

Министерство образования и науки Республики Казахстан  
Костанайский государственный университет имени А. Байтурсынова  
Кафедра электроэнергетики

С.В. Чумаченко

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

Учебное пособие



Костанай, 2020

**УДК 621.311(075.8)**

**ББК 31.26я73**

**Ч - 90**

**Рецензенты:**

Иванченко Павел Григорьевич, кандидат технических наук, заведующий лабораторией использования машинно-тракторного парка КФ ТОО «НПЦ агроинженерии»

Курманов Аяп Конлямжаевич, доктор технических наук, профессор кафедры машиностроения

Кошкин Игорь Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики

**Автор:**

Чумаченко Светлана Владимировна

Чумаченко С.В.

Ч - 90 Электрические аппараты. Учебное пособие для специальности 5В071800 - Электроэнергетика – Костанай: Костанайский государственный университет имени А. Байтурсынова, 2020. – 98 с.

В пособие включены основные темы, которые необходимо рассмотреть в процессе изучения дисциплины «Электрические аппараты», вопросы для самопроверки по каждой теме.

Предназначено для студентов очной и заочной форм обучения специальности 5В071800/6В07102 – Электроэнергетика.

УДК 621.311(075.8)

ББК 31.26

Утверждено и рекомендовано к изданию Учебно-методическим советом Костанайского государственного университета имени А. Байтурсынова, 29.04. 2020 г. протокол № 2.

ISBN 978-601-7640-61-3

© Чумаченко С.В., 2020

## Содержание

Введение .....	4
1 Основы теории электрических аппаратов. Основные положения.....	8
2 Электрические контакты. Материал для контактов. Износ контактов при замыкании и размыкании.....	15
3 Электрическая дуга. Способы гашения электрической дуги.....	21
4 Электромагниты.....	30
5 Аппараты высокого напряжения.....	37
6 Аппараты низкого напряжения (до 1000 В).....	44
7 Аппараты управления.....	48
8 Электрические реле.....	52
9 Бесконтактные электрические аппараты.....	56
10 Электрические аппараты с жидкометаллическими контактами.....	65
11 Простейшие методы расчета нагрева и охлаждения электрических аппаратов и их частей.....	70
12 Расчет электродинамических усилий с использованием закона Био-Савара-Лапласа.....	75
13 Электрическое переходное сопротивление контактов и их нагрев.....	77
Заключение .....	82
Приложение А.....	83
Приложение В.....	91
Список использованных источников.....	98

## Введение

Электрические аппараты являются непременным элементом любой электроустановки и широко применяются в электроэнергетике, в системах электроснабжения и электропривода, в электротехнологии и электрооборудовании промышленности и сельского хозяйства, на всех видах транспорта, в устройствах электропитания систем информационных технологий, радио- и электросвязи, в бытовой и медицинской технике.

*Аппарат* (от лат. apparatus - оборудование) - это прибор, техническое устройство, приспособление. Применительно к электрическим аппаратам многозначность и неопределенность термина можно конкретизировать, рассмотрев их функциональное назначение.

Под электрическими аппаратами понимают электротехнические устройства, выполняющие следующие функции:

- • включение и отключение электрических цепей в объектах, предназначенных для производства, преобразования, передачи и потребления электроэнергии;
- • контроль и измерение параметров указанных объектов;
- • защита объектов от аварийных режимов и защита человека и имущества при повреждении электрооборудования;
- • регулирование параметров объектов, силовых и регулирующих исполнительных механизмов, управление технологическими процессами;
- • преобразование неэлектрических величин в электрические;
- • создание магнитного поля с заданными параметрами и конфигурацией.

Такое разнообразие функций привело к появлению многих видов электрических аппаратов, существенно отличающихся по принципу действия и конструкции и, тем не менее, обладающих общим свойством по назначению. В современном представлении *электрический аппарат* — это электротехническое устройство для управления потоками энергии и информации.

С учетом выше изложенного и различий в традициях мировых электротехнических школ классификация аппаратов достаточно условна.

Наиболее ранние сведения об электрических аппаратах относятся к 1802 г., когда профессор физики Петербургской Военно-медико-хирургической академии В. В. Петров открыл явление электрической дуги между размыкающимися под током медными электродами, осуществлявшими функцию отключающего аппарата.

Видный русский ученый Б. С. Якоби в 30-х гг. XIX в. впервые разработал автоматические ртутные соединители (контакты) и применил их в системе полевого минирования.

Первое реле было изобретено в России в 1830 г. П. Шиллингом, автором первого телеграфного аппарата. В подвижную систему реле встраивалась магнитная стрелка, помещавшаяся внутри катушки. При протекании тока по

катушке стрелка отклонялась создаваемым магнитным полем. Это соответствовало «срабатыванию реле».

Первый автоматический регулятор был изобретен в России в 1845 г. К. И. Константиновым. Этот регулятор был основан на электромагнитном принципе и применялся для автоматического регулирования частоты вращения ракетоподводного устройства, а также для регулирования паровых машин.

К концу XIX в. появились сравнительно мощные электрические станции и распределительные электрические сети. Это вызвало необходимость разработки более совершенных способов отключения цепей с током. В 1893 г. Э. Томсон (США) открыл принцип гашения электрической дуги в трансформаторном масле, а инженеры Д. Хиллард и Ч. Парсонс (США) предложили конструкцию масляного выключателя.

Использование дутья сжатым воздухом на электрическую дугу, возникающую между контактами аппарата, было впервые предпринято в 1897 г. Д. Пробстом (Германия). Однако широкое промышленное внедрение воздушных выключателей началось в 40-х гг. XX столетия. Большие заслуги в создании этих выключателей и разработке их теории принадлежат советскому ученому Е. М. Цейрову.

Видный русский ученый М. О. Доливо-Добровольский в 1913-1914 гг. изобрел дугогасительную решетку, которая и сегодня широко используется. Электрическая дуга «вдувается» в пакет из металлических пластин и интенсивно охлаждается там за счет отвода теплоты в пластины. Доливо-Добровольским разработан также аппарат с щелевой дугогасительной камерой. В настоящее время эти принципы построения коммутационных устройств являются преобладающими в аппаратах управления и распределения энергии на напряжение до 1000 В.

Первый завод, выпускавший электрические аппараты в России, был основан в 1879 г. П. Н. Яблочковым на Обводном канале в Петербурге. Он принадлежал фирме «П. Н. Яблочков - изобретатель. Товарищество электрического освещения и изготовления электрических аппаратов и машин в России» и выпускал осветительные выключатели, предохранители, регуляторы, реле. Этот завод прекратил свое существование в 1887 г. из-за недостатка средств и отсутствия поддержки со стороны правительства.

В 1914 г. в России было несколько электротехнических заводов, выпускавших электрические аппараты. На заводе «Электросила» (бывшей фирмы «Сименс-Шуккерт») производились реостаты. На Ленинградском заводе «Электроаппарат» (бывшей фирмы «Сименс») изготовлялись предохранители и распределительные щиты. На Харьковском электромеханическом заводе, образовавшемся на базе эвакуированного в Первую мировую войну рижского завода фирмы «АЕГ», выпускались различные низковольтные аппараты. В дальнейшем электроаппаратная промышленность получила широкое развитие, особенно в годы первых пятилеток. Многие крупные предприятия появились в результате эвакуации (Чебоксарский электроаппаратный завод, Ульяновский завод «Контактор» и т. д.). В послевоенные и последующие годы появились

крупные заводы в Курске, Дивногорске, Ангарске, Минусинске и был построен целый ряд предприятий на Украине, в Средней Азии, Северном Кавказе и Закавказье.

Наиболее ранние работы по теории электрических аппаратов относятся к 1876 г., когда русский ученый И. А. Вышнеградский опубликовал свои разработки по теории автоматического регулирования и по анализу устойчивости регуляторов.

В 1902 г. Г. Айртон (Англия) провела исследование статических вольтамперных характеристик электрической дуги и представила их результаты в виде известной эмпирической формулы. Видный русский электротехник академик В. Ф. Миткевич в 1902-1905 гг. опубликовал свои работы по электрической дуге, в которых, в частности, исследовал процессы на катоде и указал на определяющую роль термоэлектронной эмиссии в общем механизме дугового разряда.

Первые работы по теории электромагнитных устройств, широко применяемых в различных аппаратах, были выполнены А. Г. Столетовым в 1872 г. и В. К. Аркадьевым в 1912 г.

В 1920 г. индийский ученый Сага вывел теоретическую зависимость степени ионизации газа от температуры, давления и других физических факторов. Эта формула нашла широкое распространение в теории процессов коммутации в электрических аппаратах и вошла в теорию коммутации под названием «формула Сага».

Американский ученый Д. Слепьян в 1928-1932 гг. опубликовал ставшие широко известными работы по теории процессов коммутации электрических цепей и исследованию электрической дуги отключения, в которых дал объяснение роли электрической дуги при отключении цепей постоянного тока, и сформулировал общее условие гашения дуги.

Одна из первых работ по теории восстанавливающегося напряжения на коммутирующих элементах аппаратов была опубликована Р. Парком и В. Скитсом в 1931 г. Первые отечественные работы в этом направлении были выполнены в 1936-1940 гг. профессором А. Я. Буйловым. Большой вклад в исследование и разработку теории восстанавливающегося напряжения внес П. Хаммарлу, а в исследование и разработку теории электрических контактов - Р. Хольм.

Первая русская книга по электрическим аппаратам, вышедшая в 1878 г., называлась «Аппараты автоматической стрельбы», автор Н. А. Азаров. Первое систематизированное изложение теории и устройства электрических аппаратов было выполнено в нашей стране профессором А. А. Смуровым в его книге «Электротехника высокого напряжения», вышедшей в 1935 г. В 1946 г. профессор А. Я. Буйлов опубликовал первую фундаментальную книгу по общей теории электрических аппаратов под названием «Основы электроаппаратостроения». Систематизированный труд по теории и устройству электрических аппаратов (в трех частях) был выпущен профессором М. А. Бабиковым в 1951-1958 гг. В дальнейшем теория электрических аппаратов

освещалась в изданиях кафедры «Электрические аппараты» МЭИ в 1958, 1970 и 1987 гг.

Персональные и суперкомпьютеры, Интернет принципиально изменили инженерную деятельность, в основе которой доминируют информационные технологии. Стали доступны для решения задачи большой сложности, к которым относятся задачи с распределенными параметрами - полевые задачи, графические системы конструирования. Накопленные профессиональным мировым сообществом знания концентрируются в программных комплексах и базах данных, электронных библиотеках, ориентированных на оперативное использование исследователями, разработчиками, проектировщиками, эксплуатационным персоналом, где бы они не находились. Конечно, бесполезно пытаться глубоко освоить все имеющиеся знания даже в пределах одной отрасли - электротехники. Объем их слишком велик. Доступность применения современных инструментов не только в смысле их приобретения, но и возможностях их ускоренного освоения без специальной подготовки, стало возможным при использовании более простых способов представления физических процессов в виде понятных визуальных образов. В данном учебнике при изложении принципов работы электромеханических электрических аппаратов применены методы макроскопического моделирования процессов в программной среде, получившей широкое распространение в мировой инженерной практике. Для уточненного анализа электромагнитных параметров таких моделей сделана ориентация на численные методы полевого анализа, которые также широко распространяются.

Огромную роль в развитии электро- аппаратостроения сыграли Харьковская электроаппаратная школа (аппараты низкого напряжения), Ленинградская и Московская электроаппаратные организации (аппараты высокого и низкого напряжения), научно- исследовательские и производственные организации г. Чебоксары (аппараты управления и аппараты релейной защиты).

Большой вклад в развитие теории электрических аппаратов внесли работавшие в этой области ученые Г. Н. Александров, А. Я. Буйлов, Г. В. Буткевич, О. Б. Брон, А. М. Залесский, В. С. Кулебакин, Р. С. Кузнецов, Н. Е. Лысов, И. С. Таев, Г. Т. Третьяк, Е. М. Дейров и др.

## 1 Основы теории электрических аппаратов. Основные положения

**Цель лекции:** уяснить понятие электрического аппарата, изучить классификацию электрических аппаратов и режимы работ, познакомится с поверхностным эффектом и эффектом близости.

### **План лекции:**

1. Понятие электрического аппарата. Виды коммутации.
2. Классификация электрических аппаратов. Требования, предъявляемые к электрическим аппаратам.
3. Режимы работы электрических аппаратов.
4. Поверхностный эффект и эффект близости.

1. Понятие электрического аппарата. Виды коммутации.

**Электрический аппарат** - электротехническое устройство для коммутации, стабилизации или регулирования электрических, механических или других нагрузок.

**Коммутация** (с латинского «Изменение») бывает *ступенчатой* и *плавной*. Для *ступенчатой коммутации* тока наиболее характерны включение и отключение электрической цепи. *Плавную коммутацию* тока в электрических цепях осуществляют различные усилители при изменении управляющего сигнала на входе усилителя.

Электрические аппараты могут коммутировать как ток, так и напряжение, и мощность, которая является функцией отключаемого тока и напряжения сети, которые являются - разновидностями электрической нагрузки.

Примеры устройств, коммутирующих механическую нагрузку:

1. Электромагнитные муфты - соединяют и разъединяют ведомую и ведущую часть в приводе;
2. Тормозные электромагниты - в подъемно- транспортных устройствах;
3. Электромагниты приводят в действие заслонки и затворы.

К электрическим аппаратам относят электротехнические устройства, осуществляющие *непериодическую коммутацию*, но не относят электротехнические устройства, для которых характерна строго определенная периодичность коммутации тока в электрических цепях.

Функции стабилизации или регулирования различных технических параметров работающего оборудования осуществляют электрические аппараты особой разновидности: *электрические регуляторы* и *стабилизаторы*.

2. Классификация электрических аппаратов. Требования, предъявляемые к электрическим аппаратам.

В настоящее время распространены две характерные разновидности электрических аппаратов – контактные и бесконтактные.

В бесконтактных аппаратах нет коммутирующих электрических контактов, коммутирование происходит с помощью какого-либо нелинейного элемента, электрическое сопротивление которого плавно или скачкообразно изменяется в широких пределах. В отличие от контактных электрических



аппаратов бесконтактный коммутационный элемент не разрывает полностью гальваническую связь в цепи.

Недостаток контактных аппаратов - образование в процессе коммутации расплавленного металлического мостика, электрической искры или дуги.

Контактные электрические аппараты могут быть *автоматическими* и *неавтоматическими*. Автоматические – аппараты, приходящие в действие от заданного режима работы цепи или машины. Неавтоматические – аппараты, действие которых зависит только от воли оператора.

Электрические аппараты подразделяют на:

1. *Аппараты высокого напряжения* (от нескольких единиц и до 500 кВ и выше);
2. *Аппараты низкого напряжения* (до 1000 В)

Среди аппаратов низкого напряжения можно условно выделить две группы:

- Аппараты автоматики - реле, датчики, автоматические регуляторы и др., коммутируют токи до единиц Ампер при невысоких напряжениях сети. Условия такой коммутации относительно легки и обычно осуществляются простыми средствами. Поэтому основные характеристики этой группы аппаратов определяются не коммутирующим элементом, а входным измерительным органом, в качестве которого часто используется электромагнитная система.

- Аппараты управления работают в цепях управления электрическими машинами и другими преобразователями и приемниками электрической энергии. К ним относятся контакторы, пускатели, командоаппараты и т.д. По выполняемым функциям и характеристикам близко к ним стоят аппараты распределения энергии, предназначенные для управления режимами и для защиты сетей до 1000 В (автоматы, предохранители и т.д.)

Особую группу электрических аппаратов составляют автоматические регуляторы и стабилизаторы, предназначенные для регулирования и стабилизации электрических или иных параметров.

*Классификация по роду защиты от попадания* в электрические аппараты иностраных 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.

IP XX

1) Защита от пыли:

Если стоит 0 значит защита отсутствует.

Если стоит 1 значит защита от преднамеренного доступа, от попадания крупных тел диаметром не менее 52,5 мм (ладонь).

Если стоит 2 значит защита от попадания инородных тел диаметром 12.5 мм и длиной 80 мм (палец).

Если стоит 3 значит защита от преднамеренного доступа тела диаметром 2,5 мм (защита от инструмента).

Если стоит 4 значит защита от преднамеренного доступа тела диаметром 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

*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*:

- зоны умеренного климата У N
- зоны умеренного и холодного климата УХЛ NF
- зоны тропически-влажного климата ТВ ТН
- зоны тропически-сухого климата ТС ТА
- зоны тропического климата Т Т
- 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  $-40^{\circ}$  до  $+40^{\circ}$  при среднемесячной влажности воздуха 80% при 20%. 2 - в помещениях имеющих свободный доступ наружного воздуха.

**Электрический аппарат** - совокупность ряда взаимосвязанных элементов и узлов, в которых протекают разнообразные сложные физические процессы. Математические зависимости, описывающие эти процессы, нередко оказываются недоступными для решения обычными классическими методами. Многие расчеты могут служить лишь для предварительной ориентации. Создание аппарата требует больших исследовательских и макетных работ и обработки конструкции на натуральных образцах. Развитие вычислительной техники открывает большие возможности для прогресса в совершенствовании теории электрических аппаратов.

Общая теория электрических аппаратов включает в себя:

- теорию тепло- и массопереноса в аппаратах;
- теорию коммутации электрических цепей;
- теорию электромагнитных и электродинамических явлений в аппаратах.

Требования, предъявляемые к электрическим аппаратам разнообразны, и зависят: от назначения, условий применения и эксплуатации аппарата.

Общие требования, предъявляемые к электрическим аппаратам:

- каждый аппарат при работе обтекается каким-то рабочим током, то в токоведущих частях выделяется определенное количество теплоты и аппарат нагревается. Температура не должна превосходить некоторого определенного значения, устанавливаемого для данного аппарата и его деталей;
- в каждой цепи может быть ненормальный (перегрузка) или аварийный (короткое замыкание) режим работы. Ток, протекающий по электрическому аппарату, в этих режимах в 50 и более раз превышает номинальный или рабочий ток, поэтому аппарат подвергается чрезмерно большим термическим и электродинамическим воздействиям тока, значит, он должен выдерживать эти воздействия без деформации, препятствующих его дальнейшей работе;

- в цепи, где работает электрический аппарат, возможны перенапряжения, поэтому электрический аппарат должен обеспечивать надежную работу его при заданных значениях перенапряжения;

- контакты аппаратов должны быть способны включать и отключать все токи рабочих режимов, а многие аппараты - токи аварийных режимов, которые могут возникнуть в управляемых и защищаемых цепях.

- к каждому электрическому аппарату предъявляют требования по надежности и точности работы и по быстродействию. При этом все функции аппарат должен выполнять в условиях, соответствующих внешним воздействиям.

- любой аппарат должен иметь наименьшие габариты, массу и стоимость, быть простым по устройству, удобным в обслуживании и технологичным в производстве.

### **Общие сведения по техническим параметрам и характеристикам электрического аппарата.**

Электрические аппараты изготавливают на номинальные технические параметры - номинальное напряжение и номинальный ток.

Наиболее распространены следующие величины напряжений:

- переменный ток – 24, 36, 127, 220, 380 В.
- постоянный ток – 12, 24, 48, 110, 220, 440 В.

Характерные значения номинальных токов: 0,1; 0,2; 0,5; 1; 3; 6; 10; 25; 40; 63; 100; 160; 250; 400; 630; 1000 А.

Аппарат должен выдерживать перенапряжения возникающие в процессе эксплуатации. Для этого он обладает определенным уровнем изоляции, который обычно оценивается величиной испытательного напряжения, превышающего номинальное более чем в 4 раза. Электрическое сопротивление изоляции десятки кОм- мОм.

*Термическая устойчивость* – способность противостоять термическому воздействию тока короткого замыкания.

*Механическая износостойкость* – способность аппарата выполнять определенное число операций без тока в цепи его контактов. Она может достигать десятков миллионов циклов срабатывания.

*Электрическая износостойкость* – способность аппарата выдерживать определенное число операций при коммутации электрического тока его контактами в заданных условиях отключения. Может достигать несколько миллионов циклов срабатывания.

*Электрическая прочность изоляции* – изоляция в холодном и в нагретом состоянии (до установившейся температуры) в определенных условиях испытания должна выдерживать испытательное напряжение переменного тока частотой 50 Гц в течение 1 минуты.

### **3. Режимы работы электрических аппаратов.**

Обычно аппарат работает в одном из трех режимов, для которых характерно определенное изменение во времени  $t$  тока нагрузки  $I_n$  и

превышение температуры  $\tau$  ( $\tau = t_{нагрева} - t_{окр.ср.}$ ). Фактическая температура нагрева токоведущей части аппарата не должна превышать допустимую температуру, и определяется для установившегося состояния из уравнения баланса мощности.

**Длительный режим:** достигается установившееся превышение температуры. Длительный режим работы аппарата, когда по нему сравнительно долго протекает номинальный ток, характеризуется температурой нагрева его токоведущих частей. Металлические токоведущие части либо покрыты изоляционным материалом, либо соприкасаются с деталями, изготовленными из этого материала. Поэтому допустимая температура нагрева токоведущей части определяется минимальной величиной – допустимой температурой нагрева смежной с ней изоляции (она ниже допустимой температуры нагрева металла).

**Кратковременный режим** – за время паузы тока  $t_n$  аппарат охлаждается до  $t_{окр.ср.}$  (практически с разницей 2 -3 градуса)

**Повторно – кратковременный режим** – превышение температуры нагрева  $\tau$  за время паузы тока не успевает снизиться до температуры окружающей среды. Этот режим характеризуется относительно продолжительностью включения.

#### 4. Поверхностный эффект и эффект близости.

При переменном токе наблюдается **поверхностный эффект**. Если проводник тока условно разделить на волокна (рисунок 1), то можно представить, что волокно, расположенное в центре проводника, охвачено всеми магнитными линиями, созданными током, в то время как волокна на периферии охватываются лишь линиями, проходящими вне проводника. Величина реактивных ЭДС, наводимых изменяющимся магнитным потоком, тем больше, чем больше изменяющийся вместе с током магнитный поток. Токи, вызванные этой ЭДС, будут больше в центре проводника, чем на периферии. В результате реактивные токи приведут к тому, что плотность общего тока будет больше на периферии поперечного сечения проводника и меньше в его центре. Чем больше частота тока и меньше удельное сопротивление проводника, тем сильнее проявляется поверхностный эффект и тем больше коэффициент поверхностного эффекта  $K_{нэ}$ . Существенную роль при этом играют форма и размеры проводника – чем больше его диаметр, тем больше поверхностный эффект ( $K_{нэ} \geq 1$ ).

**Эффект близости** – проявляется, когда два проводника с током близко расположены. Магнитный поток, созданный током одного проводника, наводит в другом проводнике реактивные ЭДС. В результате в другом проводнике возникают токи, стремящиеся ослабить вызвавшие их магнитные потоки. Это приводит к тому, что при одинаковом направлении токов в проводниках плотности тока будут меньше в частях проводников, обращенных друг к другу, чем в наружных (рисунок 2 а). При разном направлении токов - плотности тока будут меньше в наружных частях проводников, чем в обращенных друг к другу

(рисунок 2 б). Эффект близости, как и поверхностный эффект, усиливается с частотой тока и электрической проводимостью материала. Коэффициент близости  $K_b$  может быть и меньше единицы, т.к. за счет магнитного поля соседних проводников возможно выравнивание плотности тока по сечению.

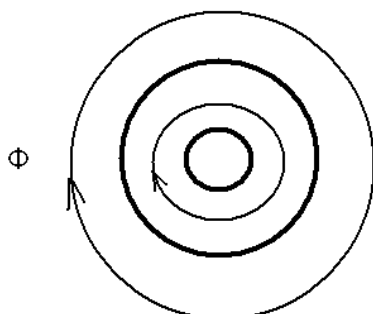


Рисунок 1 – К понятию поверхностного эффекта

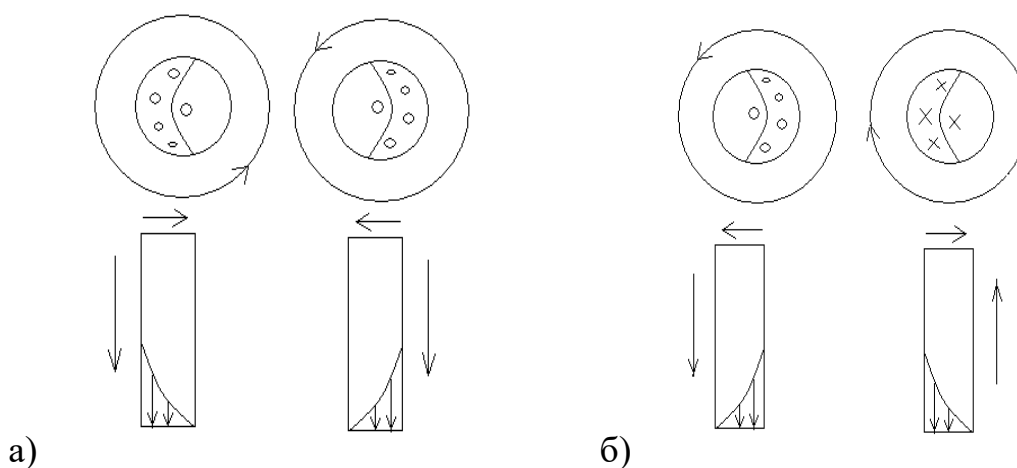


Рисунок 2 – К понятию эффекта близости

В результате проявления этих эффектов изменяется (увеличивается) удельное сопротивление токоведущей части:  $\rho_{экс} = K_{нэ} K_b \rho_0$ .

**Литература:** 1, стр. 5-28; 3, стр.7-10; 4, стр. 5-7; 5, стр. 4-63.

**Контрольные вопросы:**

1. Что называется электрическим аппаратом?
2. Какие виды коммутации Вы знаете?
3. Дайте классификацию электрических аппаратов.
4. В каких режимах могут работать электрические аппараты?
5. В каких случаях возникает поверхностный эффект?
6. В каких случаях возникает эффект близости?

2 Электрические контакты. Материал для контактов. Износ контактов при замыкании и размыкании

**Цель лекции:** уяснить понятие электрического контакта, рассмотреть виды контактов, изучить режимы работы контактов, рассмотреть материалы для изготовления контактов их достоинства и недостатки, уяснить какие явления происходят при замыкании и размыкании контактов.

**План лекции:**

1. Физические явления в электрических контактах.
2. Виды электрических контактов.
3. Параметры контактных конструкций.
4. Явления, происходящие при замыкании и размыкании контактов.
5. Материалы, применяемые для изготовления контактов.

1. Физические явления в электрических контактах.

Электрические аппараты состоят из отдельных деталей (проводников), электрически соединенных между собой.

**Электрический контакт** - соприкосновение тел, обеспечивающее непрерывность электрической цепи.

**Контакты электрической цепи** - части электрической цепи, предназначенные для коммутации и проведения электрического тока. Второе название - *контакт-деталь* (деталь, соприкасающаяся с другой деталью при образовании электрического контакта).

**Электрическое контактирование** - образование и существование электрического контакта (рисунок 3).

Электрическое контактирование - сложное явление, т.к. контактные поверхности всегда имеют некоторую шероховатость и покрыты пленками, образованными на контактных поверхностях воздействием кислорода, воздуха, озона, азота и др. химических компонентов. Пленки имеют толщину до  $10^{-6}$  см и удельное сопротивление  $\rho = 10^5$  Ом·см. Из этого следует что, механическое контактирование осуществляется не по всей поверхности, а лишь в немногих точках. Пленка может быть продавлена силой сжимающей контакты, или пробита под влиянием электрических потенциалов в месте пробоя может образоваться металлический перешеек, проводящий электрический ток.

Явление пробоя пленки при некотором напряжении называется - **фриттингом**.

**Фриттинг:** при пороговом значении напряжения, зависящего от вида и толщины пленки, сопротивление ее резко падает. Происходит электрический пробой пленки, завершающийся образованием в ней тонкого металлического проводника, который может остаться после снятия напряжения (чистометаллическое контактирование).

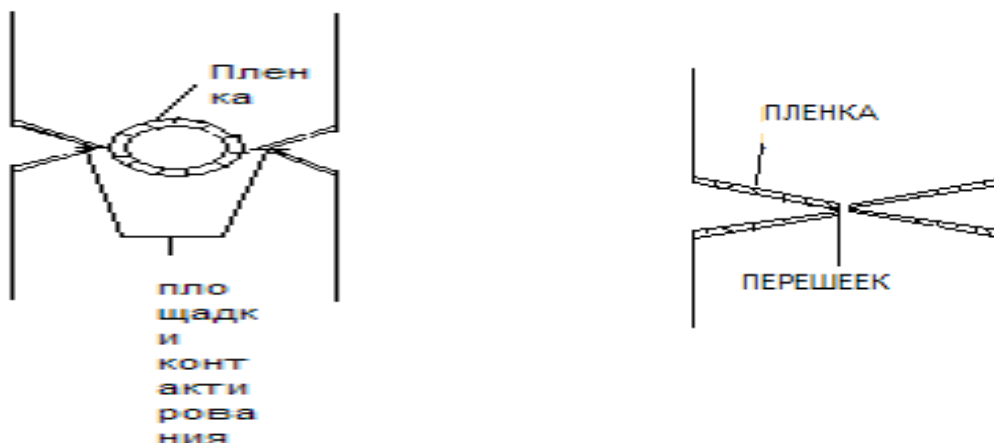


Рисунок 3 – Электрическое контактирование

В местах чистометаллического контактирования развиваются большие силы межмолекулярных и межатомных связей, это явление очень редкое. Такой контакт при значительной площади соприкосновения поверхностей невозможно было бы разорвать теми силами, которые реально существуют в электрических аппаратах. Явления электрического контактирования еще полностью не изучены.

