

СЕВЕРО-ЗАПАДНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЗАОЧНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ АППАРАТЫ

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

Санкт-Петербург
2009

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение высшего и профессионального образования
«СЕВЕРО-ЗАПАДНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЗАОЧНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра электротехники и электромеханики

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ АППАРАТЫ

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

Энергетический институт

Специальности: 140601.65 – электромеханика

140602.65 – электрические и электронные аппараты

Направление подготовки бакалавра

140600.62 – электротехника, электромеханика и электротехнологии

Санкт-Петербург
Издательство СЗТУ
2009

Утверждено редакционно-издательским советом университета
УДК 621.312

Электрические и электронные аппараты: учебно-методический комплекс / сост.: В. Л. Беляев, Ю. В. Куклев.- СПб.: Изд-во СЗТУ, 2009 – 140 с.

Учебно-методический комплекс (УМК) разработан в соответствии с требованиями государственных образовательных стандартов высшего профессионального образования.

Дисциплина посвящена изучению электрических и электронных аппаратов и процессов, происходящих в них. Большое внимание уделено характеристикам и требованиям, предъявляемым к аппаратам. Материалы данной работы составлены с учетом специфики очного, очно-заочного и заочного обучения.

Рассмотрено на заседании кафедры электротехники и электромеханики 15 декабря 2008 года, одобрено методическим советом энергетического института 17 декабря 2008 г.

Рецензенты: кафедра электротехники и электромеханики СЗТУ (А. Л. Виноградов, канд. техн. наук, доц.); Е. А. Родченко, канд. техн. наук, кафедра электроснабжения СЗТУ

Составители: В. Л. Беляев, д-р техн. наук, проф.;
Ю. В. Куклев, канд. техн. наук, доц.

© Северо-Западный государственный заочный технический университет, 2009
© Беляев В. Л., Куклев Ю. В., 2009

1. Информация о дисциплине

1.1. Предисловие

Дисциплина «Электрические и электронные аппараты» изучается студентами специальностей 140601.65 и 140602.65 всех форм обучения в одном семестре. УМК дисциплины включает в себя разделы: рабочую программу, тематический план дисциплины для всех форм обучения, структурно-логическую схему дисциплины, временной график изучения дисциплины, балльно-рейтинговую систему оценки знаний, практический и лабораторный блоки, информационные ресурсы дисциплины, блок контроля освоения дисциплины.

Цель изучения дисциплины – дать студентам знания по теоретическим основам электрических и электронных аппаратов, их устройству, областям применения, характеристикам и параметрам, условиям эксплуатации.

Задачи изучения дисциплины – рассмотрение вопросов теории, расчетов, конструкции, выбора и эксплуатации электрических аппаратов, а именно:

- ознакомление с различными типами электрических аппаратов и их рабочими узлами;
- получение знаний правильного выбора электрических аппаратов для данной рабочей системы (силовой цепи);
- приобретение знаний по испытанию и эксплуатации электрических аппаратов.

Для изучения дисциплины необходимы знания по физике, математике, теоретическим основам электротехники, теоретической механике, метрологии, стандартизации и сертификации и другим ранее освоенным дисциплинам.

Приобретенные знания по данной дисциплине будут использованы студентами при решении вопросов защиты в аварийных режимах крупных электрических машин и электрических систем.

1.2. Содержание дисциплины и виды учебной работы

1.2.1. Содержание дисциплины по ГОС

Электрические и электронные аппараты: электрический аппарат как средство управления режимами работы, защиты и регулирования параметров системы; электромеханические аппараты автоматики, управления, распределительных устройств и релейной защиты; физические явления в электрических аппаратах; электрические контакты, термическая и электродинамическая стойкость электрических аппаратов; электронные и микропроцессорные аппараты; физические явления в электронных аппаратах; гибридные электрические аппараты; выбор, применение и эксплуатация электрических аппаратов.

1.2.2. Объем дисциплины и виды учебной работы

Вид учебной работы	Всего часов		
	Форма обучения		
	Очная	Очно-заочная	Заочная
Общая трудоемкость дисциплины (ОТД)	170		
Работа под руководством преподавателя (включая ДОТ)	102	102	102
В том числе аудиторные занятия:			
лекции	48	20	12
практические занятия (ПЗ)	24	10	–
лабораторные работы (ЛР)	12	12	8
Самостоятельная работа студента (СР)	68	68	68
Промежуточный контроль, количество	1	2	2
В том числе: курсовой проект (работа)	–	–	–
контрольная работа	–	1	1
Вид итогового контроля (зачет, экзамен)	зачет, экзамен	зачет, экзамен	зачет, экзамен

Перечень видов практических занятий и контроля:

- одна контрольная работа (для очно-заочной и заочной форм обучения);
- практические занятия;
- зачет (очная и очно-заочная и заочная формы обучения) по лабораторным работам;
- экзамен (очная, очно-заочная и заочная формы обучения).

