая вставка, выполненная из меди. Температура плавления меди 1083°C , толщина этой ленты $0,1 \div 0,2 \text{ мм}$. Плавкая вставка имеет сужение 8, на которое нанесены оловянные шарики 4, температура плавления олова 475 C .

Такая конструкция предназначена для получения эффекта токоограничения, а также позволяет не допускать высокие температуры предохранителя при перегорании плавкой вставки. При этом используется явление, такое как **металлургический эффект** - это способность легкоплавких металлов в расплавленном состоянии растворять некоторые тугоплавкие металлы (медь, серебро). В результате этого получаем плавкую вставку меньших габаритов, ($\rho_{\text{Cu}} = 0,0153 \text{ Ом} \times \text{м}$, $\rho_{\text{олова}} = 0,21 \text{ Ом} \times \text{м}$), но перегорающую при низких температурах.

5 - диск, к которому приваривается плавкая вставка. Диск крепится к пластинам 7, которые электрически связаны с ножевым контактом 6.

Принцип действия:

При токах перегрузки или короткого замыкания плавкая вставка сгорает в местах сужения, образуются дуги, которые горят в канале, образованном песчинками. Песчинки имеют хорошо развитую охлаждающую поверхность и образуют щель. Градиент напряжения на дуге поднимается до 60000 и дуга гаснет за несколько миллисекунд. После срабатывания плавкую вставку вместе с диском удаляют и устанавливают новую. Патрон засыпается песком, для герметизации патрона под пластину кладётся асбестовая прокладка.

Номинальные токи предохранителя :

ПН2	до 630 А,
НПН2	до 63 А,
ПП17	до 1000А.

Время токовая характеристика - также обратная зависимость.

Пример построения время токовой характеристики.