## 2. Виды электрических контактов.

По форме контактирования различают следующие виды контактов:

1. *Точечный электрический контакт* - соприкосновение контакт-деталей происходит в точке (соприкосновение поверхностей: сфера - сфера, сфера - плоскость, вершина конуса - плоскость и т.д.);

2. *Линейный электрический контакт* - соприкосновение контакт-деталей происходит по линии (цилиндр - цилиндр (по образующей), цилиндр - плоскость, виток - виток и т.д.) Физическая картина контактирования - ряд точек-площадок (минимум две), расположенных на одной линии;

3. *Поверхностный электрический контакт* - соприкосновение рабочих поверхностей контакт-деталей происходит по поверхности, т.е. в ряде точек-площадок (минимум в трех), расположенных на этой поверхности (плоскость - плоскость).

**Рабочая поверхность контакт-деталей** - часть поверхности контакт-детали для осуществления электрического контакта. При этом часть рабочей поверхности контакт-детали, по которой происходит соприкосновение с другой контакт-деталью, называют **условной площадью контактирования**, а ту часть условной площади контактирования, по которой электрический ток переходит из одной контакт-детали в другую - **эффективной площадью контактирования**.



Размеры площадок контактирования пропорциональны силе, сжимающей детали, и зависят от соприкосновения смятию материала деталей.

Если две детали контактируют в одной площадке, то ее размер в первом приближении:

$$q = \frac{p}{\delta}, \quad (1)$$

где  $p$ - сила, сжимающая деталь;

$\delta$  - временное сопротивление материала смятию.

Если детали контактируют в  $m$  площадках, то размер каждой площадки определяется уравнением (1), а размер общей площади будет равен сумме размеров отдельных площадок:

$$q_m = \sum_{i=1}^m q_i, \quad (2)$$

Сила сжатия для каждой площадки в первом приближении:

$$p^1 = \frac{p}{m} = \frac{q_m \delta}{m}. \quad (3)$$

С ростом силы сжатия, рост размеров площадок соприкосновения замедляется, начинается осадка всей условной площади контактирования, из этого следует, что увеличение силы сжатия контактов выше определенного предела нецелесообразно.

Многоточечное контактирование обеспечивает более надежный электрический контакт.

Тип контакта определяется его:

- назначением;
- значениями тока и контактного нажатия;
- конструкцией узла и всего аппарата.

**Переходное сопротивление контакта ( $R_{пер}$ )** - электрическое сопротивление в зоне перехода тока из одной детали в другую, оно относительно большое.

Переходное сопротивление контакта определяется сопротивлением суженных участков, по которым проходит ток к площадкам сжатия и сопротивлением узких металлических перешейков, возникающих в следствии фриттинга:

$$R_{пер} = \frac{E}{p^n}, \quad (4)$$

где  $E$ - некоторая величина, зависящая от материала и формы контакта, способа обработки контакта поверхности;

$p$ - сила сжимающая контакты;

$n$ - число точек соприкосновения.

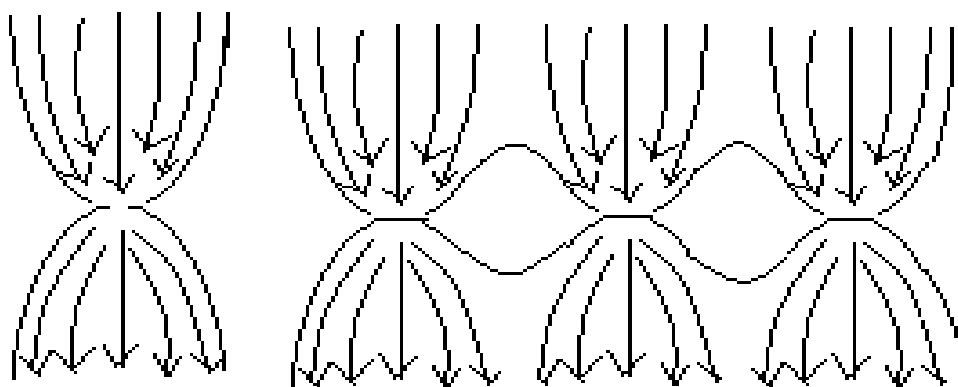


Рисунок 4 – К понятию переходного сопротивления

При увеличении числа точек соприкосновения переходное сопротивление уменьшается. Поэтому, для односточечного контакта принимают  $n = 0,5$ ; для многоточечного  $n = 0,7-1$  (для линейного  $n = 0,7-0,8$ ; для поверхностного  $n = 1$ ).

Значения величины  $E$  зависят от состояния поверхности контактов, способа их обработки и особенно от степени окисления.

Переходное сопротивление зависит от нескольких факторов, а именно:

1. Контактного нажатия. При одном и том же нажатии переходное сопротивление одного и того же контакта при каждом замыкании может быть разным и отличаться в достаточно широких пределах: в больших при малых нажатиях и в меньших при больших нажатиях (более 100 Н), т.к. размер и число площадок контактирования в каждом случае будет разным.

2. Температуры. С увеличением температуры меняется структура бугорков и площадок соприкосновения за счет изменения удельного сопротивления смятию  $\delta$ . С ростом температура  $R_{пер}$  сначала растет, затем при определенной температуре различной для разных металлов происходит резкое снижение свойств материала. При этом же нажатии увеличивается площадка контактирования, переходное сопротивление резко падает, далее  $R_{пер}$  снова возрастает линейно, с ростом температуры и при температуре плавления контакты свариваются и  $R_{пер}$  резко падает.

3. Состояние поверхностей контакта. Шлифовка поверхностей увеличивает, а не уменьшает  $R_{пер}$  по сравнению с поверхностью обработанной напильником, т.к. при шлифовке бугорки становятся более пологими и их смятие затрудняется.

4. Свойств материала контактов. Оксидная пленка возникает при окислении воздухом и при длительном нахождении контактов под током. Оксидные

пленки плохо проводят электрический ток. И проводимость пленок отлична от проводимости чистых металлов и различна для разных металлов. Пленка  $\text{Ag}_2\text{O}$  хорошо проводит электрический ток, а  $\text{CuO}$  - плохо, поэтому разъемные соединения покрывают металлами, свойства оксидных пленок которых по проводимости электрического тока близки к чистым металлам - серебрят, лудят, кадмируют, никелируют или цинкуют.

5. Условной площади контактирования. С увеличением площади рабочей поверхности контакт-детали растет число точек соприкосновения, поэтому  $n$  возрастает и быстро достигает 1.  $R_{\text{пер}}$  мало зависит от размера условной площади контактирования. С увеличением номинального тока ( $I_n$ ) надо увеличивать и внешнюю поверхность контакт-деталей, т.к. с ростом тока растут и потери и для рассеяния требуется большая поверхность.

### 3. Параметры контактных инструкций.

**Зазор контактов** - кратчайшее расстояние между разомкнутыми рабочими поверхностями подвижной и неподвижной контакт-деталей. Зазор контактов выбирается из условия гашения малых токов.

При работе контакты изнашиваются и чтобы обеспечить надежное соприкосновение на длительный срок, кинематика аппарата выполняется следующим образом: контакты соприкасаются раньше, чем подвижная система доходит до упора. Контакт крепится к подвижной системе через пружину. Таким образом, если при замкнутом положении подвижной системы убрать неподвижную, то подвижный контакт сместится на некоторое расстояние, называемое **провалом**. Провал определяет запас на износ контактов при заданном числе срабатываний. При прочих равных условиях больший провал обеспечивает более высокую износостойкость, т.е. больший срок службы. Но больший провал требует более мощной магнитной системы.

**Контактное нажатие** - сила, сжимающая контакты в месте их соприкосновения. Различают начальное нажатие  $P_0$  (провал равен 0) и конечное нажатие  $P_k$  (при полном провале).

$$P_0 = c\Delta l_1; \quad P_k = P_0 + c\Delta l_2, \quad (5)$$

где  $c$  - жесткость контактной пружины;

$\Delta l_1$  - первоначальное сжатие пружины;

$\Delta l_2$  - дополнительное сжатие пружины при выборе провала.

По мере износа контактов уменьшается провал, из этого следует, что и дополнительное сжатие пружины, при этом  $\Delta l_2 \rightarrow \Delta l_1$ .

### 4. Явления, происходящие при замыкании и размыкании контактов.

В процессе замыкания расстояние между контактами постепенно уменьшается, при некотором расстоянии между ними происходит пробой, возникает дуга, которая гаснет при замыкании контактов. Износ от этого

явления следует учитывать в аппаратах на высокое напряжение, в низковольтных аппаратах его можно не учитывать.

**Дребезг контактов** - при приближении к неподвижному контакту подвижный контакт имеет какую-то скорость и при их соприкосновении происходит упругая деформация материала обоих контактов, что приводит к отбросу подвижной части от неподвижной на некоторое расстояние (иногда до 1 мм) под действием контактной пружины. Этот процесс может повторяться несколько раз при затухающей амплитуде. При каждом отбросе между контактами возникает электрический разряд, вызывающий износ.

При размыкании происходит резкое возрастание  $R_{пер}$  и плотность тока в последней площадке контактирования максимальна, из этого следует, что площадка сильно разогревается и между расходящимися контактами образуется контактный перешеек из расплавленного металла, который затем рвется. При этом в промежутке между контактами могут возникнуть различные формы электрического разряда: дуговой или искровой разряд. Под действием высокой температуры дуги или искры и других факторов часть переносится с одного контакта на другой.

## 5. Материалы, применяемые для изготовления контактов.

От материала контакта зависят срок службы и надежность работы.

Требования предъявляемые к материалам контактных соединений:

- высокая электрическая проводимость;
- устойчивость против коррозии;
- оксидная пленка должна быть токопроводимой;
- дугостойкость (высокая температура плавления);
- твердость;
- механическая прочность;
- легкообрабатываемость;
- невысокая стоимость.

Для контактных соединений чаще всего применяют следующие материалы:

1. **Медь** - самый распространенный контактный материал. Недостатки: не обладает коррозионной стойкостью,  $CuO$  имеют низкую проводимость. При малых контактных нажатиях применять не рекомендуется ( $P > 3Н$ )

2. **Серебро** - хороший контактный материал. Недостатки: недугостойкий при значительных токах. Применяется: для главных контактов в аппаратах на большие токи; для всех контактов продолжительного режима; в контактах на малые токи при малых нажатиях. Обычно применяется в виде накладок на металл другого вида.

3. **Алюминий** - по сравнению с медью обладает меньшей проводимостью и механической прочностью. Оксидная пленка плохо проводит ток. Используется: в разборных контактах (шинопроводы, монтажные провода), при этом контактные поверхности серебрятся, меднятся или армируются медью. Не пригоден для коммутирующих контактов.

4. *Платина, золото, молибден* - для коммутирующих контактов на очень малые токи при малых нажатиях. Достоинства: платина и золото не образуют оксидных пленок, переходное сопротивление мало. Для повышения износостойкости применяют сплавы золота с иридием.

5. *Вольфрам и его сплавы* - большая твердость и электрическая износостойкость, высокая температура плавления. Применяют при малых токах с большой частотой размыкания. При средних и больших токах используются в качестве дугогасительных контактов на отключаемые токи до 100 кА и более.

6. *Металлокерамика* - механическая смесь двух практически не сплавляющихся металлов, получается методом спекания смеси их порошков или пропиткой одного расплавом другого. Один металл имеет хорошую проводимость, другой - износостойкость, поэтому обладает высокой дугоустойкостью с относительно хорошей проводимостью. Применяется - для дугогасительных контактов на средние и большие отключаемые токи; для главных контактов на номинальные токи до 600 А.

7. *Жидкометаллические контакты (ЖМК)*. Достоинства: - переходное сопротивление – мало; нет необходимости в контактной нажатии; отсутствие отбрасывающих электродинамических сил в переходном контакте; отсутствие дребезга, сваривания и залипания контактов; возможность работы при больших внешних давлениях, в высоком вакууме, при высоких температурах; высокая механическая и коммутационная износостойкость.

Недостатки: невысокая температура плавления; высокая стоимость жидких металлов и их сплавов; необходимость герметизации контактного узла; зависимость работоспособности от положения в пространстве; токсичность ряда жидких металлов.

**Литература:** 1, стр. 308-332; 2, стр. 88-123; 3, стр. 49-73; 4, стр. 43-68; 5, стр. 105-112.

#### **Контрольные вопросы:**

1. Что называется электрическим контактом?
2. Что называется контактом электрической цепи? Контакт-деталью?
3. Как происходит переход тока из одной контакт детали в другую?
4. Какие существуют виды контактов? Приведите примеры.
5. Перечислите параметры контактных конструкций.
6. Какие явления происходят при замыкании и размыкании контактов?
7. Какие материалы используются для изготовления контактов? Почему? Где применяются?

#### 3 Электрическая дуга. Способы гашения электрической дуги

**Цель лекции:** изучить особенности электрической дуги, способы гашения дуги.

#### **План лекции:**

1. Процесс коммутации электрических цепей.
2. Дуга постоянного и переменного тока.
3. Способы гашения электрической дуги.

### 1. Процесс коммутации электрических цепей.

Большая группа электрических аппаратов представлена коммутирующими устройствами, с помощью которых замыкается, и размыкаются электрическая цепь. Электрический разряд, возникающий при размыкании контактов, приводит к их износу и в значительной степени определяет надежность и долговечность аппарата.

Этот разряд в окружающем контакте газе является либо тлеющим разрядом, либо электрической дугой. Тлеющий разряд возникает при отключении тока менее 0,1 А при напряжении на контактах 250 – 300 В. Такой разряд происходит на контактах маломощных реле, а в более мощных аппаратах является переходной фазой к разряду в виде электрической дуги. Если напряжение и ток в цепи выше значений, указанных в таблице 3.1, то имеет место дуговой разряд, обладающий следующими особенностями:

1. Дуговой разряд имеет место только при относительно больших токах. В таблице 3.3 для металла составляет 0,5 А
2. Температура центральной части дуги очень велика и может достигать 6000 – 25000 К.
3. При дуговом разряде плотность тока на катоде чрезвычайно велика и достигает  $10^2 - 10^3$  А/мм<sup>2</sup>
4. Падение напряжения у катода составляет всего 10 – 20 В и практически не зависит от тока.

Таблица 1- Напряжение и ток возникновения электрической дуги

Материал контакта	U <sub>0</sub> , В	I <sub>0</sub> , А
Платина, вольфрам	17,0	0,9
Золото	15,0	0,38
Серебро	12,0	0,4
Медь	12,3	0,43
Уголь	18 – 22	0,03

В дуговом разряде можно различить 3 характерные области: *околокатодную, область столба дуги (область дугового столба)* и *околоанодную*. В каждой из этих областей процессы ионизации и деионизации протекают по разному.

#### а) Околокатодная область.

Занимает весьма небольшое пространство длиной не более  $10^{-6}$  м. Около катода возникает положительный объемный заряд, создаваемый положительными ионами. Между этим положительным объемным зарядом и катодом создается электрическое поле с напряженностью до 10 В/м, в котором движутся электроны, вышедшие из катода и создающие электрический ток.

Электрическое поле воздействует на электроны, увеличивая их скорость. При соударении такого электрона с нейтральной частицей может произойти ионизация, для этого электрон должен обладать определенной энергией. Разгоняющее напряжение ( $U_i$ ), которое должен пройти электрон для приобретения энергии, необходимой для ионизации, называется **потенциалом ионизации** (для газов этот потенциал колеблется от 24,58 В (гелий) до 13,3 В (водород), пары металлов имеют значительно меньший потенциал ионизации, для паров меди он равен 7,7 В).

Положительные ионы, так же как и электроны, разгоняются электрическим полем, но из-за большой массы скорость их много меньше. При ударе положительного иона о нейтральную частицу меньшая часть энергии передается на ионизацию, так что *ионизация толчком* происходит за счет электронов.

Ввиду малой протяженности околокатодной области электроны не набирают скорости, достаточной для ионизации ударом. Чаще всего после удара атом переходит в *возбужденное состояние* (электрон атома переходит на более удаленную от ядра орбиту). Для ионизации возбужденного атома требуется меньшая энергия. В результате необходимый потенциал ионизации уменьшается. Такая ионизация называется **ступенчатой**. При ступенчатой ионизации необходим многократный удар электронов по атому; на каждый образующийся положительный ион требуются десятки электронов. Поэтому ток около катода, несмотря на наличие положительных ионов, носит электронный характер.

б) *Область дугового столба.*

Энергия, приобретенная заряженными частицами в электрическом поле дугового столба, столь мала, что практически ионизация толчком не происходит. При большой температуре, которая имеет место в области дугового столба, скорость частицы возрастает до значения, при котором удар в нейтральный атом приводит к его ионизации. Такая ионизация называется **термической**.

Основным источником ионов и электронов в столбе дуги являются термическая ионизация. Чем меньше масса частицы, тем больше скорость ее движения. Количество зарядов появляющихся в результате термической ионизации, можно определить с помощью уравнения Саха:

$$\frac{x^2}{1-x^2} \cdot 10^{-5} p = 315,8 T^{2,5} e^{-11600 U_i / T} \cdot 10^{-8}, \quad (6)$$

где  $x$  – степень ионизации, равна отношению числа ионизированных частиц к полному числу атомов в данном объеме;

$p$  – абсолютное давления газа, Па;

$T$  – абсолютная температура газа, К;

$U_i$  – потенциал ионизации, В.

Если  $T = const$ , то учитывая, что  $x^2 \ll 1$ , можно получить:

$$x \cong \frac{1}{\sqrt{p}}. \quad (7)$$

Таким образом, с ростом давления степень ионизации уменьшается. В связи с этим во многих *дугогасящих устройствах* (ДУ) электрических аппаратов создается повышенное давление газа, что способствует гашению дуги. Очень сильное влияние на ионизацию оказывает температура. Поэтому в ДУ необходимы меры против попадания металлических паров электродов в столбе дуги (уменьшение сечения плавких вставок предохранителей, перемещение дуги по электродам, уменьшать температуру электродов и их испарение и др.)

Поскольку степень ионизации определяется температурой во всех ДУ стремятся отводить тепло от дуги за счет, либо охлаждением движущимся воздухам или газом (воздушные, масляные выключатели), либо отдачи тепла стенкам дугогасительной камеры.

Наряду с ионизацией в столбе дуги протекают процессы *рекомбинации* и *деионизации*.

**Рекомбинация** – это нейтрализация частиц за счет соединения ионов с зарядами различных знаков. **Деионизация** в столбе идет за счет диффузии. Вследствие теплового движения частиц выравнивание плотности заряженных частиц, число частиц в столбе дуги уменьшается, сопротивление дугового столба увеличивается.

Процесс ионизации и процесс деионизации в значительной степени определяются температурой дугового промежутка. Деионизация зависит от количества тепла, выделяемого в дуге и отводимого от дуги. Охлаждение дуги происходит за счет излучения, теплопроводности и конвекции.

в) *Околоанодная область*.

Поток электронов из столба дуги устремляется к положительному электроду – аноду. Анод при дуговом разряде не излучает положительных ионов, которые могли бы нейтрализовать электроны. Поэтому вблизи анода создается отрицательный объемный заряд, что и вызывает появление околоанодного падения напряжения и повышает напряженность электрического тока. Околоанодные падения напряжения зависят от температуры анода, его материала и значения тока.

Высокая температура анода и околоанодная область не оказывают существенного влияния на возникновения и условия существования дугового разряда. Роль анода сводится к приему электронного потока из дугового столба.

В некоторых аппаратах низкого напряжения длина дуги невелика. Падения напряжения на столбе дуги мало по сравнению с суммой падения напряжения у катода и анода. Такие дуги называются **короткими**. Условие гашения короткой дуги в значительной степени определяется процессами, происходящими у электродов, и условиями их охлаждения. В аппаратах высокого напряжения падение напряжения на столбе дуги значительно больше



околоэлектродных и последними можно пренебречь. Условие существования таких дуг, называемых *длинными* определяется процессами в столбе дуги.

## 2. Дуга постоянного и переменного тока.

### *Дуга постоянного тока.*

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) дуги является важнейшей характеристикой. Представляет собой зависимость напряжения на дуге от тока. С ростом тока увеличивается температура дуги, усиливается термическая ионизация, возрастает число ионизированных частиц в разряде и падает электрическое сопротивление дуги  $r_d$ . Напряжение на дуге равно  $ir_d$ . При увеличении тока сопротивления дуги  $r_d$  уменьшается так резко, что напряжение на ней падает, несмотря на рост тока. ВАХ дуги снятая при медленном изменении тока, называется *статической*. Статическая характеристика дуги зависит от расстояния между электродами (длины дуги) материалов электродов, параметров среды и условий охлаждения. Напряжение на дуге  $U_d$  можно рассмотреть как сумму около электродных падений напряжений  $U_э$  и падений напряжения в столбе дуги:

$$U_d = U_э + E_n l, \quad (8)$$

где  $E_n$  – напряжение электрического поля в столбе дуги

$l$  – длина столба дуги

Чем больше длина дуги, тем выше лежит ее статическая ВАХ. В электрических аппаратах применяются все меры к тому, чтобы дуга гасла в минимальное короткое время. Это возможно за счет поднятия ВАХ, либо увеличения сопротивления дуги. ВАХ дуги может быть поднята, в результате увеличения длины дуги, интенсивного охлаждения и повышения давления среды, в которой горит дуга. При замкнутых контактах дуга отсутствует. При разведении контактов между ними возникает дуга. При возрастании сопротивления создается условие для гашения дуги.

Токи и сопротивления, при которых наступают условия для гашения дуги, называют *критическими*.

Увеличение напряжения на контактах относительно напряжения источника питания называется перенапряжением. Скорость тогда тока зависит от скорости роста сопротивления дугового промежутка и скорости его деионизации. Поэтому быстродействующие аппараты, отключают цепь тока за сотые доли секунды возможны большие перенапряжения.

ВАХ дуги при быстром изменении тока называется *динамической*.

В дуговом промежутке выделяется вся энергия, полученная от источника питания за вычетом потерь в активном сопротивлении, и вся электромагнитная энергия накопленная в отключаемой дуге. Для всех аппаратов с ДУ энергия, поступающая в дугу от источника питания, составляет всего 3-5% энергии дуги. Остальная часть 95-97%, приходится на электромагнитную энергию отключаемого контура. Энергия, выделяемая в дуге, тратится на нагревание

разряда и окружающего пространства. Для гашения дуги необходимо, чтобы температура разряда уменьшалась, т.е. количество энергии подводимой к дуге, было меньше количества тепла, отводимого от нее. При отключении цепи с большой индуктивностью выделяемую в дуге электромагнитную энергию необходимо отвести охлаждением. Чем больше индуктивность в цепи и отключаемый ток, тем труднее отключить цепь. Если цепь чисто активная, и дуга горит до тех пор, пока напряжение на дуге не достигнет напряжения источника питания. Энергия, выделяемая в дуге:

$$A_0 = \int_0^{t_0} u i dt - \int_0^{t_0} i^2 R dt . \quad (9)$$

Эта энергия выделяется в дуге как в чисто активном сопротивлении и равна разности энергии, выделенной источником и энергии потерь в резисторе.

#### *Дуга переменного тока.*

При частоте  $f = 50$  Гц, ток в дуге меняется достаточно быстро, и происходящие в ней процессы необходимо рассматривать с помощью динамической ВАХ. При синусоидальном токе напряжение на дуге сначала поднимается, затем в связи с ростом тока падает. После прохождения тока через максимум динамики ВАХ поднимается в связи с уменьшением тока. При высокой частоте форма напряжения на дуге приближается к форме тока.

В процессе гашения дуги число заряженных частиц в области дугового промежутка уменьшается, и его сопротивление после гашения дуги резко возрастает. При этом возрастает *и электрическая прочность промежутка*, т.е. напряжение, при котором происходит его электрический пробой.

### 3. Способы гашения электрической дуги.

Задача дугогасительных устройств (ДУ) состоит в том, чтобы обеспечить гашение дуги за малое время с допустимым уровнем перенапряжений при малом износе частей аппарата, при минимальном объеме раскаленных газов, с минимальным звуковым и световым эффектами.

а). В электрических аппаратах низкого напряжения наиболее широко применяются *ДУ с узкой щелью*. Перемещение дуги в этой камере осуществляется с помощью магнитного поля. Положительной характеристикой дугогасительной камеры является зависимость градиента  $E_n$  от ширины щели  $\delta$  и тока. Для каждого значения  $\delta$  меняется ток и напряжение магнитного поля  $H$ . Значение  $\delta = \infty$  относится к открытой свободной горящей в воздухе дуге. Следует отметить, что при уменьшении ширины щели  $\delta$  возрастает сопротивление движения дуги. Магнитная система ДУ должна исключать возможность остановки дуги, т.к. это приводит к разрушению керамики и отказу ДУ.

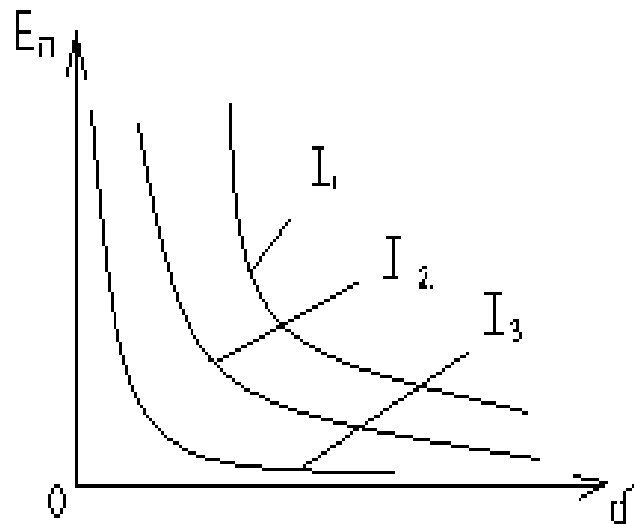


Рисунок 5 - Зависимость продольного графика от ширины щели  $\delta$   
 $(I_1 > I_2 > I_3, H = \text{const})$

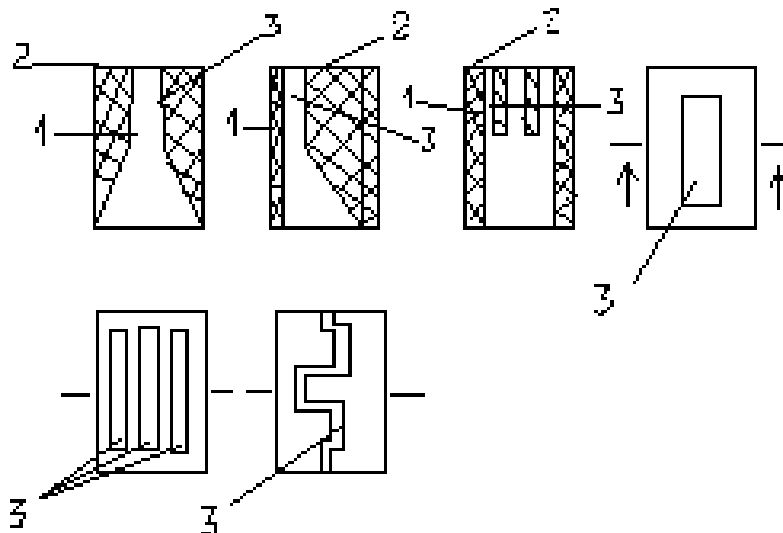


Рисунок 6 - Наиболее характерные формы щели в керамических  
пластинах ДУ: 1,2 - зона наибольшего охлаждения дуги, 3 – продольная щель, в  
которую направляется дуга, 4 – расширение, облегчающее вхождение дуги в  
камеру, 5 - местные уширения в цепи

Когда дуга под воздействием магнитного поля затягивается в зигзагообразную узкую щель, увеличивается ее длина. При этом возрастают градиент  $E_n$  за счет охлаждения, благодаря тесному контакту дуги с

керамическими стенками щели. Раскаленные газы, выбрасываемые из ДУ после гашения дуги, приводят к возникновению к.з. Поэтому на пути этих газов устанавливают решетку из металлических пластин. Газы, проходя через эту решетку, деонируются, охлаждаются, а опасная зона их выброса резко сокращается.

б). *Перемещение дуги под воздействием магнитного поля.*

Сила взаимодействия между током дуги и магнитным полем перемещает дугу, создавая так называемое магнитное дутье. Различают: ДУ с последовательной катушкой и ДУ с параллельной катушкой. При перемещении дуги она охлаждается и гаснет.