2. Рабочие учебные материалы

2.1. Рабочая программа (объем 170 часов)

ВВЕДЕНИЕ (4 часа)
[2], с. 4; [3], с. 3...7

Предмет и содержание дисциплины. Краткие сведения об истории развития электроаппаратостроения в России и за рубежом. Роль русских ученых в развитии электроаппаратостроения. Значение электрических аппаратов для распределения электроэнергии, для защиты электроцепей при аварийных ситуациях, для управления современным электроприводом и автоматизированными промышленными объектами.

РАЗДЕЛ 1. КЛАССИФИКАЦИЯ. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ (4 часа)
[1], с. 5...11; [2], с. 5...7; [3], с. 5...14

Классификация электрических аппаратов по назначению, области применения, принципу действия, конструктивным особенностям. Требования к электрическим аппаратам.

Параметры и характеристики электрических аппаратов, определяющие их выбор и применение. Номинальные параметры и режимы работы. Параметры, характеризующие надежность работы аппаратов. Коммутационная и механическая износостойкость. Коммутационная способность. Стойкость аппарата к сквозным токам перегрузки и короткого замыкания. Электрическая прочность изоляции электрических аппаратов. Допустимые температуры нагрева контактных, токоведущих и изоляционных частей. Параметры, характеризующие работу аппарата во времени (быстродействие).

РАЗДЕЛ 2. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ СИЛЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТАХ (12 часов)

[1], с. 31...58; [2], с. 8...23

Основные понятия и общие закономерности, позволяющие определять электродинамические силы. Методы расчета электродинамических сил. Определение направления действия этих сил.

Токоведущий контур силового электрического аппарата как совокупность проводников различной формы и расположения. Электродинамические силы взаимодействия между параллельными проводниками круглого сечения, между параллельными шинами прямоугольного сечения, между взаимно-перпендикулярными проводами. Силы, действующие на перемычку П-образного и Z -образного контуров. Силы, действующие на кольцевой виток. Силы, возникающие в месте изменения сечения проводника. Силы взаимодействия между проводником тока и ферромагнитными массами.

Электродинамические силы при переменном токе. Механический резонанс. Электродинамическая стойкость электрического аппарата.

РАЗДЕЛ 3. НАГРЕВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ (12 часов)

[1], с. 58...86; [2], с. 24...38; [3], с. 23...35

Активные потери энергии в токоведущих, ферромагнитных и изоляционных частях электрических аппаратов. Отдача теплоты от нагретых частей аппарата путем теплопроводности, конвекции и теплового излучения.

Теплоотдача в установившемся режиме работы аппарата. Изменение температуры частей аппаратов во времени в процессе нагрева и охлаждения (включение, отключение, кратковременный и повторно-кратковременный режимы работы). Нагрев аппаратов при коротком замыкании. Допустимые температуры нагрева для различных частей аппаратов.

Термическая стойкость электрического аппарата, величины, её определяющие. Понятие о выборе электрического аппарата, исходя из требуемой термической стойкости.

РАЗДЕЛ 4. КОНТАКТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ (10 часов)

[1], с. 68...123; [2], с. 43...67; [3], с. 36...44; 126...133

Основные понятия и термины, относящиеся к контактным соединениям. Параметры и характеристики контактных соединений. Виды контактных соединений.

Физические процессы, определяющие переходное сопротивление контакта. Зависимости переходного сопротивления от контактного нажатия, твердости контактного материала, его удельного сопротивления, величины контактной поверхности и температуры.

Коммутационный и механический износ контактов. Причины, влияющие на износ контактов при включении и отключении тока. Дребезг (вибрация) контактов и способы борьбы с ним.

Электродинамические силы, вызывающие отброс контактов, и методы их компенсации. Материалы для электрических контактов. Основные конструкции контактных систем аппаратов.

РАЗДЕЛ 5. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ДУГА (10 часов)

[1], с. 123...173; [2], с. 66...108; [3], с. 14...23; 83...126

Виды электрического разряда в газах, их особенности и характеристики. Электрический дуговой разряд, возникающий при размыкании контактов электрического аппарата. Основные свойства дугового разряда (электрические и термогазодинамические). Вольт-амперные характеристики дуги постоянного и переменного токов.

Условия горения и гашения электрической дуги постоянного и переменного токов. Энергия, выделяющаяся в дуге постоянного и переменного токов. Способы гашения электрической дуги в дугогасительных устройствах электрических аппаратов. Процессы, происходящие в дуге при гашении её различными способами.