в). *Гашение дуги с помощью дугогасительной решетки.*

В дугогасительной решетке для гашения дуги используется околоэлектродное падение напряжения (в аппаратах постоянного тока) и околокатодная электрическая плотность (в аппаратах переменного тока)

После расхождения контактов 1 и 2, возникает между ними дуга 3, под воздействием магнитного поля движется вверх на пластины 5 и разбивается на ряд коротких дуг 4. На каждой пластине образуется анод и катод. Падение напряжения на каждой паре пластин составляет 20 - 25 В. При большом числе пластин удается поднять статическую ВАХ дуги и обеспечить условия ее гашения. Способ предложен в начале XX века и до сих пор широко применяется.

На переменном токе  $f = 50$  Гц применяются ферромагнитные пластины. Сила, действующая на дугу, перемещает ее и препятствует выходу дуги из нее. Выход дуги из решетки увеличивает магнитное сопротивление, уменьшает поток, что вызывает появление силы, стремящейся втиснуть дугу в решетку. Это является большим достоинством ферромагнитных пластин. Недостаток является прогорание пластин в повторно-кратковременном режиме при токе 600А и более. Для уменьшения коррозии пластины покрываются медью или цинком.

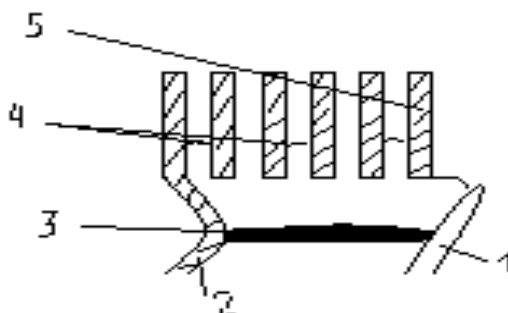


Рисунок 7 – Гашение дуги с помощью дугогасительной решетки

г). *Гашение дуги высоким давлением.*

На этом принципе основано гашение дуги в предохранителях и других аппаратах низкого напряжения. Внутри объем предохранителя герметизирован. При перегорании плавкой вставки дуга загорается и выделяет энергию, которая расходуется на повышение давления во внутреннем объеме предохранителя. В некоторых аппаратах (предохранители, пакетные выключатели), стенки дугогасительной камеры делаются из газогенерирующих материалов, которые называются *фибры*. Благодаря фибрам такие стенки выделяют газ, и давление в объеме поднимается до 10-15 МПа. Из-за резкого подъема напряжения на дуге ток обрывается до своего естественного нуля, не достигнув максимального значения. В таких аппаратах проявляется эффект токоограничения.

д). *Гашение дуги в потоке сжатого газа.*

В электрических аппаратах высокого напряжения коммутируются токи в десятки килоампер при напряжении до  $10^6$  В. Для гашения таких дуг используется воздействие на электрическую дугу потока сжатого воздуха или других газов. Сжатый воздух обладает высокой плотностью и теплопроводностью. Омывая дугу с большой скоростью, он охлаждает ее и при прохождении тока через нуль обеспечивает деионизацию дугового столба. Воздух при высоком давлении обладает высокой электрической прочностью, это создает высокую скорость нарастания электрической прочности промежутка.

е). *Гашение дуги в трансформаторном масле.*

Дугогасительная камера выполняется из прочного изоляционного материала (гетинакса или стеклотекстолита) и расположена в трансформаторном масле. При отключении подвижный контакт перемещается вниз и между ним и неподвижным контактом загорается дуга. Под действием энергии дуги происходит взрывообразное разложение масла на водород (обладает высокой теплопроводностью и является одной из лучших дугогасящих сред) и газы в виде паров масла. Температура масла достигает 2000-3000 К. За сотые доли секунды давление поднимается до 2-4 МПа. Образующийся пузырь стремится вырваться из камеры через щель, при этом происходит эффективное охлаждение дуги потоками газа, вытекающими из камеры со скоростью звука. Давление и эффективность гашения дуги зависят от ее энергии, то чем больше отключаемый ток, тем быстрее происходит гашение.

ж). *Гашение дуги в вакуумной среде.*

В вакуумном ДУ контакты расходятся в среде с давлением  $10^{-4}$  Па ( $10^{-6}$  мм рт.ст.), при котором плотность воздуха мала. Длина свободного пробега молекулы достигает 50 м, а электрона 300 м. При таких условиях электрический пробой между электродами затруднен из-за отсутствия носителей зарядов. Пробивное напряжение промежутка длиной 1мм в вакууме достигает 100 кВ.

з). *Гашение электрической дуги с помощью полупроводниковых приборов.*

Бесконтактная коммутация. При большом числе коммутаций в час возрастает износ контактов при обычной дуговой коммутации. Для повышения

износостойкости контактов используются полупроводниковые приборы - тиристоры, транзисторы и диоды.

**Литература:** 1, стр. 236-246, 332-344; 2, стр. 123-182; 3, стр. 73-108; 4, стр. 68-108; 5, стр. 84-104.

**Контрольные вопросы:**

1. Какими особенностями обладает электрическая дуга?
2. Какие области можно выделить в электрической дуге?
3. Какие процессы происходят в каждой области дугового разряда?
4. Назовите особенности гашения дуги постоянного и переменного тока.
5. Какие способы гашения дуги Вы знаете? В чем их особенности?

4 Электромагниты

**Цель лекции:** уяснить понятие электромагнита, виды электромагнитов, ознакомиться с методами расчета магнитных цепей.

**План лекции:**

1. Основные положения теории магнитных цепей. Расчет магнитных цепей.
2. Тяговые силы в электромагнитах. Динамика электромагнита.
3. Постоянные магниты и магниты переменного тока.
4. Обмотки электромагнитов.

1. Основные положения теории магнитных цепей. Расчет магнитных цепей.

Электромагнит предназначен для создания механической силы притяжения между стальными полюсами за счет магнитного потока, создаваемого протекающим по обмотке током. Эта сила называется *электромагнитной* или *тяговой*. Электромагниты используются как приводные элементы электрических аппаратов и как самостоятельные аппараты. Решение задач по расчету электромагнитов можно получить на основе теории электромагнитного поля, но методы расчета полей (особенно двух- и трехмерных) разработаны недостаточно, поэтому более доступными являются методы расчета магнитных цепей, базирующиеся на замене магнитной системы электрической схемой замещения. Однако эти методы неточны, т.к. для упрощения вычислений их стремились свести к несложным формулам.

Магнитные силовые линии обладают двумя видами сил: в продольном направлении они развивают силы «продольного тяжения»  $F_{n.m.}$ , а в поперечном – силы бокового распора  $F_b$  (рисунок 8). Первые приводят к появлению электромагнитной силы, определяются свойством силовых линий замыкаться по кратчайшему пути. Вторые силы противодействуют этому и создают «выпучивание» магнитного потока в боковом направлении.

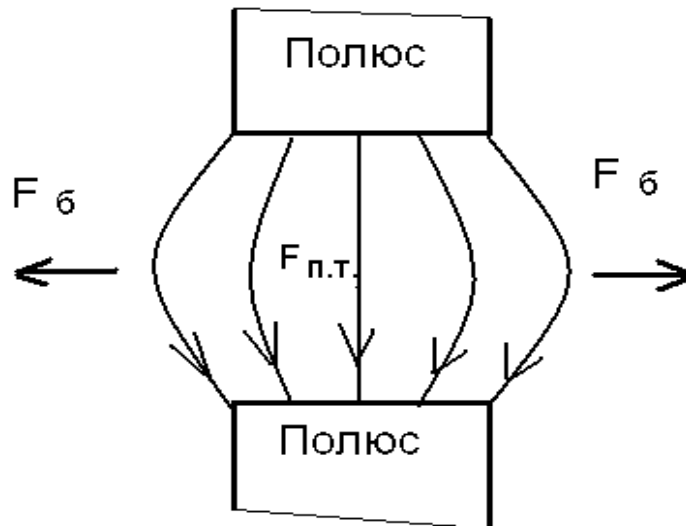


Рисунок 8 – Магнитные силовые линии между полюсами

Магнитопровод  $M$  и якорь  $Я$  изготовлены из магнитного материала (стали), обладающего малым магнитным сопротивлением, это позволяет увеличить *рабочий магнитный поток*  $\Phi_{\delta}$  в воздушных зазорах 1 и 2 (рабочие зазоры), имеющих более высокие магнитные сопротивления по сравнению с сопротивлением стали. Часть магнитного потока  $\Phi_{\sigma}$ , которая не замыкается через рабочие зазоры и в отличие от потока  $\Phi_{\delta}$  не создает электромагнитной тяговой силы на якоре, называется *поток рассеяния*. Магнитные потоки создаются током  $I$ , протекающим по катушке. Произведение тока на число витков катушки  $\omega$  определяет намагничивающую силу (намагничивающие ампервитки) катушки. В таблице 2 приведена аналогия между параметрами электрических и магнитных цепей.

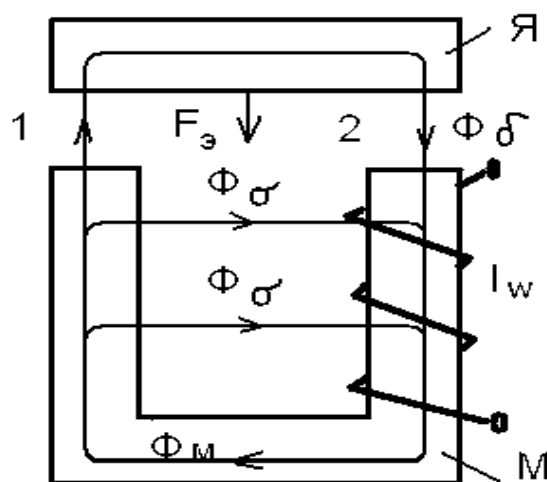


Рисунок 9- Магнитная цепь

Таблица 2 - Аналогия между параметрами электрических и магнитных цепей

Магнитная цепь	Электрическая цепь
Магнитный поток $\Phi$ , Вб	Ток $I$ , А
Намагничивающая сила $I\omega$ , А	Напряжение $U$ , В
Индукция $B$ , Т (1 Т = $10^4$ Гс = 1 Вб/м <sup>2</sup> )	Плотность тока $j$ , А/см <sup>2</sup>
Напряженность магнитного поля $H$ , А/см	Напряженность электрического поля $E$ , В/см
Магнитная проницаемость $\mu$ , Г/см	Удельная электропроводность $\sigma$ , 1/(Ом·см)
Удельное магнитное сопротивление $\rho_m$ , см/Г	Удельное электрическое сопротивление $\rho_e$ , Ом·см
Магнитное сопротивление $R_m$ , 1/Г	Электрическое сопротивление $R_e$ , Ом
Магнитная проводимость $G_m$ , Г	Электрическая проводимость $G_e$ , 1/Ом

Для магнитных цепей справедливы следующие зависимости: Первый и второй законы Кирхгофа, закон Ома для магнитной цепи, закон полного тока.

Для определения магнитной проницаемости стальных участков магнитопровода используются экспериментальные кривые намагничивания. В динамических режимах магнитное состояние ферромагнитных материалов характеризуется не основной кривой намагничивания, а петлями гистерезиса. Площадь петель гистерезиса и их ширина для данного материала меняются при определенных условиях, например, при переменном магнитном поле ширина петли гистерезиса увеличивается с ростом частоты источника питания и увеличением толщины листов материала магнитопровода. Площадь петли гистерезиса за один магнитный цикл определяет удельные потери на гистерезис (Дж/см<sup>3</sup>):

$$W_z = \int_{-H_x}^{+H_x} B dH, \quad (10)$$

где  $H_x$  – максимальные абсолютные значения напряженности поля, соответствующие вершинам петли гистерезиса.

Магнитные характеристики материалов, определяемые петлями гистерезиса, имеют важное значение для электромагнитов переменного тока. В электроаппаратостроении используются *ферросплавы* (в состав которых входит в основном железо *Fe*) и *ферриты* (неметаллические прессованные материалы из смеси окислов железа с окислами никеля, свинца, цинка и других элементов, подвергающиеся отжигу в процессе изготовления при температуре от 1100 °С до 1400 °С). К ферросплавам относятся: *электротехнические стали* (сплавы железа в основном с кремнием, от 0,5% до 4,5%) и *пермаллои* (сплавы железа в основном с никелем).



Магнитная проводимость воздушного зазора определяется структурой магнитного поля между полюсами. В условиях однородного магнитного поля проводимость между полюсами площадью  $S$  при расстоянии  $\delta$  между ними:

$$G_{\delta} = \frac{\mu_0 S}{\delta}. \quad (11)$$

Нередко магнитное поле между полюсами представляют в упрощенном виде и магнитную проводимость определяют как совокупность проводимостей элементарных фигур (метод вероятных путей потока), на которые разбито пространство между полюсами: параллелепипед, полуцилиндр, полый цилиндр, сферический квадрант, квадрант сферической оболочки, тела вращения. Проводимость между полюсами сложной формы определяют по картине магнитного поля. При заданных размерах воздушного зазора и полюсов картина магнитного поля в масштабе строится на графике с соблюдением правил:

- 1) эквипотенциальные магнитные линии пересекаются друг с другом под прямыми углами;
- 2) силовая линия выходит с плюса под прямым углом;
- 3) силовая линия, выходящая из тупого или острого угла делит угол пополам;
- 4) средняя длина и ширина образующихся при построении криволинейных прямоугольников равны друг другу.

Второе и третье правила означают, что поверхности полюсов считаются эквипотенциальными и материал их имеет бесконечную магнитную проводимость.

*Расчет магнитных цепей* при заданных размерах сводится к определению или: 1) намагничивающей силы катушки при известном рабочем воздушном потоке, создающем тяговую силу (*прямая задача*); 2) воздушного потока при заданной намагничивающей силе катушки (*обратная задача*). По геометрическим размерам магнитопровода и полюсов рассчитываются магнитные проводимости рабочих воздушных зазоров, проводящих рабочий поток и проводимости рассеяния.

Магнитные сопротивления, магнитные потоки, индукции и напряженности поля на разных участках магнитопровода неодинаковы, следовательно, неодинаковы магнитные проницаемости материала. Все вышперечисленное, большое разнообразие геометрических форм электромагнитных систем и сложные картины магнитных полей в воздушных пространствах около них затрудняют расчет. При расчете магнитных цепей применяются следующие методы:

- 1) метод расчета по участкам – магнитная цепь разбивается на ряд участков и составляется схема ее замещения;
- 2) аналитический метод – в широком диапазоне индукции магнитное сопротивление электротехнических сталей изменяется мало и в приближенных расчетах его можно принять постоянным, что упрощает расчет;

3) расчет по коэффициентам рассеяния – разность потенциалов относительно двух точек определяется по характеру изменения магнитного потока в соответствии с дифференциальным уравнением магнитной цепи:

$$\frac{-d\Phi_x}{dx} = u_x g. \quad (12)$$

Изменение магнитного потока по длине магнитопровода вызвано потоками рассеяния.

**Коэффициент рассеяния**  $\sigma_x$  - отношение полной величины магнитного потока  $\Phi_x$ , проходящего через данное сечение магнитопровода, к потоку в рабочем воздушном зазоре  $\Phi_\delta$ . Разница между этими потоками равна потоку рассеяния  $\Phi_{\sigma x}$  в этом сечении, то:

$$\sigma_x = \frac{\Phi_x}{\Phi_\delta} = \frac{(\Phi_\delta + \Phi_{\sigma x})}{\Phi_\delta} = 1 + \frac{\Phi_{\sigma x}}{\Phi_\delta}. \quad (13)$$

## 2. Тяговые силы в электромагнитах. Динамика электромагнита.

Элементарная механическая работа, совершаемая *тяговой силой*  $F_\delta$  на пути  $d\delta$ , равна изменению магнитной энергии в воздушном зазоре  $dW_{\delta}$ . Отсюда величину электромагнитной силы определяют следующим образом:

$$F_\delta = \frac{dW_{\delta}}{d\delta}. \quad (14)$$

*Статическая тяговая характеристика* электромагнита – зависимость электромагнитной силы от величины воздушного зазора. Характер этой зависимости определяется степенью влияния величины зазора на проводимость зазора и ее производную по величине зазора. При изменении зазора и его магнитной проводимости изменяются магнитные потоки в системе, индукция и магнитное сопротивление стали. В результате число ампервитков  $(I\omega)_\delta$ , приходящиеся на рабочий воздушный зазор, также изменяется.

В некоторых типах электромагнитов тяговая сила может развиваться не только рабочим магнитным потоком, проходящим через полюса в воздушном зазоре, но и потоками рассеяния. Это относится к электромагнитам, у которых якорь и рабочий воздушный зазор располагаются внутри катушки. В электромагнитах броневого типа (рисунок 10) катушка  $K$  окружена стальным магнитопроводом  $M$ , а якорь  $Я$  выполнен в виде сердечника, втягивающегося во внутрь катушки. Благодаря силам бокового распора магнитные силовые линии потока рассеяния приобретают в этом электромагните такое направление, при котором появляется составляющая, направленная согласно с силой от рабочего потока. Поэтому такие электромагниты имеют более пологую тяговую характеристику и могут развивать большие и мало изменяющиеся силы при большом ходе якоря.

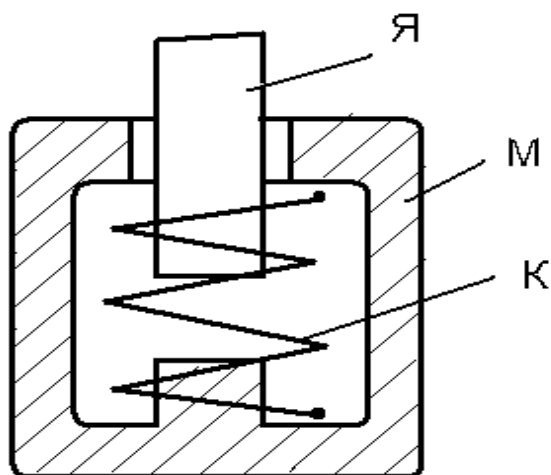


Рисунок 10 - Электромагнит броневое типа

Процесс срабатывания электромагнита при подаче напряжения на его катушку можно разделить на две стадии:

1) *стадия трогания* - нарастание тока в катушке и магнитного потока  $\Phi$  от нуля до величин, при которых электромагнитная сила станет равной противодействующей  $F_n$ . В этой стадии якорь находится в отпущенном состоянии и рабочий воздушный зазор максимальный;

2) *движение якоря* от начального положения до его остановки у неподвижного полюса. В этой стадии электромагнитная сила, как правило, всегда превышает противодействующую силу  $F_n$  и рабочий воздушный зазор уменьшается от начального  $\delta_0$  до конечного  $\delta_{\text{кон}}$ ,  $\delta_0 > \delta_{\text{кон}}$ . После остановки якоря может продолжаться неустановившийся процесс роста тока в катушке до установившегося его значения.

Время срабатывания электромагнита:

$$t_{\text{сраб}} = t_1 + t_2, \quad (15)$$

где  $t_1$  – время первой стадии;  $t_2$  – время второй стадии.

Время срабатывания быстродействующих электромагнитов не более 0,05с.; для обычных электромагнитов – примерно 0,15с.; для замедленно действующих электромагнитов – более 0,25с.

### 3. Постоянные магниты и магниты переменного тока.

**Постоянные электромагниты** обладают свойством длительно сохранять остаточную намагниченность и изготавливаются из магнитоно-твердых материалов, характеризующихся широкой петлей гистерезиса и обладающих в намагниченном состоянии большим запасом магнитной энергии. Важнейшей характеристикой таких материалов является участок петли гистерезиса,

расположенный во втором квадранте (между положительной осью индукции  $B$  и отрицательной осью напряженности поля  $H$ ) и называемый *кривой размагничивания*. Постоянный магнит создает в воздушном зазоре магнитопровода магнитное поле с энергией, пропорциональной произведению индукции на напряженность поля в рабочей точке.

В отличие от электромагнита постоянного тока катушка **электромагнита переменного тока** обладает как активным, так и индуктивным электрическим сопротивлением. Переменный ток, протекающий по катушке электромагнита, приводит к изменению во времени всех других зависящих от него величин, их взаимосвязь во многом определяется кривой намагничивания стального материала магнитопровода, имеющей выраженный нелинейный характер. При синусоидальном изменении напряжения на катушке характерные для электромагнита другие величины оказываются несинусоидальными, содержащими высшие гармонические составляющие. Если режим работы магнитопровода не достигает насыщенного состояния, что в ряде случаев целесообразно для уменьшения потерь на вихревые токи и перемагничивание, то зависимость между индукцией и напряженностью можно приближенно считать линейной.

#### 4. Обмотки электромагнитов.

*Обмотки напряжения (параллельные или шунтовые)* включаются на полное напряжение источника оперативного тока и имеют сравнительно высокое сопротивление (до сотен и тысяч Ом). *Токовые обмотки (последовательные или серийные)* включаются в цепь последовательно с основным сопротивлением нагрузки. Чтобы сопротивление токовых обмоток не изменяло величину тока нагрузки цепи, оно должно быть значительно меньше основного сопротивления нагрузки.

*Каркасные обмотки* выполняются на специальных каркасах, изготовленных из твердого материала, пропитываются изоляционными составами, затвердевание которых позволяет сохранять форму обмоток.

При диаметре провода более 0,3 мм удастся выполнить упорядоченную (рядовую) намотку – шаговую или шахматную. Существует также нерядовая намотка, так называемая «дикая». Степень заполнения обмоточного пространства характеризуется *коэффициентом заполнения  $K_3$* :

$$K_3 = \left( \frac{\omega S_0}{S_{об}} \right) < 1, \quad (16)$$

где  $\omega$  – число витков обмотки;  $S_0$  – поперечное сечение провода (без изоляции);

$S_{об}$  – площадь обмоточного окна.

**Литература:** 1, стр. 92-129; 2, стр. 183-244; 4, стр. 109-127; 5, стр. 114-192.

### Контрольные вопросы:

1. Какая сила называется электромагнитной или тяговой?
2. Какая сила называется силой тяжения, а какая силой бокового распора?
3. Какой поток называется рабочим, а какой потоком рассеяния?
4. Сопоставьте параметры магнитной и электрической цепей.
5. Какие материалы используются в электроаппаратостроении для электромагнитов?
6. Какие методы расчета магнитных цепей Вы знаете? В чем они заключаются?
7. Каково достоинство электромагнитов броневое типа?
8. Какой электромагнит называется постоянным электромагнитом и какова его важнейшая характеристика?
9. В чем отличие электромагнита переменного тока от электромагнита постоянного тока?
10. Как называются обмотки напряжения? Как они включаются в цепь?
11. Как называются токовые обмотки? Как они включаются в цепь?
12. Какие обмотки называются каркасными? В чем их особенность?
13. Как производят намотку катушек электромагнита?

### 5 Аппараты высокого напряжения

**Цель лекции:** ознакомиться с разновидностями электрических аппаратов высокого напряжения и сферами их применения.

#### План лекции:

1. Назначение и классификация электрических аппаратов высокого напряжения (ЭАВН).
2. Параметры ЭАВН.
3. Условия работы ЭАВН.
4. Классификация изоляционных конструкций.

1. Назначение и классификация электрических аппаратов высокого напряжения (ЭАВН).

К *электрическим аппаратам высокого напряжения (ЭАВН)* относят аппараты, рассчитанные на длительную работу при номинальных напряжениях более 1000 В.

Электрические аппараты высокого напряжения в соответствии с выполняемыми ими функциями подразделяются на:

1. **Коммутационные аппараты**, предназначенные для размыкания и замыкания электрической цепи:

- *разъединители* – предназначены для включения и отключения участков электрических цепей под напряжением при отсутствии нагрузочного тока (различают разъединители: рубящего типа, поворотного типа, качающегося типа, скользящего типа);

- *отделители* – предназначены осуществлять под действием защиты быстрое автоматическое отключение поврежденных участков цепи в момент отсутствия в ней тока, т.е. в период бестоковой паузы;

- **заземлители** – предназначены для заземления отдельных участков электрической цепи;

- **короткозамыкатели** – предназначены для создания под действием защиты быстрого автоматического к.з. электрической цепи при повреждениях в ней;

- **выключатели нагрузки** – комбинация несложного дугогасительного устройства с разъединителем;

- **предохранители** – с помощью металлических плавких элементов обеспечивают защиту установок высокого напряжения от токов к.з. и недопустимой перегрузки (различают предохранители – однократного действия и многократного действия);

- **выключатели** – предназначены для оперативных замыканий и размыканий цепей высокого напряжения при номинальных режимах работы и автоматического размыкания этих цепей при аварийных режимах (по способу гашения дуги различают выключатели: масляные (баковые и маломасляные), воздушные, автопневматические, автогазовые (газогенерирующие), выключатели со сжатым элегазом, электромагнитные, вакуумные).

## **2. Ограничивающие аппараты:**

- **токоограничивающие реакторы** – предназначены для ограничения токов к.з. в мощных цепях высокого напряжения и поддержания определенного уровня напряжения в момент к.з.;

- **разрядники** – обеспечивают защиту цепей высокого напряжения от воздействия больших величин напряжений (перенапряжений).

**3. Аппараты, предназначенные для питания измерительных цепей, цепей релейной защиты, автоматики и сигнализации, для изоляции их от высокого напряжения:**

- **трансформаторы тока;**

- **трансформаторы напряжения.**

По климатическому исполнению ЭАВН разделяются на аппараты, предназначенные для эксплуатации в макроклиматических районах:

- **на суше, реках и озерах**

с умеренным климатом - Y(N);

с умеренным и холодным - УХЛ (NF);

с влажным тропическим - ТВ (TH);

с сухим тропическим - ТС (TA);

- **общетропическое исполнение**

с сухим и влажным тропическим климатом - Т (T);

- **общеклиматическое исполнение**

с любым климатом на суше, кроме очень холодного - О (U);

- **с морским климатом**

с умеренно-холодным морским - М (M);

с тропическим морским, в том числе и для судов каботажного плавания – ТМ (MT);

как с умеренно-холодным морским, так и с тропическим морским, в том числе для судов неограниченного района плавания - ОМ (MUJ);

**- всеклиматическое исполнение**

во всех районах на суше и море, кроме районов с очень холодным климатом - В(W).

Латинские буквы, стоящие в скобках, соответствуют обозначениям климатических районов, принятым в странах СЭВ.

**По месту установки аппарата** в эксплуатации ЭАВН подразделяются на пять укрупненных категорий размещения:

- категория 1 - на открытом воздухе;

- категория 2 - под навесом или в помещениях, где колебания температуры и влажности воздуха несущественно отличаются от колебаний их на открытом воздухе и имеется сравнительно свободный доступ наружного воздуха, например в палатках, кузовах, прицепах, металлических помещениях без теплоизоляции, в оболочке комплектного изделия категории 1 (отсутствие прямого солнечного излучения и атмосферных осадков);

- категория 3 - в закрытых помещениях (объемах) с естественной вентиляцией без искусственно регулируемых климатических условий, где колебания температуры и влажности воздуха и воздействие песка и пыли существенно меньше, чем на открытом воздухе, например в металлических помещениях с теплоизоляцией, каменных, бетонных и деревянных помещениях (существенное уменьшение воздействия солнечной радиации, ветра, атмосферных воздействий, отсутствие росы);

- категория 4 - в помещениях (объемах) с искусственно регулируемыми климатическими условиями, например в закрытых отапливаемых или охлаждаемых и вентилируемых производственных или других помещениях, в том числе и хорошо вентилируемых подземных (отсутствие прямого солнечного излучения, атмосферных осадков, ветра, песка и пыли, наружного воздуха, отсутствие или уменьшение рассеянного солнечного излучения и конденсации влаги);

- категория 5 - в помещениях (объемах) с повышенной влажностью, например в неотапливаемых и невентилируемых подземных помещениях, в том числе в шахтах, подвалах, почве, в судовых, корабельных и других помещениях, в которых возможно длительное присутствие воды или частая конденсация влаги на стенах и потолке.

Кроме укрупненных категорий размещения имеются дополнительные, например, категория 1.1 - до эксплуатации в помещениях категории 4, а работа как в условиях категории 4, так и в других условиях, в том числе и на открытом воздухе.

Сочетание климатического исполнения и категории размещения называется *видом климатического исполнения* (например, УЗ, ХЛ1 и т.д.). Символы, обозначающие вид климатического исполнения, включаются в обозначение типа изделия, например, разъединитель типа РНД наружной установки на 35 кВ, 2000 А в исполнении У обозначается РНД-35/2000У1.

Аппараты категории размещения 1 называются аппаратами наружной установки, а категорий 3 - 5 - аппаратами внутренней установки. Аппараты категории размещения 2 занимают промежуточное положение.

## 2. Параметры ЭАВН.

Каждый электрический аппарат переменного тока имеет те или иные номинальные параметры, которые могут быть общими для ЭАВН всех видов или присущими только одному либо некоторым из них. Общими номинальными параметрами для всех ЭАВН являются номинальное напряжение и номинальная частота.

**Номинальным напряжением**  $U_{ном}$  - называется самое высокое из стандартных напряжений (линейное), при котором должен работать аппарат. Кроме того, аппарат должен неограниченно долго работать и при напряжении, превышающем номинальное на 5-20 %. Это напряжение называется *наибольшим рабочим напряжением*.

**Номинальная частота**  $f_{ном}$  - это промышленная частота тока, для которой спроектирован аппарат. В Европе это частота 50 Гц, а в США, Канаде и некоторых странах Юго-Восточной Азии - 60 Гц.

**Номинальный ток**  $I_{ном}$  - это действующее значение тока, который аппарат должен длительно пропускать без повреждений при номинальной частоте с температурой различных частей, не превышающей значений, установленных ГОСТ 8024-84.

**Ток отключения** - это наибольший ток к.з., который выключатель способен отключить в заданных условиях в цепи с возвращающимся напряжением промышленной частоты, соответствующим наибольшему рабочему напряжению выключателя, и с заданным переходным восстанавливающимся напряжением, равным номинальному.

**Стойкость аппарата при сквозных** (проходящих через аппарат) **токах к.з.** характеризуется его способностью противостоять механическим и тепловым воздействиям, возникающим при прохождении этих токов через аппарат. Различают электродинамическую (динамическую) и термическую стойкость аппарата. Электродинамическая стойкость характеризуется:

а) максимальным значением тока к.з.  $I_d$ , которое аппарат выдерживает во включенном положении без повреждений, препятствующих его дальнейшей исправной работе;

б) начальным действующим значением периодической составляющей.

## 3. Условия работы ЭАВН.

Требования, предъявляемые к ЭАВН, определяются самыми разнообразными факторами.

**Электрические воздействия.** ЭАВН постоянно находятся под воздействием рабочего напряжения и должны его выдерживать. В отдельных случаях АВН подвергаются воздействию перенапряжений как колебательного характера (коммутационных), так и импульсных (грозовых). На металлических



частях ЭАВН, находящихся под напряжением, может возникать корона. При перенапряжениях на поверхности изоляции могут появляться скользящие разряды.

*Механические воздействия* обуславливаются как механическими силами, возникающими при рабочем оперировании ЭАВН, так и силами внутреннего давления, возникающими во многих ЭАВН при их работе. Значительные механические воздействия возникают при прохождении через ЭАВН токов к.з. вследствие электродинамических сил, а также при вибрации и тряске, которым аппарат подвергается во время работы и транспортировки. И, наконец, к механическим воздействиям следует отнести: тяжение подводящих проводов гибкой ошиновки и нагрузку от трубчатой ошиновки, а также нагрузку, создаваемую действием ветра и гололеда.

*Тепловые воздействия* вызываются нагреванием частей ЭАВН (кроме некоторых типов разрядников, короткозамыкателей и заземлителей) при прохождении через аппарат рабочего тока. При к.з. нагрев ЭАВН кратковременно возрастает пропорционально квадрату тока. Электрическая дуга, сопровождающая разряд по поверхности изоляции, вызывает внезапный местный ее нагрев и оплавление металлических частей, которых касается дуга. Дуга, возникающая при отключении тока ЭАВН, вызывает оплавление их контактов.

*Атмосферные воздействия* обуславливаются температурой, давлением и влажностью воздуха, а также дождем, туманом, росой, пылью и др. Кроме того, ЭАВН наружной установки в южных и тропических районах подвергаются сильному нагреванию лучами солнца, а также резким перепадам температуры (быстрое нагревание лучами восходящего солнца после холодной ночи, охлаждение нагретых солнцем поверхностей выпавшим дождем или градом) и, наконец, воздействию появляющейся на них грибковой плесени. К атмосферным воздействиям относится и загрязнение поверхности изоляторов пылью, уносами химических и металлургических предприятий, тепловых электростанций, а также морской туман и солевые отложения в прибрежных морских районах.

*Воздействие времени* проявляется в механическом износе трущихся частей, в старении изоляции и коррозии металлических частей.

Не всегда вышеперечисленные факторы действуют одновременно. Можно отметить две характерные разновидности условий работы ЭАВН, отличающиеся между собой по воздействию внешних факторов: в закрытых помещениях (внутренняя установка) и на открытом воздухе (наружная установка).

*Высота установки над уровнем моря* - ЭАВН на номинальное напряжение до 500 кВ включительно не должна превышать 1000 м, а ЭАВН на номинальное напряжение 750-1150 кВ - 500 м. Если ЭАВН на  $U_{ном} < 500$  кВ предназначаются для установки на высоте от 1000 до 3500 м, а ЭАВН на 750-1150 кВ - на высоте от 500 до 3500 м, то испытательные напряжения ЭАВН должны быть увеличены.

*Климатические условия.* Если ЭАВН предназначены для работы при верхней рабочей температуре окружающего воздуха выше 45°C, то испытательные напряжения АВН должны быть увеличены, а номинальные токи уменьшены.

*Сетевые условия.* Электрические аппараты на  $U_{НОМ} < 35$  кВ предназначены для работы в электрических сетях, как с изолированной, так и с заземленной нейтралью.

Электрические аппараты (кроме вентильных разрядников) предназначены для работы в сетях с заземленной нейтралью (коэффициент замыкания на землю не более 1,4). Разрядники на  $U_{НОМ} = 110$  кВ предназначены для сетей: а) с эффективно заземленной нейтралью ( $k_3 < 1,4$ ); б) с неэффективно заземленной нейтралью ( $k_3 < 1,73$ ). Разрядники на  $U_{НОМ} = 150$  кВ предназначены для сетей с эффективно заземленной нейтралью ( $k_3 < 1,4$ ). Это условие не распространяется на напряжение гашения разрядников комбинированного типа при срабатывании их от коммутационных перенапряжений.

*Нагрузка от тяжения подводящих проводов и от ветра.* ЭАВН категории размещения 1 рассчитываются на нагрузку, создаваемую от тяжения подводящих проводов в горизонтальном направлении в плоскости расположения присоединительных выводов, и одновременно на нагрузку от воздействия ветра. Механическая нагрузка, воспринимаемая аппаратом, в общем случае складывается из нагрузок, создаваемых:

- 1) тяжением подводящих проводов;
- 2) давлением ветра на поверхность ЭАВН без гололеда;
- 3) давлением ветра на поверхность ЭАВН при гололеде;
- 4) электродинамическими силами, возникающими при прохождении через АВН тока к.з.;
- 5) действием привода при включении и отключении АВН;
- 6) силой тяжести от собственной массы АВН.

#### 4. Классификация изоляционных конструкций.

Изоляционная конструкция (ИК) предназначена для электрической изоляции токоведущих частей аппарата от заземленных частей или от токоведущих частей других полюсов, а также для поддержания и крепления частей, находящихся под напряжением. По конструктивному назначению ИК подразделяются на:

- 1) *опорные* и *подвесные* - предназначенные для крепления частей, находящихся под напряжением, и для изоляции их от земли;
- 2) *проходные* - предназначенные для проведения токоведущих частей через элементы ЭАВН или распределительные устройства (РУ), находящиеся под потенциалом, отличным от потенциала токоведущей части;
- 3) *покрышки* - представляющие собой полые изоляторы, предназначенные для размещения в них частей аппарата или для поддержания тех или иных элементов аппарата, находящихся под напряжением;

- 4) *тяги и рычаги* - предназначенные для передачи движения от заземленных частей аппарата к его подвижным частям, находящимся под напряжением;
- 5) *воздухопроводы* - предназначенные для подачи сжатого воздуха или другого газа в те или иные элементы аппарата, находящиеся под напряжением.

По роду установки ИК подразделяются на ИК *наружной установки* и *внутренней установки*. ИК состоит из изоляционного элемента и закрепленных на нем (или в нем) металлических частей (арматуры). Арматура крепится снаружи изоляционного элемента (внешнее крепление арматуры) или внутри этого элемента (внутреннее крепление арматуры). Сцепление арматуры с телом изоляционного элемента осуществляется посредством цементирующих (склеивающих) веществ или механическим способом. Расстояние между кромками арматуры по прямой называется активной высотой ИК. При внешнем креплении арматуры полная высота ИК больше ее активной высоты на суммарную высоту верхней и нижней арматуры. В ИК с внутренним креплением арматуры полная и активная высоты практически равны. Поэтому применение таких ИК позволяет существенно уменьшить габариты аппарата.

Колонковые ИК состоят из двух (или большего числа) опорных изоляторов, поставленных один на другой. Повышение механической прочности колонковой ИК достигается установкой рядом двух или трех колонок, образующих ферму в виде трехгранной призмы или пирамиды.

Подвесные ИК (гирлянды) состоят из нескольких подвесных изоляторов, соединенных один с другим. Они могут быть одиночными, двойными или V-образными.

*Нормальная изоляция* - изоляция, подвергающаяся воздействию грозовых перенапряжений при обычных мерах грозозащиты.

*Облегченная изоляция* - изоляция, не подверженная воздействию грозовых перенапряжений или же подвергающаяся воздействию грозовых перенапряжений, не превышающих амплитуды одноминутного испытательного напряжения.

*Внутренняя изоляция* - изоляция, не подвергающаяся непосредственному влиянию атмосферных и других внешних воздействий (загрязнению, увлажнению, воздействию насекомых).

*Внешняя изоляция* - изоляция, подвергающаяся влиянию атмосферных и других внешних воздействий (к ней относятся воздушные промежутки и поверхности твердой изоляции, находящиеся в атмосферном воздухе).

*Полный разряд* - электрический разряд, полностью шунтирующий изоляцию между электродами и вызывающий снижение напряжения между ними практически до нуля.

*Разрядное напряжение* ( $U_{\text{раз}}$ ) - напряжение, при котором происходит полный разряд между электродами, находящимися в газовом или жидком диэлектрике.

*Пробивное напряжение* ( $U_{\text{пр}}$ ) - напряжение, при котором происходит полный разряд (пробой) сквозь толщу твердого диэлектрика. В разрядниках под

пробивным напряжением понимается Разрядное напряжение между электродами искрового промежутка.

*Напряжение перекрытия ( $U_{пер}$ )* - напряжение, при котором происходит полный разряд по поверхности твердого диэлектрика, Сходящегося в газовом или жидком диэлектрике.

**Литература:** 2, стр. 552-691; 3, стр. 146-731; 4, стр. 149-182.

**Контрольные вопросы:**

1. Какие аппараты относят к ЭАВН?
2. Классифицируйте ЭАВН.
3. Каким образом разделяют ЭАВН для эксплуатации в различных макроклиматических районах?
4. На какие категории подразделяют ЭАВН по месту установки?
5. Что называется видом климатического исполнения?
6. Назовите параметры ЭАВН.
7. Назовите требования, предъявляемые к ЭАВН.
8. Дайте классификацию изоляционных конструкций.

6 Аппараты низкого напряжения (до 1000 В)

**Цель лекции:** ознакомиться с разновидностями электрических аппаратов низкого напряжения и сферами их применения.

**План лекции:**

1. Неавтоматические выключатели.
2. Низковольтные выключатели.
3. Предохранители.

1. **Неавтоматические выключатели** классифицируются следующим образом:

- рубильники и переключатели;
- пакетные выключатели и переключатели.

**Рубильники и переключатели** предназначены для ручного непосредственного или дистанционного замыкания, размыкания или переключения электрических цепей. Они рассчитаны на отключение незначительных токов и при наличии соответствующих дугогасительных устройств допускают отключение тока до  $(1-1,25)I_{ном}$ . Выполняются рубильники и переключатели на токи от 100А и выше. Рубильники изготавливаются и на малые токи (5-10 А). Рубильники и переключатели выполняются одно-, двух- и трехполюсными. Основными элементами их являются: неподвижные врубные контакты, подвижные контакты, закрепленные шарнирно в других неподвижных контактах, дугогасительное устройство и привод. Рубильники монтируются на изоляционных плитах. Конструкция рубильника может выполняться для присоединения проводов сзади или спереди. Привод может осуществляться при помощи центральной рукоятки, боковой рукоятки через вал, центральной рукоятки через систему рычагов. Важнейшей частью рубильника являются контакты. В рубильниках на

малые токи контактное нажатие обеспечивается за счет пружинящих свойств материала губок, а на токи от 100 А и выше – стальными пружинами. С увеличением нажатия переходное сопротивление уменьшается, но увеличивается износ контактов из-за трения, и это ограничивает величину нажатия. Гашение дуги постоянного тока при токах до 75 А происходит за счет ее механического растягивания расходящимися ножами, при больших токах – осуществляется в основном за счет перемещения дуги под действием электродинамических сил контура тока (детали рубильника, дуга). Сокращение длины ножа ведет к возрастанию напряженности магнитного поля и электродинамических сил, что повышает отключающую способность рубильника. Предельным значением рационального сокращения длины ножа является такая длина, при которой обеспечивается надежное гашение тока до 75 А. Гашение дуги при однофазном токе напряжением 220 В и при трехфазном токе напряжением 380 В и 500 В осуществляется в основном за счет околоскатных явлений, при расстоянии около 2 мм между контактами дуга надежно гаснет. Длину ножа в этом случае выбирают исходя из механических условий. При монтаже рубильников в распределительных ящиках или в закрытых распределительных устройствах они снабжаются дугогасительными камерами (весьма эффективной считается дугогасительная камера с дугогасительной решеткой). Дугогасительные контакты применяются в рубильниках постоянного тока при токах свыше 100 А и во всех рубильниках переменного тока, где скорость расхождения контактов и их зазор заметно не влияют на условия гашения дуги, они, выключаясь последними, служат для защиты главных ножей от обгорания. На токи свыше 1000 А рубильники выполняются с несколькими параллельными ножами.

*Пакетные выключатели и переключатели* предназначены для осуществления достаточно сложных переключений одновременно в нескольких электрических цепях и используются для пуска мелких асинхронных электродвигателей, в схемах автоматики и управления, включения и отключения питающей электросети, переключения и отключения измерительных цепей.

Используются в сетях переменного тока напряжением до 500 В и постоянного тока напряжением до 220 В. Наиболее распространенные токовые номиналы: 10 А, 16 А и 25 А.

Выключатель состоит из набора колец-пакетов из изолирующего материала, внутри плоскостей расположено отдельное для каждого полюса (секции) контактное устройство, имеющее неподвижные контакты, закрепленные на кольце-пакете, и подвижный нож, поворачиваемый при помощи рукоятки на 90° или 120°. Пакеты стягиваются вместе при помощи стяжных шпилек. Контактная система каждого полюса создает два разрыва. Дуга гасится в закрытой камере, образованной между пакетами и снабженной дугогасительными газогенерирующими шайбами. Секции полюсов многополюсных выключателей различаются только расположением неподвижных контактов в пазах изоляционных колец, а в переключателях – конфигурацией подвижных контактов.

2. **Низковольтные выключатели** предназначены для автоматической защиты (отключения) электрических цепей при аварийных режимах, а также для нечастых оперативных коммутаций этих цепей. Параметры и защитные функции выключателей весьма разнообразны, однако, по быстродействию (собственному времени отключения) их можно подразделить на: *нормальные, с выдержкой времени на отключение* и *токоограничивающие*. Основные принципы конструирования определяются быстродействием. В отдельную группу выделяют *выключатели гашения магнитного поля*.

**Собственное время отключения** выключателя - время от момента, когда контролируемый параметр превзошел установленное для него значение (уставку), до момента начала расхождения контактов, или время от подачи импульса на отключение до момента начала расхождения контактов. Это время зависит от способа расцепления и конструкции расцепляющего устройства выключателя, от силы отключающих пружин, массы подвижной системы и пути этой массы до момента размыкания контактов.

**Полное время отключения** выключателя – собственное время отключения плюс время гашения дуги, зависящее от эффективности дугогасительного устройства.

У *нормальных выключателей* собственное время отключения (в зависимости от номинального тока и конструкции) лежит в пределах 0,02 - 0,1 с.

*Выключатели с выдержкой времени* осуществляют после получения импульса на срабатывание (пред отключением) выдержку времени. Применяются для селективной защиты, т.е. отключения ближайшего к аварии участка, это достигается за счет разной выдержки времени.

Время отключения *токоограничивающих выключателей* не должно превосходить 0,005 с. В некоторых конструкциях – 0,001 с. Обладают токоограничивающим эффектом и могут применяться для защиты с любыми практически возможными токами к.з. Применяются во всех выпрямительных установках для защиты анодных цепей при обратных зажиганиях, на электрифицированных железных дорогах, линиях метрополитена и трамвая, во многих мощных установках с короткими линиями передач.

*Выключатели гашения магнитного поля* применяются в цепях возбуждения крупных машин, если при нарушении изоляции внутри машины возникло к.з., то единственным способом, позволяющим ограничить размеры аварии, является быстрое сведение к нулю (гашение) магнитного поля обмотки возбуждения. Изготавливаются на напряжение до 3,3 кВ постоянного тока.

3. **Предохранители** - коммутационные электрические аппараты, предназначенные для отключения защищаемой цепи посредством разрушения специально предусмотренных для этого токоведущих частей (плавких вставок) под действием тока, превышающего определенное значение. После отключения необходимо заменить перегоревшую ставку на исправную вручную (заменяется только плавкая вставка) или автоматически (заменяется весь предохранитель).

Предохранители низкого напряжения изготавливаются на токи от миллиампер до тысяч ампер на напряжение до 660В. Конструкция предохранителей многообразна, но все они имеют основные элементы: корпус или несущую деталь, плавкую вставку, контактное присоединительное устройство, дугогасительное устройство или дугогасительную среду. Важнейшей характеристикой предохранителей является *время-токовая характеристика* - зависимость времени перегорания плавкой вставки от тока.

Предохранитель работает в двух резко отличных режимах: нормальные условия и условия перегрузок и к.з. В первом случае нагрев вставки имеет характер установившегося процесса (выделяемая в ней теплота отдается в окружающую среду), нагреваются до установившейся температуры все элементы предохранителя. Ток, на который рассчитана плавкая вставка для длительной работы, называется *номинальным током плавкой вставки*. Он может быть отличен от номинального тока самого предохранителя. В один и тот же предохранитель можно вставлять плавкие вставки на различные номинальные токи.

*Номинальный ток предохранителя* - наибольший из номинальных токов плавких вставок, предназначенных для данной конструкции (указывается на предохранителе).

*Плавающий ток* – наибольший ток, при котором плавкая вставка не перегорает в течение длительного времени. Величина зависит от следующих факторов: размер сечения, формы, материала и длины вставки; конструкции предохранителя, окружающей температуры и т.д. Для резкого сокращения времени плавления вставки с ростом тока используют два направления:

1) плавкой вставка передают специальную форму (в виде пластинки с вырезами, уменьшающими ее сечение на отдельных участках);

2) применяют металлургический эффект – на проволоку напаивают небольшие оловянные шарики (многие легкоплавкие металлы (олово, свинец и др.) способны в расплавленном состоянии растворять некоторые тугоплавкие металлы (медь, серебро и др.)).

Гашение дуги, возникающей после перегорания плавкой вставки, должно осуществляться в возможно более короткое время, которое зависит от конструкции предохранителя и принятого способа гашения.

*Предельный ток отключения* - наибольший ток, который плавкий предохранитель может отключить без повреждений и деформаций, препятствующих его дальнейшей работе.

Плавкие вставки изготавливают из свинца, сплавов свинца с оловом, цинка меди, серебра и др.

**Литература:** 2, стр. 500-551; 4, стр. 183-212.

**Контрольные вопросы:**

1. Классифицируйте аппараты низкого напряжения.
2. Каковы особенности конструкции и принципа действия рубильников?
3. Каковы особенности конструкции и принципа действия пакетных выключателей?
4. Для чего предназначены низковольтные выключатели?
5. Классифицируйте низковольтные выключатели.
6. Для чего предназначены предохранители?
7. Какие характеристики имеют предохранители?

**7 Аппараты управления**

**Цель лекции:** ознакомиться с разновидностями аппаратов управления и принципом их действия.

**План лекции:**

1. Контроллеры, командоаппараты и реостаты.
2. Контактторы и магнитные пускатели.
3. Датчики неэлектрических величин.
4. Электромагнитные муфты управления.

**1. Контроллеры, командоаппараты и реостаты.**

**Контроллер** - многоступенчатый, многоцепной аппарат с ручным управлением, предназначенный для изменения схемы главной цепи двигателя или цепи возбуждения. Кроме того, контроллеры также применяются для изменения сопротивлений, включенных в эти цепи. Конструктивно представляет собой многоступенчатое контактное переключающее устройство, не связанное в одно целое с резистором. Отделение переключающего устройства от резистора вызвано либо большими габаритами резистора, либо условиями эксплуатации и размещением оборудования. По своему конструктивному исполнению контроллеры делятся на барабанные, кулачковые и плоские.

*Плоские контроллеры* конструктивно могут выполняться на большее число ступеней по сравнению с барабанными и кулачковыми, но переключающая способность у них меньше, чем у последних. Применяются в случаях, когда требуется большое число ступеней, а также для одновременного управления и регулирования в нескольких электрических цепях при малых токах и редких переключениях.

*Барабанные контроллеры* применяются для управления двигателями мощностью до 45 кВт постоянного тока и 75 кВт переменного тока. Переключающая способность их невелика (120-240 переключений в час).

*Кулачковые контроллеры* допускают до 600 включений в час. Могут выполняться на большие токи по сравнению с барабанными контроллерами.

**Командоаппарат** - устройство, предназначенное для переключений в цепях управления силовых электрических аппаратов (контакторов). Иногда они применяются для непосредственного пуска электрических машин малой



мощности, для включения электромагнитов и другого оборудования. Командоаппараты могут иметь ручной привод (кнопки, ключи управления, командоконтроллеры) или могут приводиться. В действие контролируемым механизмом (путевые выключатели).

Простейшим командоаппаратом является *кнопка управления*. Кнопка используется для различных схем пуска, остановки и реверса двигателей путем замыкания и размыкания цепей электромагнитов контакторов, которые коммутируют главную цепь. Основной частью кнопки является кнопочный элемент.

*Путевой выключатель* предназначен для замыкания или размыкания контактов цепи с небольшим током в зависимости от положения рабочего органа управляемой машины или аппарата.

*Конечные выключатели* являются частным случаем путевых, поскольку конечный выключатель служит для коммутации цепей в крайних положениях органа управляемой машины. Путевые выключатели в зависимости от способа привода контактов можно разделить на кнопочные, рычажные и шпindelные.

*Универсальные переключатели* предназначены для ручного переключения цепей постоянного и переменного тока напряжением до 500 В. Применяются для редких переключений цепей управления, как переключатели для вольтметров и амперметров и как коммутаторы для управления серводвигателями и различными электроустановками с неавтоматическим замыканием и размыканием тока, а также для переключения полюсов многоскоростных асинхронных двигателей малой мощности.

*Командоконтроллеры* применяются для производства переключений в цепях управления сложных схем автоматизированного электропривода при большой частоте переключений и когда требуется строгое чередование в последовательности действия отдельных механизмов. Предназначены для работы в цепях постоянного тока напряжением до 400 В и переменного тока 500 В.

*Реостат* - совокупность резисторов и контроллера, позволяющая изменять сопротивление, вводимое в цепь. В зависимости от назначения резисторы делят на следующие группы: пусковые, тормозные, регулировочные, добавочные, экономические, разрядные, балластные, нагрузочные, нагревательные, заземляющие, установочные. Пусковые, тормозные, разрядные, заземляющие резисторы в основном предназначены для работы в кратковременном режиме и должны иметь возможно большую постоянную времени нагрева. Особых требований к стабильности резисторов не предъявляется. Все остальные резисторы работают в основном в длительном режиме, требуют развитой поверхности охлаждения. Сопротивление резистора должно быть стабильным. В зависимости от материала проводника различают резисторы металлические, жидкостные, угольные и керамические. В промышленном электроприводе наибольшее распространение получили металлические резисторы. Керамические (нелинейные) резисторы широко применяются в высоковольтных аппаратах разрядниках.

## 2. Контакторы и магнитные пускатели.

*Контактор* - это двухпозиционный аппарат, предназначенный для частых коммутаций токов, которые не превышают токов перегрузки соответствующих электрических силовых цепей. Замыкание или размыкание контактов контактора может осуществляться двигателем (электромагнитным, пневматическим или гидравлическим) приводом. Наибольшее распространение получили электромагнитные контакторы.

Контакторы постоянного тока коммутируют цепь постоянного тока и имеют, как правило, электромагнит также постоянного тока. Контакторы переменного тока коммутируют цепь переменного тока.

Электромагнит этих контакторов может быть выполнен либо для работы на переменном токе, либо для работы на постоянном токе. В связи с повышением производительности труда в настоящее время схемы электрического привода требуют до 1200 и более включений в час. Этот режим работы является наиболее тяжелым. При каждом включении и отключении происходит износ контактов. Поэтому принимаются меры к сокращению длительности горения дуги при отключении и к устранению вибрации при включении. Большая частота операций требует высокой механической стойкости электромагнитного механизма контактора. Способность аппарата обеспечить работу при большом числе операций характеризуется износостойкостью. Различают механическую и коммутационную износостойкость.

Механическая износостойкость определяется числом циклов включение-отключение контактора без ремонта и замены его узлов и деталей. Ток в цепи при этом равен нулю. К современным контакторам предъявляется очень высокое требование к механической износостойкости  $(10-20) \cdot 10^6$  операций.

Коммутационная износостойкость определяется числом включений и отключений цепи с током, после которого требуется замена износившихся контактов. Современные контакторы должны иметь коммутационную износостойкость порядка  $(2-3) \cdot 10^6$  операций. Эти требования очень высоки (часть выпускаемых в настоящее время контакторов имеет коммутационную износостойкость  $10^6$  операций и менее).

Наряду с высокой механической и коммутационной износостойкостью контакторы должны иметь малую массу и размеры. Зона выхлопа раскаленных газов дуги должна быть возможна малой, что позволяет сократить размеры всей установки в целом. Детали, наиболее быстро подвергающиеся износу, должны быть легко доступны для замены.

Контактор имеет следующие основные узлы: контактную систему, дугогасительную систему, электромагнитный механизм, систему блок-контактов.

При подаче напряжения на обмотку электромагнита якорь притягивается. Подвижный контакт, связанный с якорем, производит замыкание или размыкание главной цепи. Дугогасительная система обеспечивает быстрое

гашение дуги, благодаря чему достигается малый износ контактов. Кроме главных контактов, контактор имеет несколько вспомогательных слаботочных контактов (блок-контактов) для согласования работы контактора с другими аппаратами или для включения в цепь управления самого контактора.

Основные данные контакторов и пускателей: номинальный ток главных контактов, предельный отключаемый ток, номинальное напряжение, механическая износостойкость, электрическая износостойкость, допустимое число включений в час, собственное время включения, собственное время отключения.

*Магнитным пускателем* называется контактор, предназначенный для пуска в ход короткозамкнутых асинхронных двигателей.

Как правило, в пускателе, помимо контактора, встроены тепловые реле для защиты двигателя от перегрузок и «потери фазы». Бесперебойная работа асинхронных двигателей в значительной степени зависит от надежности пускателей. Поэтому к ним предъявляются высокие требования в отношении износостойкости, коммутационной способности, четкости срабатывания, надежности защиты двигателя от перегрузок, минимального потребления мощности

Особенности условий работы пускателя состоят в следующем. При включении асинхронного двигателя пусковой ток достигает 6-7 кратного значения номинального тока. Даже значительная вибрация контактов при таком токе быстро выводит их из строя. Это накладывает высокие требования в отношении вибрации контактов и их износа. С целью уменьшения времени вибрации контакты и подвижные части делаются возможно легче, уменьшается их скорость, увеличивается нажатие. Эти мероприятия позволили создать износостойкий пускатель типа ПА с электрической износостойкостью до  $2 \cdot 10^6$  операций.

### 3. Датчики неэлектрических величин.

*Датчик* – электрический аппарат, предназначенный для преобразования непрерывного изменения входной (контролируемой) неэлектрической величины. Входные величины могут быть разнообразны (перемещение, температура, скорость и т.д.). В качестве выходных величин используются активное, индуктивное, емкостное сопротивление, ток, ЭДС, падение напряжения, частота и фаза переменного тока.

Основной характеристикой датчика является *чувствительность*:

$$S = \frac{\Delta Y}{\Delta X}, \quad (17)$$

где  $\Delta Y$ ,  $\Delta X$  – приращение выходной и входной величин.

Часто пользуются понятием *относительной чувствительности*:

$$S_0 = \frac{\Delta Y / Y}{\Delta X / X}, \quad (18)$$

где  $Y$ ,  $X$  – полные изменения выходной и входной величин.

Датчики могут быть линейными ( $S = \text{const}$ ) и нелинейными ( $S = \text{var}$ ). Важным параметром является *порог чувствительности* - наименьшее значение входной величины, вызывающее изменение выходной величины, которое может быть измерено. Датчики весьма разнообразны по принципу действия, конструктивному исполнению и схеме.

#### 4. Электромагнитные муфты управления.

Муфты применяются для регулирования частоты вращения, вращающего момента на валу, для соединения ведущего и ведомого валов. Муфты подразделяются на *индукционные* и *электромагнитные*.

*Индукционные муфты* по принципу действия аналогичны асинхронному двигателю с короткозамкнутым ротором. Механические характеристики существенно зависят от нагрузки и для стабилизации скорости применяются специальные регулирующие устройства.

*Электромагнитные муфты* применяются более широко. В них используется электромагнитное усилие притяжения между ферромагнитными телами. Удобны в эксплуатации, имеют малые габариты и небольшое время срабатывания, передают большие мощности на валу при сравнительно малой мощности управления. Подразделяются на фрикционные, ферропорошковые и гистерезисные.

**Литература:** 2, стр. 282-368, 466-499; 4, стр. 223-247.

#### **Контрольные вопросы:**

1. Какое устройство называется контроллером? Для чего он предназначен?
2. Какое устройство называется командоаппаратом? Для чего он предназначен?
3. Какое устройство называется реостатом? Для чего он предназначен?
4. Какое устройство называется контактором? Для чего он предназначен?
5. Какое устройство называется магнитным пускателем? Для чего он предназначен?
6. Какое устройство называется датчиком? Для чего он предназначен?
7. Назовите основные характеристики датчика.
8. Какое устройство называется электромагнитной муфтой? Для чего они предназначены?

#### 8 Электрические реле

**Цель лекции:** ознакомиться с разновидностями реле и принципом их действия.

#### **План лекции:**

1. Классификация.
2. Основные характеристики реле.

### 3. Требования, предъявляемые к реле.

#### 1. Классификация.

*Реле* - электрический аппарат, в котором при плавном изменении управляющей (входной) величины происходит скачкообразное изменение управляемой (выходной) величины. Из двух величин хотя бы одна должна быть электрической. По области применения реле можно разделить на реле для схем автоматики, для управления и защиты электропривода и для защиты энергосистем.

По принципу действия реле делятся на электромагнитные, поляризованные, индукционные, магнитоэлектрические, полупроводниковые и др.

В зависимости от входного параметра реле можно разделить на реле тока, напряжения, мощности, частоты и других величин. Следует отметить, что реле может реагировать не только на значение величины, но и на разность значений (дифференциальные), на изменение знака или на скорость изменения входной величины. Иногда реле, имеющие только одну входную величину, должно воздействовать на несколько независимых цепей. В этом случае реле воздействует на другое промежуточное реле, которое имеет необходимое число управляемых цепей. Промежуточное реле используется и тогда, когда мощность, которой может управлять основное реле, недостаточна.

По принципу воздействия на управляемую цепь реле делятся на контактные и бесконтактные.

Первые воздействуют на выходной параметр путем замыкания или размыкания контактов в управляемой цепи; во-вторых, при срабатывании реле резко меняется сопротивление, включенное в управляемую цепь. Разомкнутому состоянию контактной системы соответствует большое сопротивление в управляемой цепи бесконтактного реле. Это состояние бесконтактного реле носит название закрытого состояния.

Замкнутому состоянию контактного исполнительного органа соответствует малое сопротивление между выходными зажимами бесконтактного реле. При этом говорят об открытом состоянии бесконтактного реле.

Помимо указанных признаков, реле различаются способом включения. Первичные реле включаются в контролируемую цепь непосредственно, а вторичные - через измерительные трансформаторы.

#### 2. Основные характеристики реле.

Рассмотрим зависимость выходного параметра от значения воздействующей величины для случая реле с замыкающим контактом. У этих реле при отсутствии входного сигнала контакты исполнительного органа разомкнуты и ток в управляемой цепи равен нулю. Для бесконтактных реле сопротивление, введенное в управляемую цепь, не равно бесконечности и ток имеет минимальное значение  $u_{\text{мин}}$ . На рисунке 11 по оси абсцисс отложено значение

воздействующей величины, а по оси ординат - выходной. Значение воздействующей величины, при которой происходит срабатывание реле, называется значением величины срабатывания. До тех пор, пока  $x < x_{ср}$ , выходной параметр  $y$  либо равен нулю, либо равен своему минимальному значению  $y_{мин}$  (для бесконтактных аппаратов). При  $x \geq x_{ср}$  выходной параметр скачком меняется от  $y_{мин}$  до  $y_{макс}$ . Происходит срабатывание реле. Если после срабатывания уменьшать значение воздействующей величины, то при  $x \leq x_{отп}$  происходит отпускание реле.

Значение воздействующей величины, при котором произошло скачкообразное уменьшение выходного параметра с  $y_{макс}$  до  $y_{мин}$ , называется значением величины отпускания. Заданное значение величины (срабатывания или отпускания), на которую отрегулирован аппарат, называется установкой по воздействующей величине.

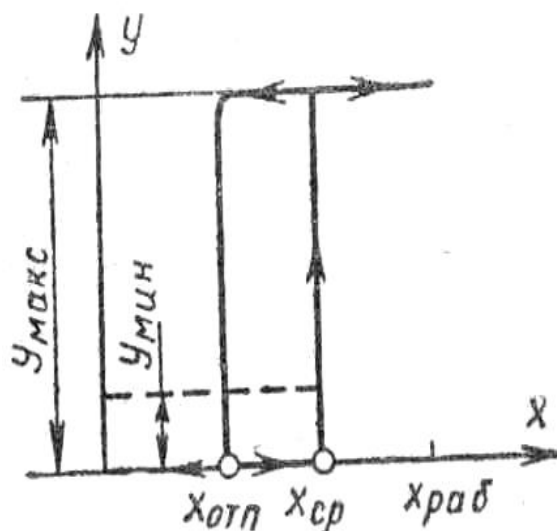


Рисунок 11 – Характеристика уравнения реле

Время с момента подачи команды на срабатывание до момента скачкообразного изменения выходной величины называется временем включения. Это время зависит от конструкции реле и величины входного параметра. Чем больше значение воздействующей величины по сравнению с  $x_{ср}$ , тем быстрее и надежнее работает реле. Отношение  $x_{раб}/x_{ср}$  называется коэффициентом запаса.

Для целого ряда реле очень важным является отношение  $x_{отп}/x_{ср}$ . Это отношение называется коэффициентом возврата.

Время с момента подачи команды на отключение до момента достижения минимального значения выходной величиной называется временем отключения. Для контактных аппаратов это время состоит из двух интервалов времени отпускания и времени дуги. Наглядное представление о времени работы электромагнитного реле дает рисунок 12. На рисунке 12 а дана

зависимость тока от времени в управляемой цепи, а на рисунке 12 б - в управляющей цепи (обмотке реле).

Весьма важным параметром, характеризующим усилительные свойства реле, является отношение  $P_y/P_{cp}$ , где  $P_y$  - максимальная мощность в нагрузке управляемой цепи, а  $P_{cp}$  - минимальная мощность входного сигнала, при котором происходит срабатывание реле.

Для реле с исполнительным органом в виде контактной системы максимальная мощность управления  $P_y$ , определяется не длительным током, который может пропустить контакт, а током, который может быть многократно отключен.

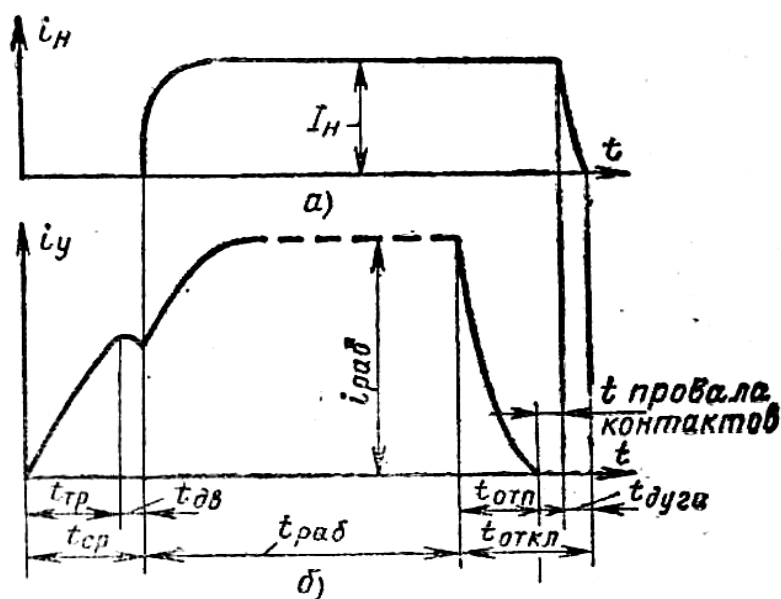


Рисунок 12- Зависимость от времени выходной и входной величины для электромагнитных реле

### 3. Требования, предъявляемые к реле.

Требования к реле в значительной мере определяются их назначением. К реле защиты энергосистем предъявляются следующие четыре основные требования: *селективность, быстрота действия (быстродействие), чувствительность, надежность.*

Под селективностью понимается способность реле отключать только поврежденный участок энергосистемы. Быстрота действия позволяет резко снизить последствия аварии, сохранить устойчивость системы при аварийных режимах, обеспечить высокое качество электроэнергии. Повышение чувствительности реле позволяет уменьшать «мертвую» незащищенную зону.

Реле для защиты энергосистем должны иметь высокую надежность, так как неправильная работа реле может привести к развитию тяжелых аварий и недоотпуску большого количества энергии.

В отношении внешних условий реле защиты работают в облегченных условиях. Они не подвержены воздействию ударов, вибрации, работают в помещениях, лишенных пыли и газов, вызывающих коррозию. Если учесть, что аварийные режимы в системе редки, реле работают в относительно легких условиях. Поэтому к реле не предъявляются высокие требования в отношении износостойкости.

Реле, предназначенные для схем защиты и автоматики электропривода, должны удовлетворять специфическим требованиям. Эти реле работают при худших условиях: возможны удары, вибрация. Воздух часто засорен пылью или вредными производственными примесями. Так как современные схемы электропривода имеют число включений в час до 1000 - 1200, реле управления должны иметь высокую механическую и электрическую износостойкость порядка  $(1-10) \cdot 10^6$  циклов «включение - отключение». Надежность работы схем автоматики зависит от надежности работы отдельных элементов.

Так как реле управления и защиты электродвигателей много и им приходится выполнять большое число операций, то они должны иметь высокую надежность.

**Литература:** 2, стр. 337-402; 4, стр. 248-261.

**Контрольные вопросы:**

1. Классифицируйте реле.
2. Перечислите основные характеристики реле и дайте им определения.
3. Какие требования предъявляются к реле? Почему?

9 Бесконтактные электрические аппараты

**Цель лекции:** ознакомиться с разновидностями бесконтактных аппаратов.

**План лекции:**

1. Усилители.
2. Полупроводниковые реле.
3. Логические элементы.
4. Оптоэлектронные приборы.

1. **Усилители** характеризуются непрерывной и плавной зависимостью выходного параметра от входного управляющего сигнала и являются основой регуляторов. Входят в состав любых схем автоматического управления. Используются для усиления, преобразования и суммирования сигналов различных датчиков. Усилители можно разделить на *магнитные, электронные и транзисторные*.

*Магнитные усилители* представляют собой дроссели со стальным сердечником, включаемые в цепь переменного тока. Путем подмагничивания этих дросселей постоянным током можно в широких пределах изменять постоянный ток в регулируемой цепи.

Простейший магнитный дроссельный магнитный усилитель (рисунок 13 а и 13б) представляет собой переменную индуктивность (дроссель насыщения).



Входным сигналом служит величина постоянного тока, поступающего в обмотку управления 1 (рисунок 13, а). Обмотка 2, называется силовой обмоткой МУ, питается от источника переменного тока через сопротивление нагрузки  $Z_H$ , которое при отсутствии тока управления в несколько раз меньше индуктивного сопротивления силовой обмотки. Если силовую обмотку, имеющую малое активное сопротивление, подключить к источнику синусоидального напряжения, то почти все подаваемое напряжение будет приложено к индуктивному сопротивлению обмотки. Оно будет уравновешиваться возникшей в обмотке 2 э.д.с. самоиндукции  $e_L = U_m \sin \omega t$ , величина которой пропорциональна скорости изменения магнитного потока  $\Phi \sim = BS$  в сердечнике и числу витков в обмотке  $\omega_2$ :

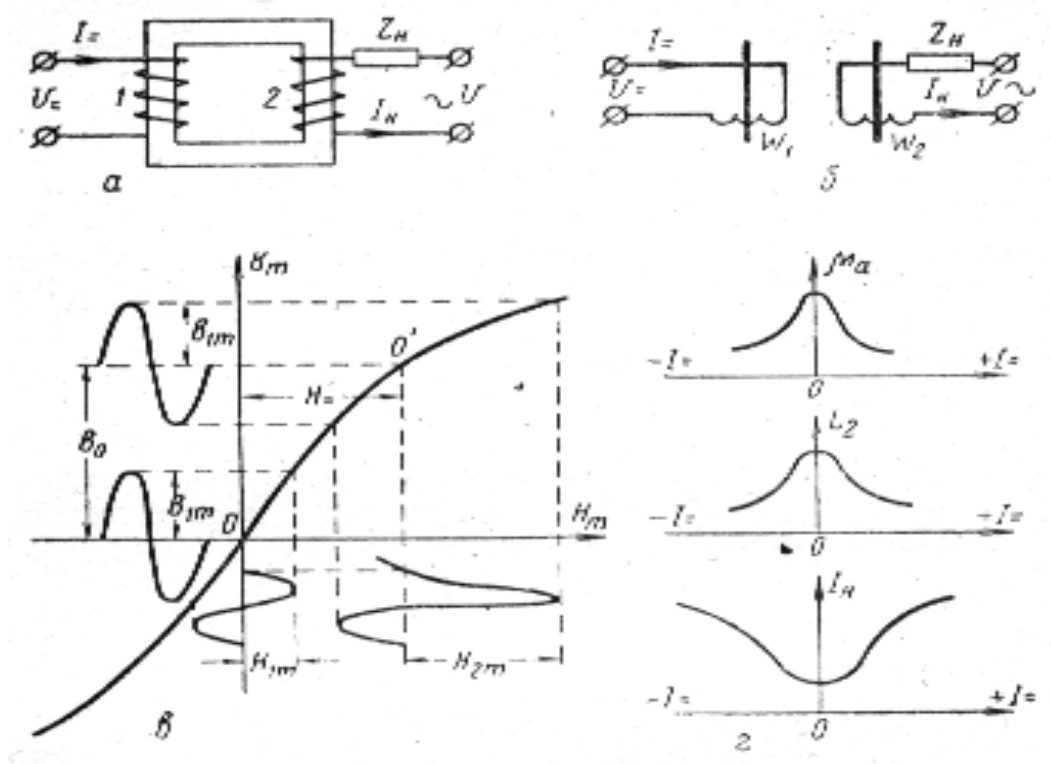


Рисунок 13 - Дроссель с подмагничиванием:

- а - электрическая схема; б - условное обозначение; в - кривая намагничивания;
- г - кривые зависимостей магнитной проницаемости, индуктивности и тока нагрузки от тока подмагничивания

$$e_L = -\omega_2 \frac{d\Phi \sim}{dt} = -\omega_2 S \frac{dB}{dt}, \quad (17)$$

следовательно,

$$\frac{dB}{dt} = -\frac{U_m}{\omega_2 S} \sin \omega t. \quad (18)$$

Отсюда:

$$B = -\frac{U_m}{\omega_2 S} \int \sin \omega t dt + B_0 = B_m \cos \omega t + B_0, \quad (19)$$

где  $S$  – сечение сердечника;

$$B_m = \frac{U_m}{\omega_2 S \omega} \quad \text{- амплитуда переменной составляющей магнитной}$$

индукции;

$B_0$  – постоянная интегрирования, или постоянная составляющая магнитной индукции, определяемая начальным состоянием - подмагничиванием сердечника постоянным током.

Из выражения (19) следует, что амплитуда магнитной индукции  $B_m$  не зависит от магнитных свойств сердечника, а значит, и величины постоянного подмагничивания. Она определяется только амплитудой приложенного к обмотке переменного напряжения  $U_m$ , числом витков обмотки  $\omega_2$  и частотой  $\omega$  тока в силовой обмотке МУ.

В то же время величина напряженности магнитного поля, а, следовательно, и тока в силовой обмотке существенно зависит от величины подмагничивания сердечника постоянным током. В МУ применяются сердечники из магнитомягких материалов, имеющих очень узкую петлю гистерезиса, что позволяет заменить ее средней кривой намагничивания. Если подмагничивание отсутствует, то при магнитной индукции  $B_{1m}$  напряженность магнитного поля будет равна  $H_{1m}$  (рисунок 9.1в). При подмагничивании полем постоянной напряженности  $H_+$  начальная рабочая точка  $O$  сдвигается на нелинейный участок кривой намагничивания  $O'$ .

Как видно из графических построений функции  $H_m = f(B_m)$ , при одинаковой величине амплитуды магнитной индукции  $B_{1m}$  амплитуда напряженности  $H_{2m}$  резко увеличивается, а величина абсолютной магнитной проницаемости материала магнитопровода падает:

$$\mu_a = \mu \mu_0 = \frac{B_{1m}}{H_{2m}}, \quad (20)$$

где  $\mu$  - относительная магнитная проницаемость, показывающая, во сколько раз проницаемость в данной среде больше, чем в вакууме;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  - магнитная постоянная, характеризующая магнитное поле в вакууме, Гн/м.

Индуктивность обмотки 2 измеряется пропорционально магнитной проницаемости  $\mu_a$ :

$$L_2 = \frac{\omega_2^2 S \mu_a}{l}, \quad (21)$$

где  $l$  – длина средней линии магнитопровода, м.

Итак, с увеличением подмагничивания уменьшаются абсолютная магнитная проницаемость  $\mu_a$  и пропорционально ей индуктивность силовой обмотки  $L_2$ , а значит, и её индуктивное сопротивление  $x = \omega L_2$ . Следовательно, ток в нагрузке  $z_H$  с увеличением подмагничивания будет возрастать в соответствии с уравнением:

$$I_H = \frac{U \sim}{\sqrt{(R_H + R_2)^2 + (x_H + \omega L_2)^2}}, \quad (22)$$

где  $R_H$  и  $x_H$  – активное и реактивное сопротивления нагрузки;

$R_2$  и  $\omega L_2$  – активное и индуктивное сопротивления силовой обмотки.

Изменение магнитной проницаемости  $\mu_a$ , индуктивности  $L_2$  и тока нагрузки  $I_H$  в зависимости от тока подмагничивания показано на рисунке 13г. Зависимость  $I_H = f(I_{\sim})$  называется характеристикой управления МУ. Чем больше крутизна линейной части кривой намагничивания, тем сильнее изменяются ток, напряжение и мощность нагрузки при незначительном изменении величины входного сигнала  $I_{\sim}$ .

У магнитных усилителей, как и у других типов усилителей, различают коэффициенты усиления по току, напряжению и мощности. Для нормальной работы МУ необходимо, чтобы частота переменного напряжения питания не менее чем в 10 раз превышала частоту входного сигнала. Простейший магнитный усилитель (дроссель с подмагничиванием) имеет существенный недостаток: при протекании через обмотку 2 переменного тока в обмотке управления 1 возникает переменное напряжение, затрудняющее управление МУ и искажающее входной сигнал. Величина э.д.с., наведённая в обмотке 1 с большим числом витков, может быть значительно выше, чем напряжение на обмотке 2. Для устранения этих явлений МУ собирается из двух П-образных сердечников или выполняется на Ш-образном сердечнике. Обмотку управления располагают на внутреннем сердечнике, а обмотку переменного тока на крайних сердечниках так, чтобы магнитные потоки  $\Phi \sim$  во внутреннем магнитопроводе были равны и направлены встречно. В этом случае суммарный магнитный поток в среднем сердечнике равен нулю и в обмотках управления не наводится э.д.с.

Магнитные усилители, как упоминалось выше, обладают значительной инерционностью, величина которой характеризуется *постоянной времени цепи управления*:

$$T = \frac{L_1}{R_1} = \frac{1}{4f} \left( \frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^2 \frac{R_2'}{R_0}, \quad (23)$$

где  $R_0 = R_1 + R_D$  - общее активное сопротивление цепи управления;  
 $R'_0 = R_2 + R_H$  - общее активное сопротивление цепи переменного тока;  
 $R_D$  - сопротивление датчика.

Величину постоянной времени можно связать с коэффициентом усиления МУ по мощности, воспользовавшись выражениями (22) и (23) получаем:

$$k_p \approx k_i^2 \frac{R'_2}{R_0} \approx \left( \frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^2 \frac{R'_2}{R_0},$$

следовательно,

$$T \approx \frac{k_p}{4f}. \quad (24)$$

Из выражения (24) видно, что для уменьшения инерционности следует либо увеличивать частоту источника питания, либо уменьшать коэффициент усиления. Но даже при  $k_p = 1$  постоянная времени МУ равна четверти периода напряжения питания, например при  $f = 50$  Гц  $T = 0,005$  с.

Для повышения быстродействия и увеличения коэффициента усиления несколько магнитных усилителей соединяют последовательно друг с другом. При таком каскадном соединении общий коэффициент усиления равен произведению коэффициентов усиления отдельных МУ, а постоянная времени приблизительно равна сумме постоянных времени отдельных МУ.

МУ только с одной обмоткой постоянного тока (управления) одинаково регулируют на оба направления тока подмагничивания (рисунок 13г). Однако на практике очень часто требуется, чтобы ток в нагрузке изменялся различным образом, в зависимости от полярности сигнала управления. Такой эффект можно получить, создав начальное подмагничивание постоянным магнитным потоком. Для этого на внутренних стержнях располагают дополнительную обмотку постоянного тока, которая получила название *обмотки смещения*  $\omega_{см}$ . обмотка смещения обычно питается от стабилизированного источника постоянного напряжения  $U_{см}$ . Величина смещения выбирается так, чтобы при отсутствии входного сигнала через нагрузку  $z_n$  протекал ток, соответствующий середине прямолинейного участка характеристики. При положительном входном сигнале магнитный поток обмотки управления увеличивает намагничивание сердечников, следовательно, ток нагрузки возрастает. При отрицательном входном сигнале намагничивание сердечников уменьшается и, значит, уменьшается ток нагрузки. Если магнитные потоки обмоток смещения и управления равны по величине и направлены встречно, то ток нагрузки окажется минимальным и равным току холостого хода МУ без обмоток смещения.

Принцип действия *электронных усилителей* основан на усилительных свойствах электронной лампы с управляющей сеткой. Изменяя потенциал сетки

относительно катода можно воздействовать на значение анодного тока лампы. При этом напряжение и мощность сигнала, поданного на сетку лампы, значительно меньше напряжения и мощности в нагрузке, включаемой в анодную цепь. Электронные усилители применяются для усиления сигналов переменного и постоянного тока.

Основные достоинства электронных усилителей - их безынерционность и малое потребление мощности от источника сигнала, что особенно важно при работе от маломощных датчиков. Поэтому электронные усилители применяются главным образом для предварительного усиления сигналов маломощных датчиков.

Недостатками электронных усилителей являются ограниченный срок службы ламп, необходимость в источнике накала, значительное время разогрева при включении усилителя, малая механическая прочность, небольшая выходная мощность из-за большого внутреннего сопротивления ламп и, следовательно, больших потерь энергии в самих лампах.

В настоящее время широко применяются *полупроводниковые триоды*, называемые также *транзисторами*. В них сочетаются усилительные свойства электронных ламп и способность ионных приборов работать с малым внутренним падением напряжения. Достоинствами транзисторов являются высокая механическая прочность, большой срок службы, малые размеры и масса, способность работать при низких рабочих напряжениях. Недостатками являются нестабильность параметров и значительный разброс параметров от образца к образцу и низкие предельные рабочие напряжения (30-120 В).

Транзисторы представляют собой полупроводниковые приборы с двумя рп-переходами. В простейшем случае транзисторы состоят из кристалла германия и двух острий (эмиттер и коллектор), касающихся поверхности кристалла на расстоянии 20-50 микронов друг от друга. Каждое острие образует с кристаллом обычный выпрямительный контакт с прямой проводимостью от острия к кристаллу. Если между эмиттером и базой подать напряжение прямой полярности, а между коллектором и базой - обратной полярности, то оказывается, что величина тока коллектора находится в прямой зависимости от величины тока эмиттера.

Плоскостной транзистор состоит из кристалла полупроводника (германия, кремния, арсенида, индия, астата, и др.), имеющего три слоя различной проводимости  $p$  и  $n$ . Проводимость типа  $p$  создается избыточными носителями положительных зарядов, так называемыми "дырками", образующиеся в случае недостатка электронов в слое. В слое типа  $n$  проводимость осуществляется избыточными электронами. Таким образом, возможны два типа плоскостных транзисторов:  $p-n-p$ , в котором два слоя типа  $p$  (например, германия) разделены слоем  $n$ ,  $n-p-n$ , в котором два слоя типа  $n$  разделены слоем типа  $p$ . Крайние слои называют коллектором и эмиттером и включаются в цепь соответственно аноду и катоду электронной лампы. Средний слой называется базой и является, как и сетка электронной лампы, управляющим электродом.

Из транзисторов можно составить схемы различных назначений. Например, можно собрать усилители тока, мощности, усилители звуковых частот, декодеры аудио, видео, теле-радио сигналов, а также простейшие логические схемы, основанные на принципе И-ИЛИ-НЕ.

В полупроводниковом триоде две  $p$ -области кристалла разделяются узкой  $n$ -областью. Такой триод условно обозначают  $p-n-p$ . Можно делать и  $n-p-n$  триод, т.е. разделять две  $n$ -области кристалла узкой  $p$ -областью.

Четырехслойная структура, получившая вначале название «хук-транзистор», или транзистор с ловушкой в коллекторе. Наряду с приборами, дающими возможность осуществлять линейное усиление сигналов, в электронике, в вычислительной технике и, особенно в автоматике широкое применение находят приборы с падающим участком вольтамперной характеристики. Эти приборы чаще всего выполняют функции электронного ключа и имеют два состояния: запертое, характеризующееся высоким сопротивлением, и отпертое, характеризующееся минимальным сопротивлением. 10-15 лет назад в схемах электронной автоматики в качестве электронного ключа использовали газонаполненный прибор - тиратрон. При подаче управляющего (поджигающего) импульса в баллоне тиратрона начинался лавинный процесс ионизации газа. Промежуток между анодом и катодом становился проводящим и замыкал силовую цепь.

С появлением плоскостного биполярного транзистора несколько позже было замечено, что характеристики такой структуры во многом напоминали характеристики тиратронов, и приборы такого типа получили название *тиристоров* (по аналогии с терминами тиратрон и транзистор).

Если транзистор типа  $p-n-p-n$  включить в схему так, как обычно включается транзистор типа  $p-n-p$  (т.е. считать правую  $n$ -область коллектором) и подать на нее отрицательное по отношению к базе (средняя  $n$ -область) смещение, а эмиттер (левая  $p$ -область) временно оставить разомкнутым, то подключенную к источнику питания часть транзистора, состоящую из трех областей, можно рассматривать как самостоятельный транзистор типа  $n-p-n$ , подключенный эмиттером и коллектором к источнику питания. База этого условного транзистора к схеме не подключена, транзистор работает в режиме нулевого тока базы. Так как в данном случае мы имеем дело не с транзистором  $p-n-p$ , а с транзистором  $n-p-n$ , то очевидно, что коллектором этого условного транзистора должен быть электрод, к которому подводится положительное напряжение, а эмиттером - электрод, к которому подводится отрицательное напряжение. Другими словами, полярность приложенного к условному транзистору напряжения такова, что средний  $p-n$ -переход имеет смещение в обратном направлении и на нем падает почти все напряжение источника питания, тогда как правый  $p-n$ -переход имеет смещение в прямом направлении.

Так как выходным электродом условного транзистора  $n-p-n$  является его эмиттер, а коллектор подключен к заземленной точке, то можно считать, что условный транзистор включен по схеме с общим коллектором. Входным электродом условного транзистора является его база, т. е. средняя  $p$ -область.

Если подать смещение в прямом направлении на левый  $p-n$ -переход, то он будет инжектировать дырки в среднюю  $n$ -область. Дырки будут распространяться диффузионно в направлении среднего  $p-n$ -перехода, втягиваться его полем и выбрасываться в среднюю  $p$ -область. Три левых слоя работают при этом, как транзистор типа  $p-n-p$ , включенный с общей базой. Ток эмиттера этого левого условного транзистора будет равен току эмиттера структуры  $p-n-p-n$ .

Таким образом, получаем, что структура  $p-n-p-n$  представляет собой как бы два наложенных один на другой плоскостных транзистора, из которых первый является транзистором  $p-n-p$ , включенным по схеме с общей базой, а второй - транзистором  $n-p-n$ , включенным по схеме с общим коллектором.

В электрических аппаратах широко применяются *операционные усилители* (ОУ). ОУ имеет интегральное исполнение и содержит входной дифференциальный усилитель, промежуточный усилитель и эмиттерный повторитель. Входной дифференциальный каскад содержит два транзистора. Выходное напряжение каскада является разностью потенциалов на коллекторных нагрузках этих транзисторов. Такой каскад имеет высокое входное сопротивление и позволяет получить самые разнообразные характеристики вход-выход. Применение на выходе ОУ эмиттерного повторителя снижает выходное сопротивление и делает возможным подключение нагрузки с малым сопротивлением.

Для защиты от больших входных сигналов на входе ОУ включаются два встречно-параллельно включенных диода или стабилитрона.

**2. Полупроводниковые реле** в отношении быстродействия, чувствительности, селективности и надежности превосходят электромагнитные. В ряде случаев полупроводниковые реле обладают характеристиками, которые невозможно получить с помощью электромагнитных реле. Полупроводниковые реле защиты содержат измерительный орган и логическую часть. В измерительном органе непрерывные входные величины преобразуются в дискретный выходной сигнал. Дискретный выходной сигнал поступает на вход логической части, выдающей управляющий сигнал чаще всего на электромагнитное реле. Измерительный орган полупроводникового реле тока обычно имеет на входе трансформатор тока, нагруженный на малое активное сопротивление. Напряжение на этом сопротивлении пропорционально первичному току в контролируемой цепи.

В измерительных органах используют три принципа:

- 1) сравнение однородных физических величин;
- 2) появление физического эффекта, возникающего при определенном значении измеряемого напряжения;
- 3) преобразование непрерывного входного сигнала и опорного напряжения в цифровую форму.

Полупроводниковые реле применяются в качестве: реле тока с выдержкой времени, зависящей от тока; реле защиты от замыканий на землю; реле защиты асинхронных двигателей; трехфазных реле напряжения; полупроводниковых реле времени; цифровых реле времени.

### **3. Логические элементы.**

Управление каким-либо электротехническим устройством или электроприводом осуществляется элементами, которые взаимодействуют друг с другом и с управляемым объектом в определенной последовательности.

Логическая часть предназначена для преобразования сигнала командных органов и датчиков в выходные сигналы в соответствии с заданной программой.

Выходные сигналы логической части подаются в усилительные, а затем в исполнительные органы. В большинстве случаев используются дискретные сигналы, т.е. на вход аппарата подается сигнал, значение которого достаточно для его срабатывания, либо сигнал на вход не подается или он слишком мал и недостаточен для срабатывания.

При математическом отображении этого процесса в первом случае говорят, что в аппарат подана логическая единица, во втором - логический нуль. Логическая часть системы управления состоит из логических элементов дискретного действия. Существует множество булевых операций, среди которых наиболее важные: “НЕ”, “И” и “ИЛИ”.

**4. Оптоэлектронные приборы.** Тиристоры и транзисторы обладают гальванической связью между цепью управления и нагрузкой. Если такая связь недопустима, то применяются оптоэлектронные приборы (оптроны). В корпусе оптрона установлены излучающий элемент (обычно фотодиод) и воспринимающий элемент – фототранзистор, фототиристор или фоторезистор. При подаче сигнала на фотодиод он начинает излучать, и его излучение воздействует на воспринимающий элемент, открывая фототранзистор или фототиристор в цепи нагрузки. Электрическое сопротивление между цепями управления и нагрузки составляет  $10^{12}$  Ом, емкость между ними не менее 0,1 пФ. Эти свойства позволяют повысить помехоустойчивость и надежность аппарата, упростить его схему. Оптроны дают малую задержку в срабатывании (1 мкс). Оптронные реле могут быть выполнены на силовых оптронах, которые непосредственно управляют током в нагрузке. В некоторых схемах управляющий сигнал непосредственно воздействует на светодиоды оптронов. В настоящее время созданы оптотиристоры на ток до 1500 А и напряжение до 4 кВ.

**Литература:** 2, стр. 245-281, 403-465; 4, стр. 267-295.

### **Контрольные вопросы:**

1. В чем заключается особенность работы бесконтактных электрических аппаратов?
2. Дайте классификацию усилителей.



3. Какое устройство называется магнитным усилителем? В чем его особенность?
4. Где применяются магнитные усилители?
5. Где применяются электронные усилители? В чем их особенность?
6. Какое устройство называется полупроводниковым триодом (транзистором)?
7. Какое устройство называется тиристором?
8. В чем состоит особенность полупроводникового реле?
9. Какие устройства называют логическими элементами? Какие логические элементы Вы знаете?
10. Какое устройство называется оптоэлектронным прибором (оптроном)?

#### 10 Электрические аппараты с жидкометаллическими контактами

**Цель лекции:** ознакомиться с разновидностями электрических аппаратов с жидкометаллическими контактами.

#### **План лекции:**

1. Особенности электрических аппаратов с жидкометаллическими контактами (ЖМК).
2. Конструкция и принцип действия некоторых электрических аппаратов с ЖМК.

1. Особенности электрических аппаратов с жидкометаллическими контактами (ЖМК).

Переходное сопротивление в жидкометаллических контактах (ЖМК), процессы гашения электрической дуги и тепловые процессы в них в настоящее время изучены мало. Проводятся работы по созданию теории проектирования аппаратов с ЖМК. Выпускаемые в настоящее время аппараты с ЖМК выполнены на базе частичных исследований. Разработка ведется на базе эксперимента и натурной обработки образцов. Выпускаются электрические аппараты, контакты которых, смочены жидким металлом, считается, что они обладают: большим быстродействием, высокой надежностью, большим сроком службы. Достоинства жидкометаллических контактов были рассмотрены выше.

2. Конструкция и принцип действия некоторых электрических аппаратов с ЖМК.

а) *Разборные контактные соединения с переходными пластинами, расположенными между контактирующими элементами (рисунок 14).*

Переходная пластина (прокладка) легко деформируемая по объему металлическая (чаще всего медная) фольга, покрытая с каждой стороны легкоплавким составом (температура плавления  $50-75^{\circ}\text{C}$ ). При сборке фольга за счет сжатия деформируется. При прохождении тока покрытие пластины плавится вследствие нагрева, следовательно, происходит полное или частичное заполнение зазоров между макро- и микронеровностями контактирующих поверхностей. Площадь контактирования увеличивается (иногда до 100%

рабочей поверхности контакта),  $R_{пер}$  уменьшается, увеличивается его стабильность.



Рисунок 14 - Разборное контактное соединения с переходными пластинами

б) Реостат с плавным изменением сопротивления (рисунок 15).

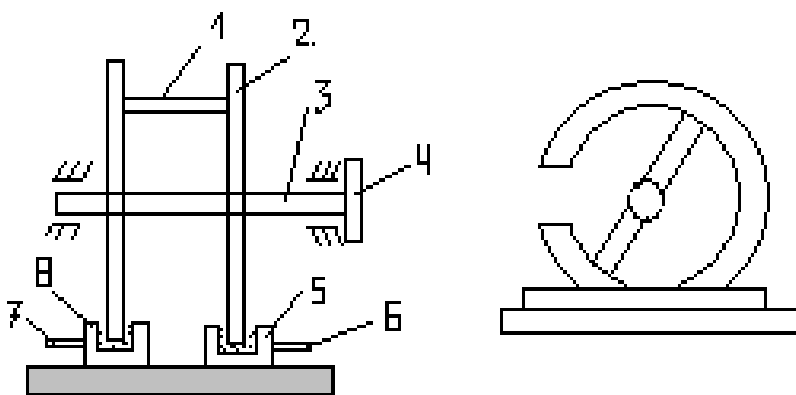


Рисунок 15 - Реостат с плавным изменением сопротивления

На изоляционной оси 3 закреплены резисторы, выполненные в виде разомкнутых колец 2, соединенных между собой с помощью перемычки 1. Нижние части колец погружены в ванны с ртутью 5 и 8, к которым присоединены токопроводы 6 и 7. Ось поворачивается штурвалом 4, изменяется длина пути тока по кольцам, следовательно, изменяется сопротивление реостата. Резисторы могут быть выполнены в виде труб, которые охлаждаются водой. Ванны также могут охлаждаться водой, значит, реостаты могут выполняться на токи в тысячи ампер. Весь реостат размещается в герметическом корпусе, заполненном инертным газом (чаще всего азотом).

в) *Электромагнитный ртутный контактор* (рисунок 16).

В корпус 1, разделенный изоляционной перегородкой 2, заливается жидкий металл 3, на поверхности которого плавают полые ферромагнитные плунжеры 4. При подаче напряжения на катушку 5 плунжеры погружаются в жидкий металл, который через отверстие 6 замыкает электрическую цепь посредством контактов 7. Разрыв цепи происходит при снятии напряжения с катушки. Так как разрыв происходит по жидкому металлу, следовательно, обеспечивается высокая эрозионная стойкость контакта.

г) *Жидкометаллический самовосстанавливающий предохранитель* (рисунок 17).

Состоит из электроизоляционной втулки с капиллярным отверстием 4, заполненным жидким металлом 5, которые помещены в металлический корпус 2 с присоединительными зажимами 1 и 8, которые изолируются от корпуса с помощью керамической изоляции 3. Капилляр закрыт герметично и имеет специальное демпферное устройство 6 и 7 (демпфер, поршень и объем сжатого газа). При протекании через капилляр тока определенного значения металл в нем испаряется, образуется паровая пробка и цепь размыкается. Через некоторое время пары металла конденсируются и цепь восстанавливается.

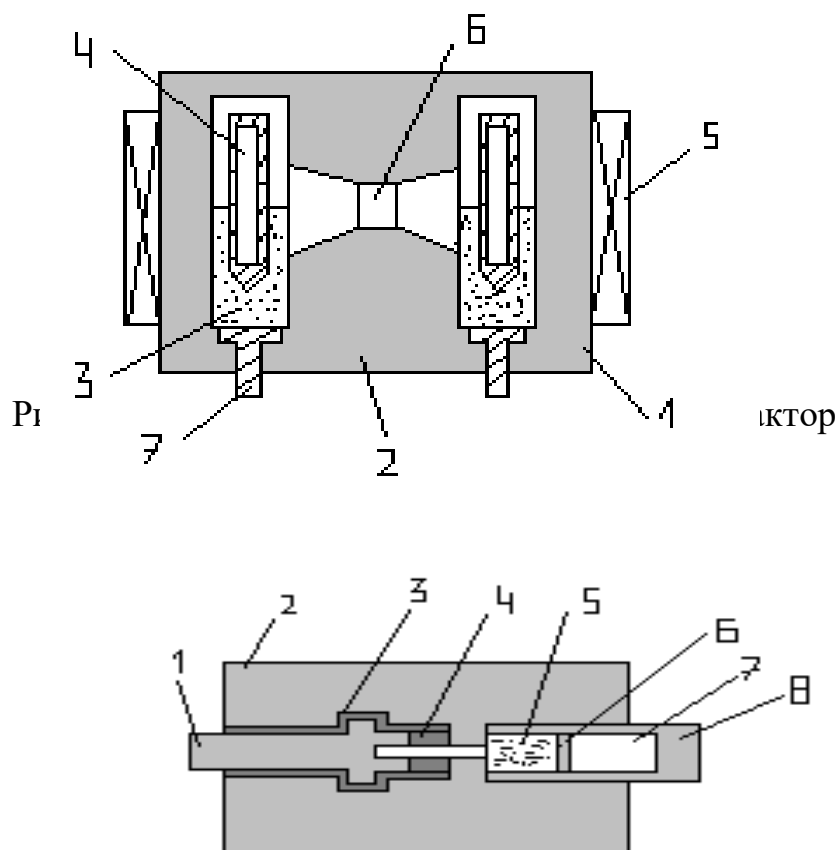


Рисунок 17- Жидкометаллический самовосстанавливающийся предохранитель

Значение тока короткого замыкания 250 кА при напряжении переменного тока 450 В. Во время срабатывания предохранителя испарение жидкого металла происходит взрывообразно с возникновением давления до 300 МПа. Для компенсации этого давления служит демпфер, а для предотвращения разрушения - корпус. Такие предохранители включаются последовательно с выключателем, который отключает цепь после того, как предохранитель ее разомкнет. Совместная работа обоих аппаратов строго синхронизирована с учетом того, что восстановление электрической проводимости предохранителя составляет 5-6 мс.

д) *Магнетогидродинамическое реле* (рисунок 18).

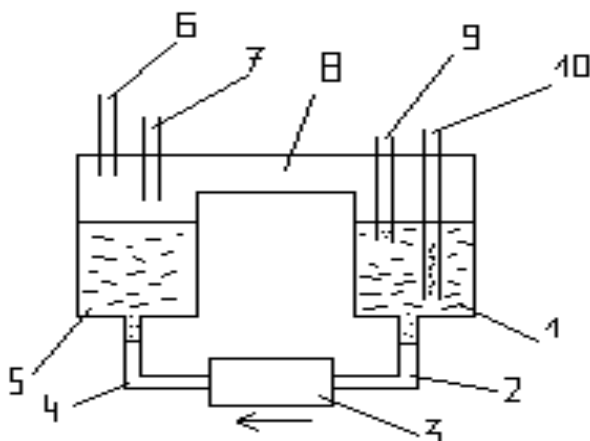


Рисунок 18 - Магнетогидродинамическое реле

Реле представляет собой два сообщающихся сосуда 1 и 5, соединенные через магнетогидродинамический насос 3 и трубки 2 и 4 с электропроводящей жидкостью. Производительность насоса - функция входных электрических величин. При определенном значении входных величин жидкость перемещается влево и через некоторое время, определенное входными величинами, контакты 9 и 10 размыкаются, а контакты 6 и 7 - замыкаются, следовательно, осуществляется управление процессом. Для выравнивания давления в сообщающихся сосудах служит трубка 8.

В последнее время в жидкометаллических коммутационных аппаратах применяют ферромагнитную жидкость в качестве элемента, перемещающего жидкий металл в пространстве и в качестве токопроводящего элемента.

е) *Коммутационное устройство «режущего» типа* (рисунок 19).

Электроды 1 и 6 размещены в углублениях изоляционных пластин 3 и 5, между которыми находится изоляционная пластина с отверстием 4. Когда отверстие 2 расположено между углублениями пластин, цепь электродов замкнута. При перемещении пластины 4, а, следовательно, и отверстия в крайнее правое или левое положение отверстие с заполняющим его металлом находится между изоляционными пластинами и значит, цепь размыкается.

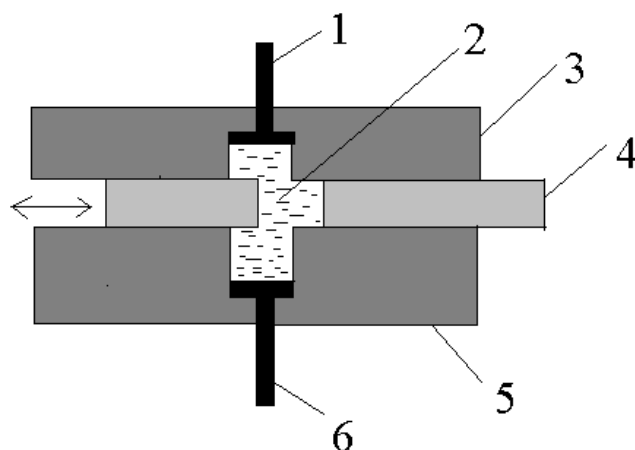


Рисунок 19-Коммутационное устройство «режущего» типа

ж) Жидкометаллический коммутационный аппарат «пережимного» типа (рисунок 20).

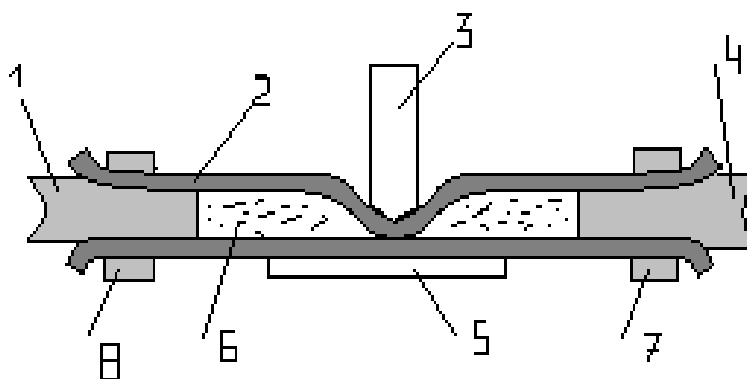


Рисунок 20 - Жидкометаллический коммутационный аппарат «пережимного» типа: 1, 4 – электроды; 2 - эластичная оболочка; 3 - подвижный пережимной элемент; 5 – упор; 6 - жидкий металл; 7, 8 - скобы

Коммутация осуществляется путем пережима оболочки с жидким металлом.

**Литература:** 2, стр. 118-122.

**Контрольные вопросы:**

1. Назовите достоинства электрических аппаратов с ЖМК.
2. Какими достоинствами обладают электрические аппараты с ЖМК?
3. Какими недостатками обладают электрические аппараты с ЖМК?
4. Объясните принцип действия электрических аппаратов с ЖМК.

11 Простейшие методы расчета нагрева и охлаждения электрических аппаратов и их частей

**Цель практического занятия:** научиться определять коэффициент поверхностного эффекта и коэффициент эффекта близости для проводников.

**Теоретические сведения:**

Задачи по расчету теплоотдачи с поверхностей нагретых тел, для решения которых необходимо использовать формулу Ньютона и эмпирические формулы коэффициентов теплоотдачи для простейших, наиболее распространенных в электрических аппаратах поверхностей охлаждения.

Количество теплоты, выделяемое в неоднородном проводнике объемом  $V$  за отрезок времени  $\Delta t = t_2 - t_1$  при неравномерном распределении плотности тока  $j$  в нем, равно:

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} \int_V j^2 \rho_0 (1 + \alpha + \nu) dV dt, \quad (25)$$

где  $\rho_0, \alpha$  - удельное сопротивление, Ом·м, и температурный коэффициент сопротивления,  $1/^\circ\text{C}$ , материала проводника при  $0^\circ\text{C}$  соответственно;

$\nu$  - температура проводника,  $^\circ\text{C}$ .

Мощность источников теплоты для однородных проводников при переменном токе можно определить по упрощенной формуле:

$$P_{\sim} = k_{\Pi} k_{\sigma} I^2 \rho_0 (1 + \alpha \nu) l / S, \quad (26)$$

где  $k_{\Pi}$  и  $k_{\sigma}$  - соответственно коэффициенты поверхностного эффекта и эффекта близости, которые для неферромагнитных проводников определяют по графикам приложения А1-А5;

$l$  и  $S$  - длина, м, и площадь поперечного сечения,  $\text{м}^2$ , проводника соответственно.

Для проводников из ферромагнитного материала:

$$k_{\Pi} = S / (\Pi z_a), \quad (27)$$

где  $S, \Pi$  - площадь,  $\text{м}^2$ , и периметр поперечного сечения, м, проводника соответственно;

$z_a$  - глубина проникновения электромагнитной волны, м:

$$z_a = \sqrt{\rho / (\omega \mu_0 \mu_r)}, \quad (28)$$

если  $H > H_{\mu_r \text{ макс}}$

$$z_a = \sqrt{2\rho/(\omega\mu_0\mu_r)} , \quad (29)$$

если  $H \leq H_{\mu_r\text{-макс}}$

где  $\omega$  - угловая частота переменного поля;  $\mu_0$  - магнитная постоянная ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м);

$\mu_r$  - относительная магнитная проницаемость;  $H$  - напряженность магнитного поля, Гн/м;

$H_{\mu_r\text{-макс}}$  - амплитуда первой гармоники напряженности магнитного поля, Гн/м, соответствующая максимуму  $\mu_r$  на кривой намагничивания материала.

Для упрощенных расчетов мощность источников теплоты в ферромагнитных проводниках при переменном токе определяют по формуле:

$$P = (2,9...3,25)10^{-4} \left( \frac{I}{\Pi} \right)^{5/3} F \sqrt{f} \quad (30)$$

где  $F$  и  $\Pi$  - соответственно боковая поверхность,  $\text{м}^2$ , и периметр поперечного сечения, м, проводника;

$f$ - частота переменного тока, Гц.

Мощность источников теплоты в ферромагнитных нетоковедущих частях, находящихся в переменном магнитном поле, определяют:

-для замкнутого сплошного магнитопровода, на котором надета катушка:

$$P = (2,9...3,25)10^{-4} \left( \frac{IN}{l_{cp}} \right)^{5/3} F / \sqrt{f} , \quad (31)$$

где  $IN$  – магнитодвижущая сила катушки, А;

$l_{cp}$  - длина средней магнитной силовой линии, м;

$F$  - боковая поверхность магнитопровода,  $\text{м}^2$ .

Для практических расчетов рекомендуется принимать среднее значение числового коэффициента:

-для замкнутого шихтованного магнитопровода:

$$P = p_{y\partial} m \quad (32)$$

где  $p_{y\partial}$  - удельные потери, определяют по графикам (приложения А7 и А8);

$m$ - масса магнитопровода;

-для ферромагнитного кольца, охватывающего проводник с током  $I$ :

$$P = (2,9...3,25)10^{-4} \left( \frac{I}{l_{cp}} \right)^{5/3} F / \sqrt{f}, \quad (33)$$

где  $l_{cp}$  - длина средней магнитной силовой линии, м;

$F$  - поверхность кольца, м<sup>2</sup>;

-для единицы длины ферромагнитной полосы (балки), расположенной перпендикулярно проводнику с током  $I$ :

$$P = \frac{I^2 \Pi \rho \cos^4 \alpha}{4z_a \pi^2 d^2}, \quad (34)$$

где  $\alpha$  - угол между вектором напряженности магнитного поля в данной точке и его составляющей вдоль продольной оси полосы;

$\Pi$  - периметр поперечного сечения, м;

$\rho$  - удельное сопротивление материала полосы, Ом · м;

$d$  - минимальное расстояние между осями проводника с током и полосы, м.

Мощность источников теплоты в электрической изоляции, находящейся в переменном электрическом поле:

$$P = \omega C U^2 \operatorname{tg} \delta, \quad (34)$$

где  $\omega$  - угловая частота переменного поля;

$C$  - электрическая емкость изолятора, Ф;

$U$  - напряжение, приложенное к изолятору, В;

$\operatorname{tg} \delta$  - тангенс угла диэлектрических потерь.

Количество теплоты, которое отводится с поверхности электрического аппарата в окружающую среду в стационарном режиме, можно определить по формуле Ньютона:

$$P = k_T F (\vartheta - \vartheta_0), \quad (35)$$

где  $k_T$  - коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup> · К);

$F$  - охлаждающая поверхность, м<sup>2</sup>;

$\vartheta$  и  $\vartheta_0$  - температуры поверхности и окружающей среды соответственно, °С.

Для приближенных расчетов коэффициент теплоотдачи определяют по эмпирическим формулам:

-для окрашенной краской прямоугольной шины с размерами поперечного сечения 120×10 мм, находящейся в спокойном воздухе, большая сторона сечения, которой расположена вертикально:



$$k_T = 9,2(1 + 0,9 \cdot 10^{-2} \theta) \quad (36)$$

где  $\theta = \vartheta - \vartheta_0$  - перепад температур;

-для горизонтальных цилиндрических проводников, окрашенных краской и расположенных горизонтально в спокойном воздухе:

$$k_T = 10k_1(1 + k_2 \cdot 10^{-2} \theta), \quad (37)$$

где  $k_1$  и  $k_2$  определяют из таблицы 3.

Таблица 3 –Значения коэффициентов  $k_1$  и  $k_2$

Диаметр проводника, мм	0,3	10	40	80	200
$k_1, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	4,5	2,24	1,11	1,08	1,02
$k_2, \text{К}^{-1}$	1,7	1,14	0,88	0,75	0,68

-для круглой трубы диаметром  $d$ , внутри которой протекает вода со скоростью  $\omega$ :

$$k_T = 1710\omega^{0,8}d^{0,2}(22 - \theta)^{0,4}, \quad (38)$$

-для цилиндрических катушек в случае, когда охлаждающая поверхность  $10^{-4} < F < 10^{-2} \text{ м}^2$ :

$$k_T = 2,1[1 + 0,005(\vartheta - \vartheta_0)]/\sqrt[3]{F}, \quad (39)$$

-для цилиндрических катушек, охлаждающая поверхность которых  $10^{-2} < F < 0,5 \text{ м}^2$ :

$$k_T = 3,6[1 + 0,005(\vartheta - \vartheta_0)]/\sqrt[5]{F}. \quad (40)$$

#### **План практического занятия:**

1. Определить коэффициент поверхностного эффекта для проводника круглого сечения.
2. Определить коэффициент поверхностного эффекта для проводника трубчатого сечения.
3. Определить коэффициент поверхностного эффекта для проводника прямоугольного сечения.
4. Определить коэффициент эффекта близости двух проводников прямоугольного сечения, расположенных в одной плоскости и в параллельных плоскостях.

#### **Пример решения задач.**

### Задача 1:

Определить коэффициент поверхностного эффекта для алюминиевого шинпровода, нагретого протекающим по нему переменным током промышленной частоты до температуры  $\vartheta = 95$  °С, для следующих случаев: а) шинпровод круглый  $d = 80$  мм; б) шинпровод трубчатый с наружным диаметром  $d_{нар} = 80$  мм и с внутренним диаметром  $d_{вн} = 50$  мм; в) шинпровод трубчатый с  $d_{нар} = 80$  мм,  $d_{вн} = 74$  мм.

Решение: Коэффициент поверхностного эффекта можно определить по графикам, изображенным на графиках приложения А1 и А2. Для этого необходимо вычислить параметр:

$$\sqrt{f/R_{100}},$$

где  $f$  - частота переменного тока, Гц;

$R_{100}$  - активное сопротивление постоянному току проводника длиной  $l = 100$  м, Ом.

Для условия (а) данной задачи:

$$R_{100} = \rho_0(1 + \alpha\vartheta)l/S = 2,62 \cdot 10^{-8}(1 + 0,0042 \cdot 95) \cdot 100 / (3,14 \cdot 40^2 \cdot 10^{-6}) = 7,3 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}$$

$$\sqrt{f/R_{100}} = \sqrt{50 / (7,3 \cdot 10^{-4})} = 262 \text{ Гц}^{1/2} \text{ Ом}^{-1/2}$$

Из графика изображенного в приложении А1,  $k_{II} = 1,75$

Для условия (б) задачи:

$$R_{100} = \rho_0(1 + \alpha\vartheta)l/S = 2,62 \cdot 10^{-8}(1 + 0,0042 \cdot 95) \cdot 100 / (3,14 \cdot (40^2 \cdot 10^{-6} - 25^2 \cdot 10^{-6})) = 1,197 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$$

$$\sqrt{f/R_{100}} = \sqrt{50 / (1,197 \cdot 10^{-3})} = 204 \text{ Гц}^{1/2} \text{ Ом}^{-1/2}$$

Из графика изображенного в приложении А.2,  $k_{II} = 1,1$

Для условия (в) задачи:

$$R_{100} = \rho_0(1 + \alpha\vartheta)l/S = 2,62 \cdot 10^{-8}(1 + 0,0042 \cdot 95) \cdot 100 / (3,14 \cdot (40^2 \cdot 10^{-6} - 37^2 \cdot 10^{-6})) = 5,05 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$$

$$\sqrt{f/R_{100}} = \sqrt{50 / (5,05 \cdot 10^{-3})} = 100 \text{ Гц}^{1/2} \text{ Ом}^{-1/2}$$

Из графика изображенного в приложении А2,  $k_{II} = 1,0$

Ответ: а)  $k_{II} = 1,75$ ; б)  $k_{II} = 1,1$ ; в)  $k_{II} = 1,0$ .

### Задача 2:

При решении задачи необходимо определить значение  $R_{100}$  и  $\sqrt{f/R_{100}}$ , далее воспользоваться графиком приложения А3 для определения  $k_{II}$  и графиками приложения А4 и А5. для определения  $k_{\phi}$ .

**Литература:** 1, стр. 5-28; 2, стр. 58-87; 3, стр. 10-32; 4, стр. 24-42; 5, стр. 4-63.

12 Расчет электродинамических усилий с использованием закона Био-Савара-Лапласа

**Цель практического занятия:** научиться электродинамические усилия, действующие на проводники с током.

#### **Теоретические сведения:**

Ниже приведены сведения по вычислению электродинамических усилий на прямолинейные участки проводников как с учетом влияния размеров поперечного сечения, так и без него.

В ряде случаев электродинамические усилия довольно легко можно вычислить, используя закон Био-Савара-Лапласа для определения значений и направления магнитной индукции. При этом используются следующие расчетные формулы и соотношения.

Формула Ампера для определения электродинамических усилий (ЭДУ), действующих на линейный проводник с током, находящийся в однородном магнитном поле:

$$F = i l B \sin \gamma, \quad (41)$$

где  $i$  - значение тока, А;

$l$  - длина проводника, м;

$B$ - магнитная индукция, Тл;

$\gamma$ - угол между направлением тока и вектором индукции.

Формула Ампера в векторном виде:

$$\vec{F} = i[\vec{l}, \vec{B}]. \quad (42)$$

Формула Ампера в дифференциальной форме в векторном виде:

$$d\vec{F} = i[d\vec{l}, \vec{B}]. \quad (43)$$

Закон Био-Савара-Лапласа:

$$dH = i dl \sin \alpha / (4\pi r^2), \quad (44)$$

где  $i$ - ток в проводнике, А;

$dl$  – элементарный участок проводника, м;

$\alpha$  - угол между направлением тока и направлением радиус-вектора  $\vec{r}$  от середины участка  $dl$  до точки пространства, в которой определяется напряженность магнитного поля  $dH$ ;

$r$ - длина вектора  $\vec{r}$ , м.

Закон Био-Савара-Лапласа в векторной форме:

$$d\vec{H} = \frac{i}{4\pi r^2} \left[ d\vec{l} \frac{\vec{r}}{r} \right]. \quad (45)$$

Элементарное электродинамическое усилие, действующее со стороны элементарного проводника длиной  $dl_2$  (м), с током  $i_2$  (А), на элементарный проводник длиной  $dl_1$  (м) с током  $i_1$  (А), находящегося на расстоянии  $r$  (м) от проводника  $dl_2$ :

$$d^2\vec{F}_{1/2} = \frac{\mu_0 i_1 i_2}{4\pi r^2} \left[ d\vec{l}_1 \left[ d\vec{l}_2 \frac{\vec{r}_{21}}{r} \right] \right], \quad (46)$$

где  $\mu_0$  - магнитная проницаемость воздуха,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м.

Электродинамическое усилие, Н, между двумя проводниками с токами  $i_1$  и  $i_2$ , А:

$$F_{1/2} = \frac{\mu_0 i_1 i_2}{4\pi} k_{1/2}, \quad (47)$$

где  $k_{1/2}$  - коэффициент контура электродинамических усилий (таблица приложения В5).

#### **План практического занятия:**

1. Определить величину электродинамического усилия, действующего между параллельно расположенными шинами.
2. Определить величину электродинамического усилия, возникающего между двумя расположенными параллельно друг другу шинами прямоугольного сечения.

#### **Пример решения задач.**

##### Задача 3:

Определить электродинамическое усилие, действующее между параллельно расположенными шинами, если  $I_1 = 10$  кА,  $I_2 = 15$  кА  $l_1 = 1$  м,  $l_2 = 1,5$  м,  $a = 0,5$  м.

Решение: Электродинамическое усилие определим по формуле (47)  $F_{1/2} = \mu_0 I_1 I_2 k_{1/2} / 4\pi$ . Из таблицы приложения В.5 коэффициент контура электродинамических усилий:

$$k_{1/2} = (d_1 + d_2 - (s_1 + s_2))/a = 2(1,35 - 0,556)/0,5 = 3,17$$

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

$$\text{Тогда } F_{1/2} = 10^{-7} \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 15 \cdot 10^3 \cdot 3,17 = 47,7 \text{ Н}$$

$$\underline{\text{Ответ : }} F_{1/2} = 46,7 \text{ Н.}$$

#### Задача 4:

Определить величину электродинамического усилия, возникающего между двумя расположенными параллельно друг другу шинами прямоугольного сечения  $h \times b = 100 \times 10$  мм на длине  $l = 2$  м. Расстояние между осями шин  $a = 20$  мм, по ним протекает ток к.з.  $I = 54$  кА. Шины находятся в воздухе вдали от ферромагнитных частей, и ток по их сечению распределен равномерно. При решении задач учесть влияние поперечных размеров на величину электродинамического усилия. Шины расположены широкими сторонами друг к другу.

Решение: Величина электродинамического усилия  $F = 2 \cdot 10^{-7} k_\phi I^2 l / a$ . Для данного случая расположения проводников величины:

$$(a - b) / (b + h) = (20 - 10) / (10 + 100) = 0,091;$$

$$b/h = 10/100 = 0,1.$$

Тогда из графика приложения П.6 коэффициент формы  $k_\phi = 0,44$ . Следовательно:  $F = 2 \cdot 10^{-7} \cdot 0,44 \cdot 54^2 \cdot 10^6 \cdot 2 / (20 \cdot 10^{-3}) = 257000 \text{ Н.}$

$$\underline{\text{Ответ : }} F = 257000 \text{ Н.}$$

**Литература:** 1, стр. 130-168; 2, стр. 31-57; 3, стр. 32-49; 4, стр. 8-23; 5, стр. 63-78.

### 13 Электрическое переходное сопротивление контактов и их нагрев

**Цель практического занятия:** научиться определять электрическое переходное сопротивление контактов.

#### **Теоретические сведения:**

В этом параграфе приведены сведения по определению сопротивления стягивания при чистых контактных поверхностях, площади касания для различных материалов и форм контактов, полного переходного сопротивления контактных пар различных конструктивных форм по эмпирическим формулам, а также примеры определения температур нагрева контактов при длительном и кратковременном процессах нагрева аппаратов. При этом используются следующие расчетные формулы и соотношения.

Сопротивление стягивания одноточечного контакта (Ом):

$$R_c = \frac{\rho}{2a}, \tag{48}$$

где  $\rho$  - удельное сопротивление материала контактов, Ом · м;

$a$  – радиус площадки касания, м.

Для круглых площадок касания в случае упругих деформаций радиус площадки касания (м):

$$a = \sqrt{\frac{3}{4} P \left( \frac{1 - \sigma_1^2}{E_1} + \frac{1 - \sigma_2^2}{E_2} \right) \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)^{-1}}, \quad (49)$$

где  $P$  – контактное нажатие, Н;

$\sigma_1, \sigma_2$  - коэффициенты Пуассона;

$E_1, E_2$  - модули упругости материалов контактов, Н/м<sup>2</sup>;

$r_1, r_2$  - радиусы кривизны контактирующих поверхностей, м.

При контактировании шара с плоскостью, выполненных из одинаковых материалов при  $\sigma = 0,3$ , что имеет место для меди, железа и никеля:

$$a = 1,11 \sqrt[3]{Pr/E}. \quad (50)$$

Для тех же условий при контактировании двух сферических поверхностей:

$$a = 0,86 \sqrt[3]{Pr/E}. \quad (51)$$

В случае наличия пластических деформаций:

$$a = \sqrt{\frac{P}{\pi \sigma_{CM}}}, \quad (52)$$

где  $\sigma_{CM}$  - напряжение смятия, Н/м<sup>2</sup>.

Эмпирическая формула для контактного сопротивления:

$$R_K = k/P^m \quad (53)$$

где  $k$  – коэффициент, зависящий от материала контактов;

$P$  - контактное нажатие, кГ;

$m$  – зависит от числа точек контактирования и вида контактного соединения.

В случае пластических деформаций для меди  $k_{Cu} = 2,3 \cdot 10^{-4}$ . Тогда для других материалов:

$$k_X = k_{Cu} \frac{\rho_X \sqrt{\sigma_X}}{\rho_{Cu} \sqrt{\sigma_{Cu}}}, \quad (54)$$

где  $k_{Cu}, \rho_{Cu}, \sigma_{Cu}$  - коэффициент контактного сопротивления, удельное сопротивление и напряжение смятия для меди;

$k_x, \rho_x, \sigma_x$  - соответственно те же величины для другого материала контактов.

Зависимость сопротивления контакта от температуры:

$$R_K = R_{K,0} \left[ 1 + \frac{2}{3} \alpha (\vartheta_a - \vartheta_K) \right], \quad (55)$$

где  $R_{K,0}$  - контактное сопротивление при температуре на границе области стягивания, Ом;

$\alpha$  - температурный коэффициент сопротивления материала контакта,  $K^{-1}$ ;

$\vartheta_a$  и  $\vartheta_K$  - температуры контактов площадок и границы области стягивания, К.

Перепад температуры контакта (на границе области стягивания) над температурой окружающей среды:

$$\theta_K = \frac{I^2 R_K}{2\sqrt{\lambda k_T F S}} + \frac{I^2 R}{k_T F}, \quad (56)$$

где  $I$  - ток через контакты, А;

$R_K$  - контактное сопротивление, Ом;

$R$  - сопротивление проводника, Ом;

$f$  - охлаждающая поверхность единицы длины проводника,  $m^2$ ;

$k_T$  - коэффициент теплоотдачи,  $Вт/(м \cdot К)$ ,

$S$  - площадь поперечного сечения проводника,  $m^2$ .

#### **План практического занятия:**

1. Определить величину сопротивления стягивания в месте контакта.
2. Определить температуру контакта.

#### **Пример решения задач.**

##### Задача 5:

Два круглых медных стержня на торцах обработаны под сферу радиуса  $r = 40$  мм и стянуты силой  $P = 100$  Н. Определить сопротивление стягивания в месте контакта.

Решение: Найдем радиус площадки касания при условии, что имеет место упругая деформация по формуле (51):

$$a = 0,86\sqrt[3]{Pr/E} = 0,86\sqrt[3]{100 \cdot 40 \cdot 10^{-3} / 10,8 \cdot 10^{10}} = 2,86 \cdot 10^{-4} \text{ м}$$

где  $E = 10,8 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup> - модуль упругости меди (приложение А3).

Механическое напряжение в контактной площадке:

$$\sigma = P/(\pi a^2) = 100/(3,14 \cdot 2,86^2 \cdot 10^{-8}) = 38,9 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$$

Для мягкой меди это напряжение больше, чем напряжение смятия  $\sigma_{CM} = 38,3 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$  (приложения А6), следовательно, будет иметь место пластическая деформация. Радиус площадки касания определим по формуле (52):

$$a = \sqrt{\frac{P}{\pi \sigma_{CM}}} = \sqrt{100/(3,14 \cdot 38,3 \cdot 10^7)} = 2,89 \cdot 10^{-4} \text{ м.}$$

Тогда сопротивление стягивания из формулы (48) будет равно:

$$R_{CT} = \rho/(2a) = 1,62 \cdot 10^{-8}/(2 \cdot 2,89 \cdot 10^{-4}) = 0,28 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.}$$

Здесь  $\rho = 1,62 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$  – удельное сопротивление меди (приложение В3).

Ответ:  $0,28 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}$ .

#### Задача 6:

Определить температуру контакта, выполненного в виде двух плоских медных шин размером  $60 \times 10 \text{ мм}$ , составленных встык и сжатых силой  $P=300 \text{ Н}$ . Через контакт протекает ток  $I= 600 \text{ А}$ , шины находятся в воздухе, температура которого  $\vartheta_0 = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ , коэффициент теплоотдачи с поверхностей шин  $k_T = 16 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . При расчете принять, что шины бесконечно длинные.

Решение: Определим установившееся значение температуры шины в точках удаленных от места контактирования, из условия, что:

$$\vartheta - \vartheta_0 = I^2 \rho_0 (1 + \alpha \vartheta) / (S k_T F).$$

Отсюда:

$$\vartheta = \frac{I^2 \rho_0 + \vartheta_0 k_T F S}{k_T S F - I^2 \rho_0 \alpha} = \frac{600^2 \cdot 1,62 \cdot 10^{-8} + 35 \cdot 16 \cdot 600 \cdot 10^{-6} \cdot 140 \cdot 10^{-3}}{16 \cdot 600 \cdot 10^{-6} \cdot 140 \cdot 10^{-3} - 600^2 \cdot 1,62 \cdot 10^{-8} \cdot 0,0043} = 75 \text{ }^\circ\text{C}$$

где  $S=600 \text{ мм}^2$ ;  $F=2(60+10) \cdot 1=140 \text{ мм}^2$ ;  $\rho_0 = 1,62 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ;  $\alpha = 0,0043$ .

Поскольку в нашем случае контакт линейный, его сопротивление:

$$R_{к.о} = \frac{k}{p^{0,7}} = 10^{-4}/(300/9,8)^{0,7} = 0,92 \cdot 10^{-5} \text{ Ом.}$$

Принимая приближенно температуру контакта равной температуре проводника, имеем:



$$R_K = R_{K.0} \left( 1 + \frac{2}{3} \alpha \vartheta \right) = 0,92 \cdot 10^{-5} \left( 1 + \frac{2}{3} 0,0043 \cdot 75 \right) = 1,18 \cdot 10^{-5} \text{ Ом.}$$

Подставляем все необходимые данные в формулу (56) и тогда

$$\theta_{\text{КОИТ}} = \frac{I^2 R_K}{2\sqrt{\lambda f k_T S}} + \frac{I^2 R}{k_T F} = \frac{600^2 \cdot 1,18 \cdot 10^{-5}}{2\sqrt{390 \cdot 140 \cdot 10^{-3} \cdot 16 \cdot 600 \cdot 10^{-6}}} + \frac{600^2 \cdot 1,62 \cdot 10^{-8} (1 + 0,0043 \cdot 75) 1}{600 \cdot 10^{-6} \cdot 16 \cdot 140 \cdot 10^{-3} \cdot 1} = 41^\circ \text{C}$$

где  $R = \rho_0 (1 + \alpha \vartheta) / S$  - сопротивление единицы длины проводника;

$\lambda = 390 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  – теплопроводность меди.

Следовательно,  $\vartheta_{\text{КОИТ}} = \theta_{\text{КОИТ}} + \vartheta_0 = 41 + 35 = 76 \text{ }^\circ\text{C}$

Ответ:  $\vartheta_{\text{КОИТ}} = 76 \text{ }^\circ\text{C}$ .

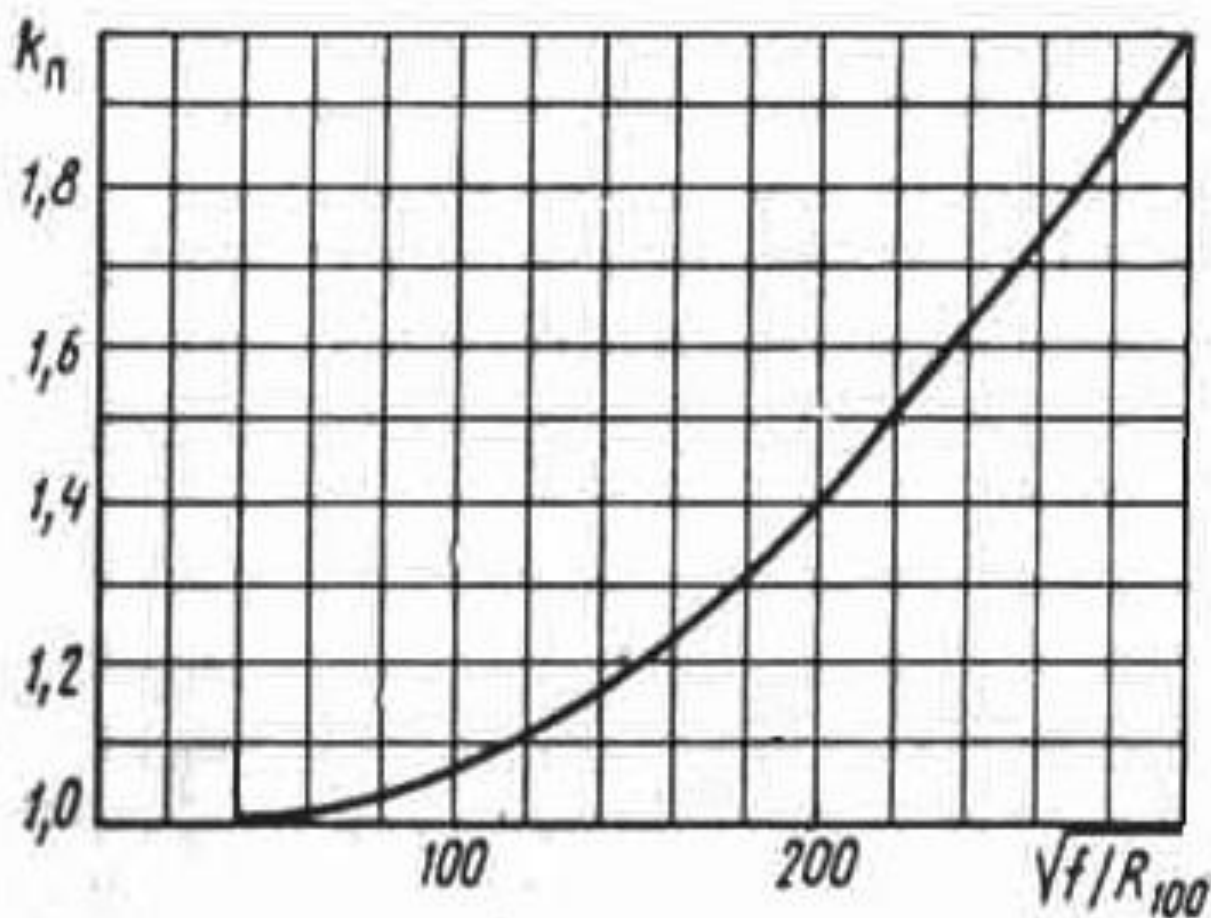
**Литература:** 1, стр. 247-307; 2, стр. 88-122; 4, стр. 24-39; 5, стр. 105- 114.

## Заключение

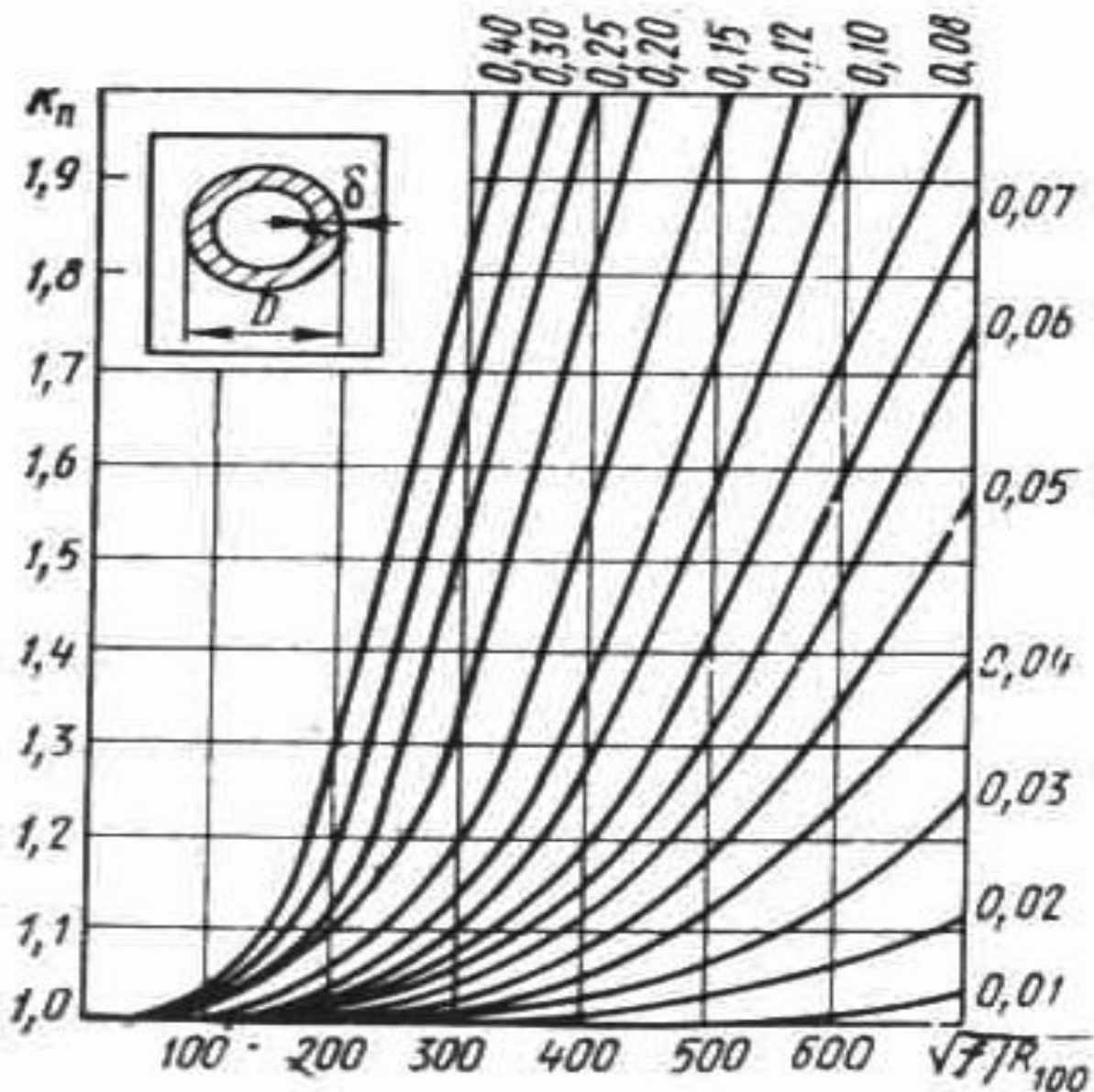
В данном учебном пособии рассмотрены вопросы: основы теории электрических аппаратов (основные положения), электрические контакты и материал для контактов, износ контактов при замыкании и размыкании, электрическая дуга и способы ее гашения, электромагниты, аппараты высокого и низкого напряжения (до 1000 В), аппараты управления, электрические реле, бесконтактные электрические аппараты, электрические аппараты с жидкометаллическими контактами, простейшие методы расчета нагрева и охлаждения электрических аппаратов и их частей, расчет электродинамических усилий с использованием закона Био-Савара-Лапласа, электрическое переходное сопротивление контактов и их нагрев.

Изучение данного учебного пособия поможет студентам специальности 5В071800 - Электроэнергетика в дальнейшем правильно использовать электрические аппараты в электрических цепях высокого и низкого напряжения. А также может быть полезно студентам других специальностей технического направления обучения.

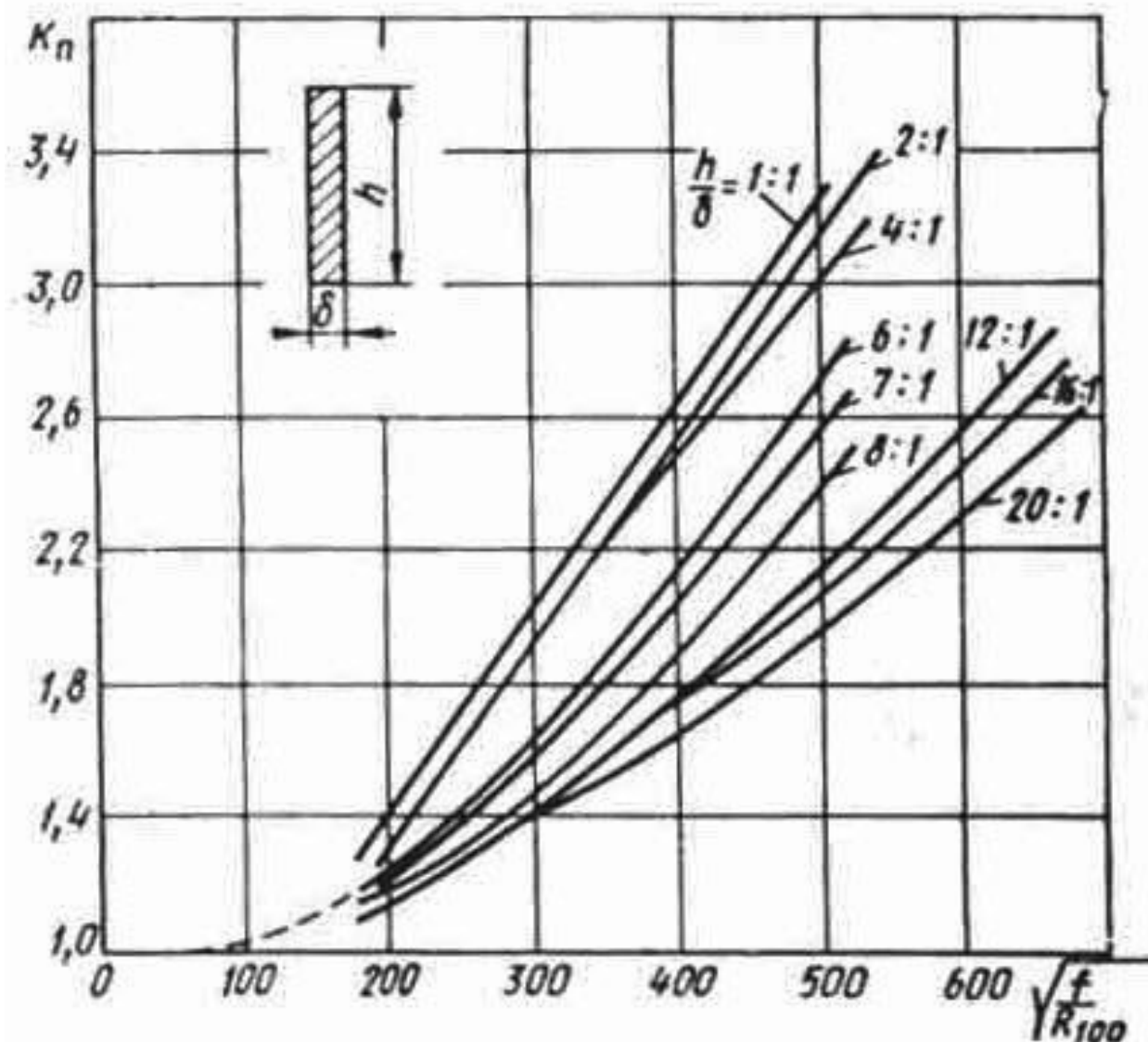
## Приложение А



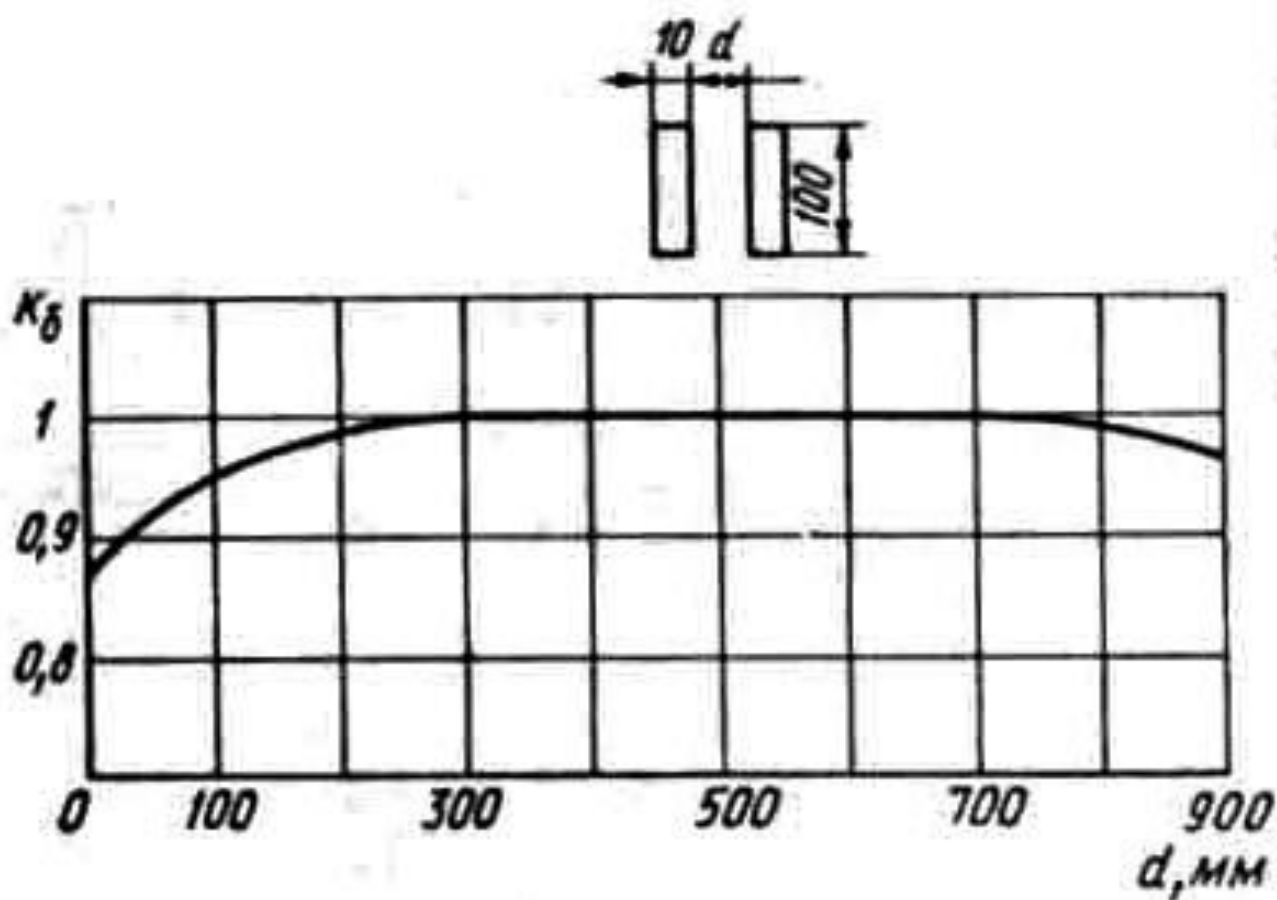
Приложение А1 - Зависимость коэффициента поверхностного эффекта для сплошных круглых немагнитных проводников от параметра  $(f/R_{100})^{1/2}$ , где  $f$  – частота переменного тока, Гц;  $R_{100}$  - активное сопротивление постоянному току проводника длиной  $l=100$  м, Ом



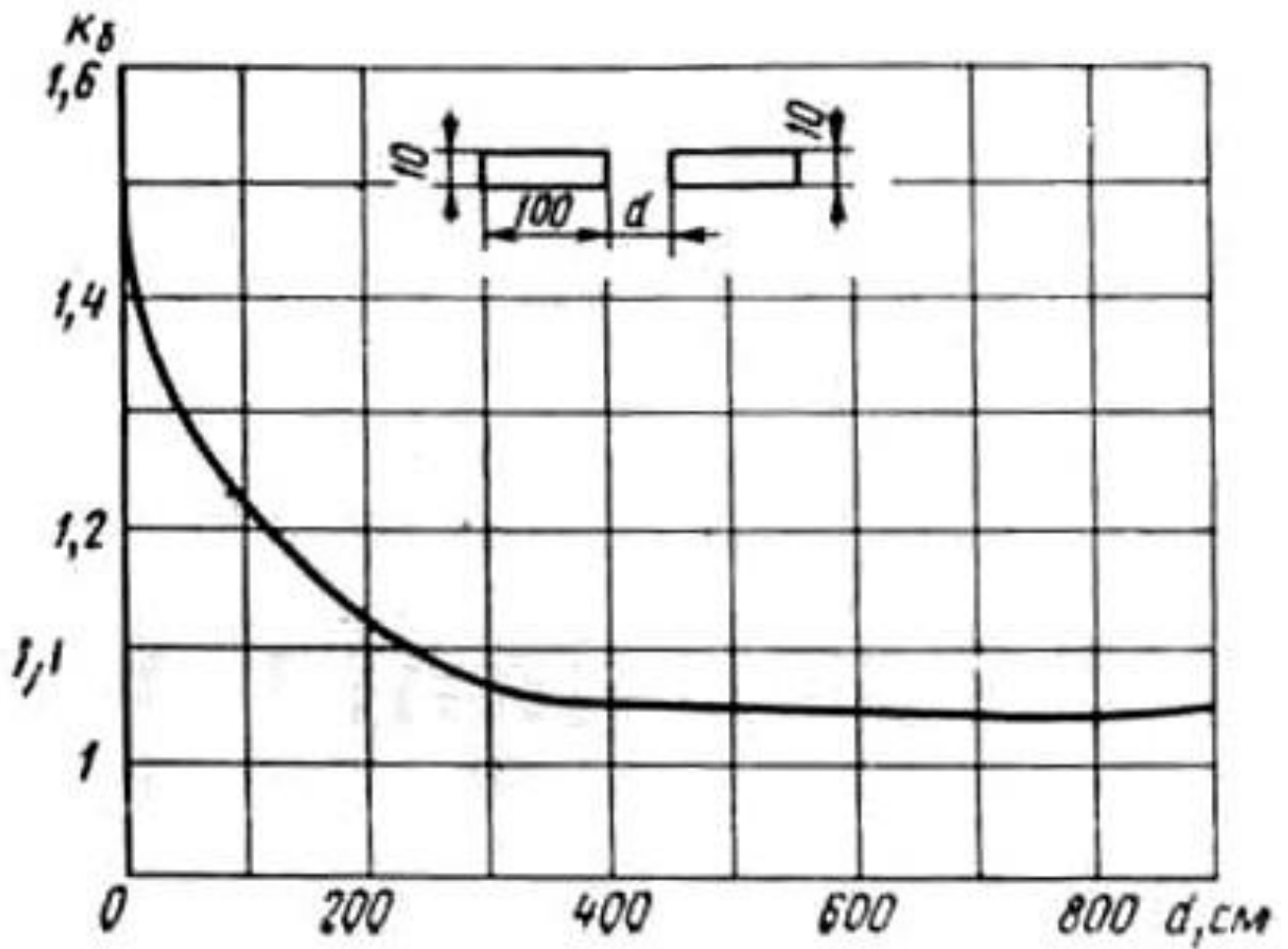
Приложение А2 - Зависимость коэффициента поверхностного эффекта для полых трубчатых проводников из немагнитного материала с различными соотношениями  $\delta/d$  от параметра  $(f/R_{100})^{1/2}$  [1], где  $\delta$  - толщина стенки трубы, м;  $d$  - наружный диаметр трубы, м;  $f$  - частота переменного тока, Гц;  $R_{100}$  - активное сопротивление постоянному току трубчатого проводника длиной  $l = 100$  м, Ом



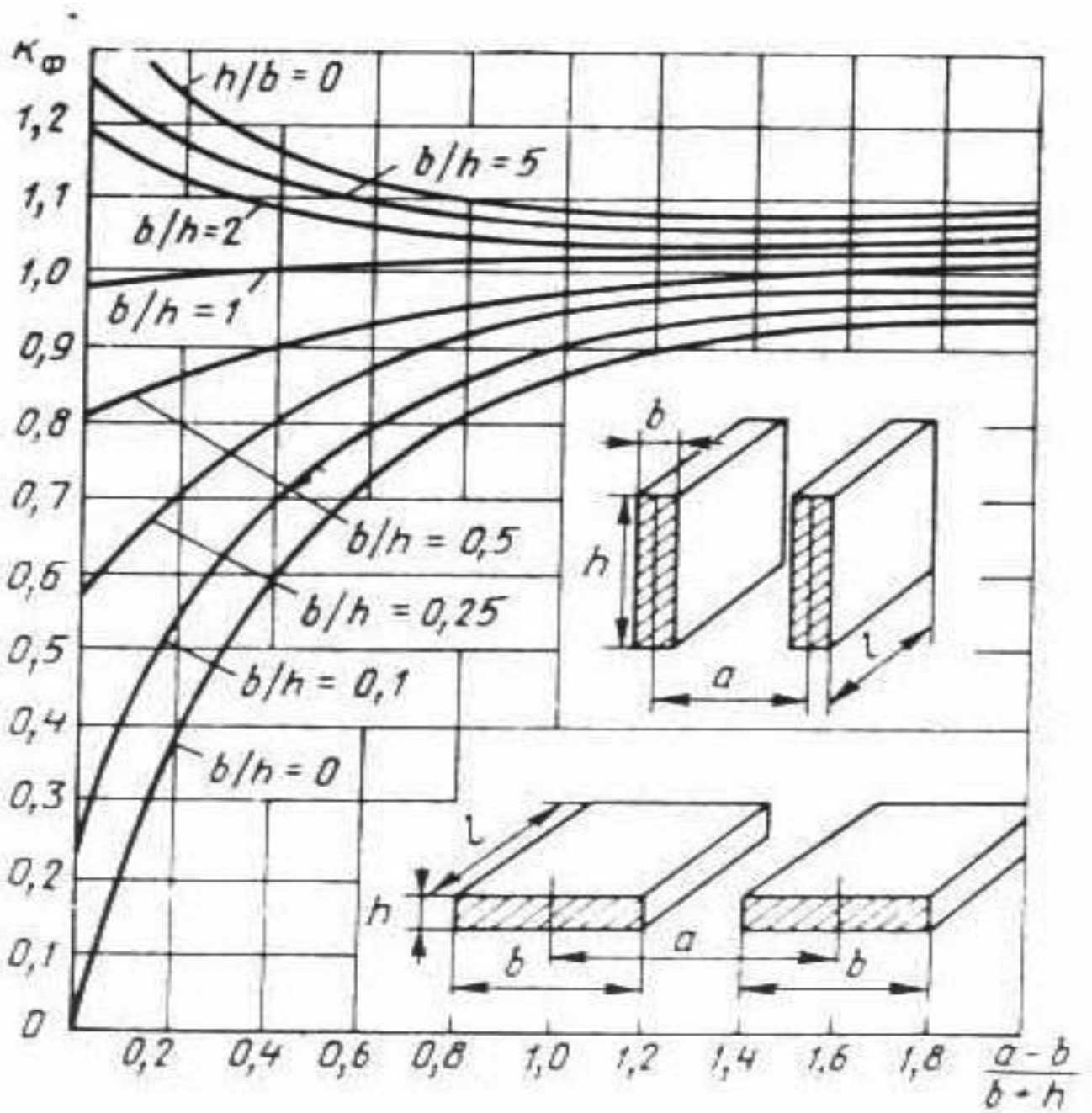
Приложение А3 - Зависимость коэффициента поверхностного эффекта для прямоугольных проводников из немагнитного материала с различным соотношением  $h/\delta$  от параметра  $(f/R_{100})^{1/2}$ , где  $h$ ,  $\delta$  - соответственно высота и толщина поперечного сечения проводника, м;  $f$  - частота переменного тока, Гц;  $R_{100}$  - активное сопротивление постоянному току прямоугольного проводника длиной  $l = 100$  м, Ом



Приложение А4 - Зависимость коэффициента близости от расстояния между параллельными шинами прямоугольного сечения, расположенными в параллельных плоскостях

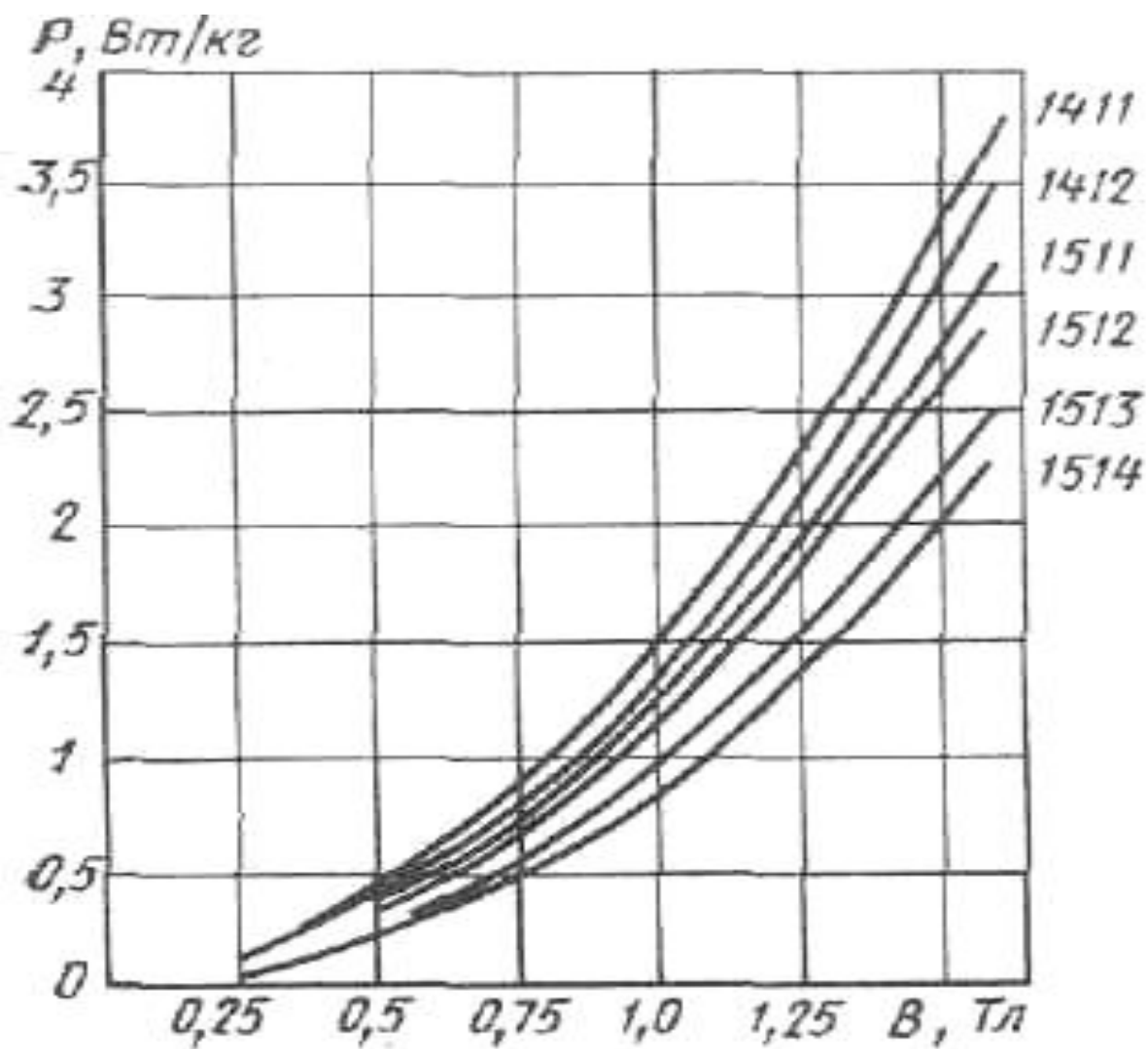


Приложение А 5 - Зависимость коэффициента близости от расстояния между двумя параллельными шинами прямоугольного сечения расположенными в одной плоскости

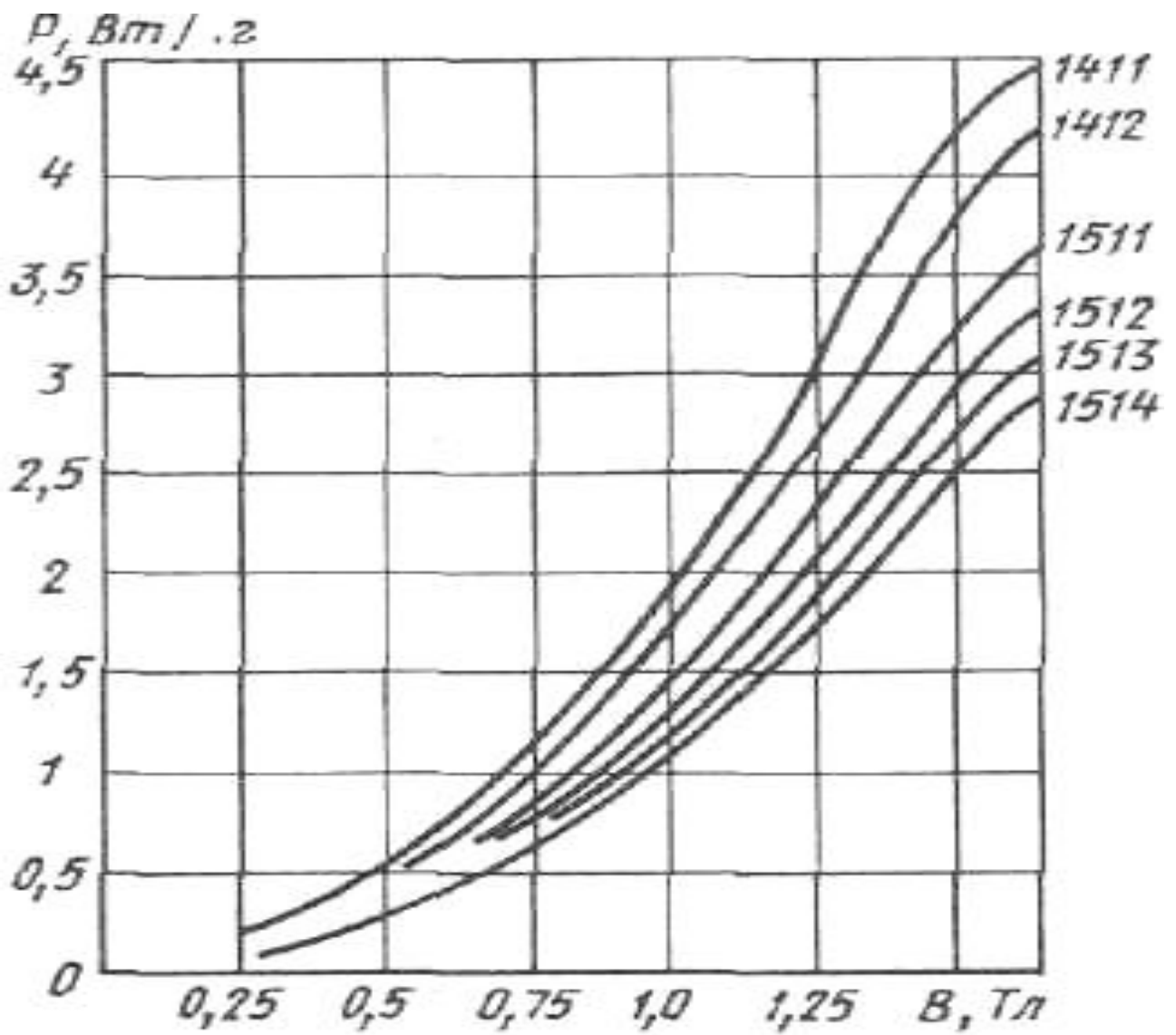


Приложение А6 - Значение коэффициента формы для параллельных шин





Приложение А7 - Зависимость удельных потерь от магнитной индукции для горячекатаных трансформаторных сталей толщиной  $\delta = 0,35$  мм  $f = 50$  Гц)



Приложение А8 - Зависимость удельных потерь от магнитной индукции для горячекатаной трансформаторной стали толщиной  $\delta = 0,5$  мм ( $f = 50$  Гц)

## Приложение В

### Приложение В1 - Международная система единиц (СИ)

Величина	Наименование	Обозначение
<i>Основные единицы</i>		
Длина	метр	м
Масса	килограмм	кг
Время	секунда	с
Сила электрического тока	ампер	А
Термодинамическая температура	кельвин	К
Количество вещества	моль	моль
Сила света	кандела	кд
<i>Некоторые производные единицы</i>		
Сила	ньютон	Н (кг · м/с <sup>2</sup> )
Давление	паскаль	Па
Ускорение линейное	метр на секунду в квадрате	м/с <sup>2</sup>
Динамическая вязкость	ньютон-секунда на квадратный метр	Н · с/м <sup>2</sup>
Кинематическая вязкость	квадратный метр на секунду	м/с <sup>2</sup>
Работа, энергия, количество теплоты	джоуль	Дж
Мощность, тепловой поток	ватт	Вт
Удельная теплоемкость	джоуль на килограмм-кельвин	Дж/(кг · К)
Плотность теплового потока поверхностная	ватт на квадратный метр	Вт/м <sup>2</sup>
Теплопроводность	ватт на метр-кельвин	Вт/(м · К)
Коэффициент теплоотдачи, теплопередачи	ватт на квадратный метр- кельвин	Вт/(м <sup>2</sup> · К)
Тепловое сопротивление	градус на ватт	К/Вт
Коэффициент температуропроводности	квадратный метр на секунду	м <sup>2</sup> /с
Частота	герц	Гц (1/с)
Магнитный поток	вебер	Вб
Магнитная индукция	тесла	Тл

Приложение В2 - Соотношения между единицами физических величин

Сила	1 кгс=9,81 Н, 1 дин= $10^{-5}$ Н
Плотность	1 кгс · с <sup>2</sup> /м <sup>4</sup> =9,81 кг/м <sup>3</sup>
Коэффициент динамической вязкости	1 кгс · с/м <sup>2</sup> =9,81 Н · с/м <sup>2</sup>
Энергия	1 эрг= $10^{-7}$ Дж, 1 кгс·м=9,81 Дж 1 ккал= 4187 Дж
Тепловой поток	1 ккал/ч=1,163 Вт
Динамическая вязкость	1 пз= $10^{-1}$ Н · с/м <sup>2</sup>
Давление	1 бар= $10^5$ Н/м <sup>2</sup> 1 мм. рт. ст.=133,332 Н/м <sup>2</sup> 1 ат=9,81 · 10 <sup>4</sup> Н/м <sup>2</sup> =9,81 · 10 <sup>4</sup> Па
Объем	1 л= $10^{-3}$ м <sup>3</sup>

Приложение В3 - Физические постоянные проводниковых и реостатных материалов, применяемых в электрических аппаратах

Материал	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Удельное сопротивление при 0° С, 10 <sup>-8</sup> Ом · м	Температурный коэффициент сопротивления, 10 <sup>-3</sup> К <sup>-1</sup>	Теплопроводность при 0° С, Вт/(м · К)	Температурный коэффициент теплопроводности, 10 <sup>-4</sup> К <sup>-1</sup>	Теплоемкость, (Дж/(кг × К))	Температурный коэффициент теплоемкости, 10 <sup>-4</sup> К <sup>-1</sup>	Температура плавления, °С	Температура испарения °С	Модуль упругости, 10 <sup>10</sup> Н/м <sup>2</sup>
Алюминий твродотянутый	2700	2,62	4,2	210	4,5	950	4,7	660	1800	7,06
Бронза оловянистая твродотянутая	8700	14...16	0,6...0,7	64	17...20	360	---	900...950	---	10,8...11,8
Бронза берилливая литая	8220	7,2...9	---	84,0	---	140	---	---	---	---
Бронза берилливая твродотянутая	---	5,3	---	170	---	---	---	---	---	10,3
Вольфрам	19300	5,1	4,2	170	3	140	0,3	3410	5900	34,3
Графит	1700... 1800	700... 1400	---1,3	160	---5...---10	650...850	35	---	3650	0,3...0,9
Дюралюмин	2750	3,3	2,2	160	---	930	---	650	---	7,0
Железо	7900	9...10	6,5	79,5	---3,9	640	0,5	1530	2450	19,6...21, 6
Кадмий	8640	7,0	4,3	92	---1,2	230	---	321	770	4,9...6,7
Константан	8700... 8900	45...52	0,003...0,005	---	---	---	---	1270	---	---
Латунь Л68 твродотянутая	8500	7,0	1,5	100	---	380	1,1	900	---	10,8

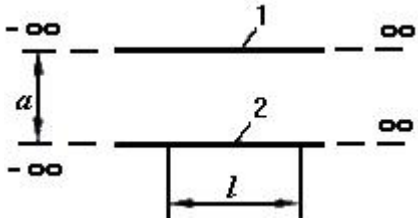
Продолжение приложения В3

Материал	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Удельное сопротивление при 0° С, 10 <sup>-8</sup> Ом · м	Температурный коэффициент сопротивления, 10 <sup>-3</sup> К <sup>-1</sup>	Теплопроводность при 0° С, Вт/(м · К)	Температурный коэффициент теплопроводности, 10 <sup>-4</sup> К <sup>-1</sup>	Теплоемкость, (Дж/(кг × К))	Температурный коэффициент теплоемкости, 10 <sup>-4</sup> К <sup>-1</sup>	Температура плавления, °С	Температура испарения °С	Модуль упругости, 10 <sup>10</sup> Н/м <sup>2</sup>
Латунь Л62 твердотяннутая	---	7,2	---	---	---	---	---	900	---	9,8
Латунь Л59 отожженная	8900	7,2	---	---	---	---	---	900	---	19,9...9,8
Манганин (250...300)	8100...8400	42...50	0,03...0,06	---	---	---	---	950	---	---
Медь твердотяннутая	8700...8900	1,62	4,3	390	---	390	1,0	1083	2600	10,8...8,12
Молибден	10200	4,5...5,0	4,3	146	---3,0	272	---	2620	3560	34,3
Никель	8800	7,2	6,1	70	---0,5	460	4,3	1455	2730	20,6
Нихром (Х20Н80) (1000...1100)*	8200	100...112	0,14	---	---	---	---	1390	---	---
Олово	7300	11,0	4,5	64	---4,7	230	1,3	232	2270	3,9...5,9
Свинец	11300	19,5	4,1	35	---5	130	0,9	327,4	1540	1,57
Серебро твердотяннутое	10500	1,5	4,0	420	---0,5	234	0,77	960	1955	7,4
Сталь	7800	10...13	9,0	40	---4	470	7,3	1300...1400	---	20,6...21,6

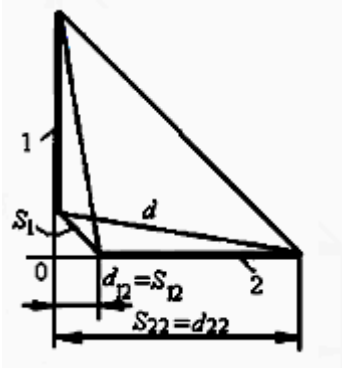
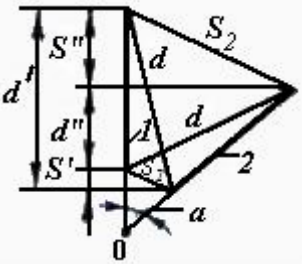
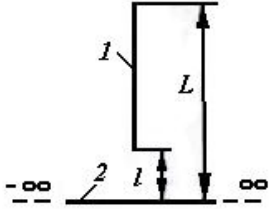
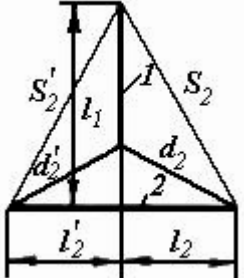
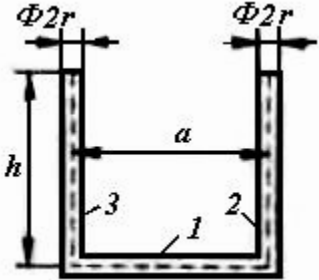
Приложение В4 - Напряжения и температуры размягчения и плавления металлов

Металл	Температура		Напряжение	
	рекристаллизации $\vartheta_p, ^\circ\text{C}$	плавления $\vartheta_{пл}, ^\circ\text{C}$	рекристаллизации $U_p, \text{В}$	плавления $U_{пл}, \text{В}$
Алюминий	150	658	0,1	0,3
Вольфрам	1000	3400	0,4	1,1
Железо	500	1530	0,21	0,6
Золото	100	1063	0,08	0,43
Кадмий		821		0,15
Медь	190	1083	0,12	0,43
Молибден	900	2800	0,3	0,9
Никель	520	1255	0,22	0,65
Платина	540	1773	0,25	0,7
Серебро	150	960	0,09	0,37
Цинк	170	419	0,1	0,17

Приложение В5 – Коэффициент контуров электродинамических усилий (ЭДУ)

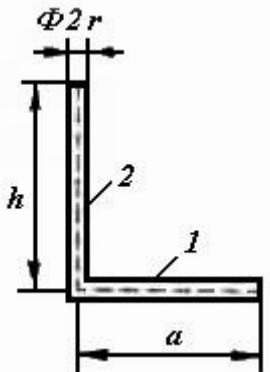
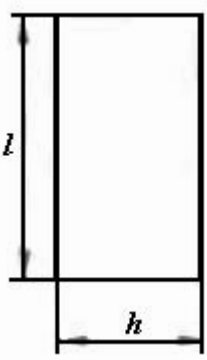
№	Эскиз расположения проводников	Коэффициент контура ЭДУ	Примечание
1		$k_{1/2} = \frac{2l}{a}$	Проводники параллельные бесконечно длинные
2		$k_{1/2} = \frac{(d_1 + d_2) - (s_1 + s_2)}{a}$	Проводники параллельные конечной длины (любое расположение)

Продолжение приложения В5

3		$k_{1/2} = \ln \frac{(d_1 + d_{12})(d_2 + d_{22})}{(s_1 + s_{12})(s_2 + s_{22})}$	<p>Проводники конечной длины, расположенные под углом (угол прямой) друг к другу</p>
4		$k_{1/2} = \frac{1 + \cos \alpha}{\sin \alpha} \times \ln \frac{(d \pm d')(d \mp d'')}{(s_1 + s')(s_2 + s'')}$	<p>Проводники конечной длины, расположенные в одной плоскости под углом <math>\alpha</math>. Верхние знаки для <math>\alpha &lt; 90^\circ</math>, нижние – для <math>\alpha &gt; 90^\circ</math></p>
5		$k_{1/2} = 2 \ln \frac{L}{l}$	<p>Проводники расположены в одной плоскости под прямым углом. Проводник 2 бесконечной длины</p>
6		$k_{1/2} = \ln \left( \frac{l_1}{l_2} \right)^2 \times \frac{(d_2 + l_2)(d_2' + l_2')}{(s_2 + l_2)(s_2' + l_2')}$	<p>Проводники конечной длины, расположенные в одной плоскости под прямым углом</p>
7		$k_1 = 2 \left( \ln \frac{2b}{1 + \sqrt{1 + c^2}} + 0,25 \right), \text{ где}$ $b = \frac{a}{r}; \quad c = \frac{a}{h}$	<p>Проводники круглые, расположенные в одной плоскости под прямым углом <math>k_1 = k_{1/2} + k_{1/3}</math></p>



Продолжение приложения В5

8		$k_1 = \ln \frac{2b}{1 + \sqrt{1 + c^2}} + 0,25, \text{ где}$ $b = \frac{a}{r}; c = \frac{a}{h}$	<p>Проводники круглые, расположенные в одной плоскости под прямым углом</p>
9		$k_{1/2} = \frac{2l}{h} \times \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{h}{l}\right)^2} - \frac{h}{l} \right]$	<p>Параллельные проводники одинаковой длины</p>

Приложение В6- Предел прочности на смятие различных контактных материалов

Материал контакта	Предел прочности на смятие $\sigma_{см}$ , $10^6$ Н/м <sup>2</sup>
Алюминий отожженный	108
Алюминий твердокатанный	147
Графит	130
Золото	520
Медь мягкая	383
Медь твердая	510
Молибден	1658
Олово	44
Платина	765
Свинец	22,5
Серебро	304
Цинк	422

## Список использованных источников

- 1 Основы теории электрических аппаратов: Учеб. Для вузов по спец. «Электрические аппараты» / И.С. Таев, Б.К. Буль, А.Г. Годжелло и др.; Под ред. И.С. Таева. – М.: Высшая школа, 1987.
- 2 Чунихин А.А. Электрические аппараты. – М.: Энергоатомиздат, 1988.
- 3 Бабиков М.А. Электрические аппараты. – М.: Энергоатомиздат, 1963.
- 4 Родштейн Л.А. Электрические аппараты. – Л.: Энергоатомиздат, 1989.
- 5 Буткевич Г.В., Дегтярь В.Г., Сливинская А.Г. Задачник по электрическим аппаратам: Учеб. Пособие для вузов по специальности «Электрические аппараты». – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1987.
- 6 Таев И.С. Электрические аппараты. – М.: Энергия, 1977.
7. Алиев И.И. Справочник по электротехнике (4-е изд., перераб. и доп.) / Серия «Справочники». – Ростов н/Д: Феникс, 2003.
- 8 Электротехнический справочник. – М.: Энергоиздат, 1981.
- 9 Таев И.С. Электрические аппараты автоматики и управления. – М.: Энергия, 1975.
- 10 Теория электрических аппаратов / Под. Ред. Г.Н. Александрова. – М.: Высшая школа, 1985.
- 11 Алиев, И. И. Электрические аппараты : справочник / И. И. Алиев, М. Б. Абрамов. - Москва : РадиоСофт, 2005 - 255, [1] с. : ил.