РАЗДЕЛ 6. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ МЕХАНИЗМЫ (10 часов)

[1], с. 183...239; [2], с. 109...142; [3], с. 133...139; [5], с. 34...67

Основные понятия. Классификация электромагнитных механизмов электрических аппаратов. Магнитные цепи электрических аппаратов постоянного и переменного токов. Последовательность расчета магнитных цепей постоянного и переменного токов.

Электромагниты. Сила тяги электромагнитов постоянного и переменного токов. Согласование тяговых характеристик электромагнитов и механических характеристик аппаратов. Вибрация якоря электромагнита переменного тока и пути её устранения. Процессы срабатывания и отпускания электромагнитов. Способы ускорения и замедления этих процессов.

Обмотки электромагнитов. Виды обмоток. Порядок расчета обмоток электромагнитов.

РАЗДЕЛ 7. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ УПРАВЛЕНИЯ (18 часов)

[1], с. 262...337; [2], с. 213...247; [3], с. 75...181

Электрические аппараты управления являются одними из широко применяемых и многочисленных видов аппаратов. Классификация аппаратов управления, их основные группы.

Командоаппараты. Основные понятия и определения. Назначение, устройство и применение кнопок, кнопочных постов, универсальных переключателей, командоконтроллеров, путевых и конечных выключателей. Выбор командоаппаратов, исходя из параметров и числа коммутируемых цепей.

Контроллеры. Основные понятия и определения. Назначение, конструктивные исполнения и области применения. Схемы пуска и регулирования частоты вращения двигателей с помощью командоконтроллера. Выбор командоконтроллера, исходя из параметров управляемого двигателя и частоты включений.

Реостаты. Основные понятия и определения. Классификация реостатов и требования к ним. Конструктивные исполнения реостатов и их резисторов. Схемы включения пусковых и пускорегулирующих реостатов. Выбор резисторов, исходя из допустимых бросков пускового тока, и температура резистора. Выбор реостатов, исходя из мощности, напряжения питания, условий пуска и характера изменения нагрузки при пуске двигателя.

Контакторы и пускатели. Основные понятия и определения. Назначение, принцип действия и категории применения контакторов постоянного и переменного токов. Требования, предъявляемые к контакторам.

Основные параметры и режимы работы контакторов. Особенности конструкций контакторов постоянного и переменного токов. Магнитные пускатели. Назначение и устройство пускателей. Требования к пускателям, условия их работы. Схемы включения пускателей. Выбор контакторов и пускателей в соответствии с характером нагрузки, режимом коммутации, условиями эксплуатации и требуемым сроком службы.

РАЗДЕЛ 8. РЕЛЕ (20 часов)

[1], с. 337...403; [2], с. 248...261; [3], с. 57...74; [4], с. 150...170

Основные понятия и определения. Классификация реле. Общие для реле всех видов параметры и характеристики. Требования, предъявляемые к реле.

Электромагнитные реле тока и напряжения, их устройство, принцип действия. Коэффициент возврата и способы увеличения его. Схемы включения реле тока для защиты электродвигателей и энергосистем. Выбор реле тока в соответствии с данными защищаемого объекта, схемой включения и коммутируемыми цепями управления. Схемы включения реле напряжения для защиты двигателя при недопустимом снижении (или исчезновении)

напряжения. Выбор реле напряжения в соответствии с данными защищаемого объекта и коммутируемой цепи управления.

Электромагнитное реле времени. Принцип действия, устройство, способы регулирования выдержки времени при втягивании и отпуске якоря реле. Применение для схем пуска двигателей в функции времени, для схем автоматизации технологических процессов и т. п. Выбор реле времени в соответствии с требуемыми временными интервалами и параметрами коммутируемой цепи.

Поляризованные реле. Устройство, принцип действия, основные параметры и характеристики. Применение в схемах автоматики.

Тепловые реле. Принцип действия, устройство, время-токовая характеристика. Применение для защиты энергетического оборудования от токовых перегрузок, в составе магнитных пускателей и т. п. Согласование время-токовых характеристик реле и защищаемого объекта. Выбор тепловых реле в соответствии с параметрами защищаемого объекта.

Герконовые реле. Принцип действия. Способы управления. Герконовое реле с обмоткой, основные расчетные соотношения, время срабатывания, электромагнитная сила, противодействующее усилие. Управление герконом с помощью постоянного магнита и ферромагнитного экрана. Герконовые реле с памятью (ферриды). Конструкции герконовых реле. Герконы с большой коммутационной способностью (силовые герконы). Преимущества и недостатки герконовых реле. Области применения. Выбор герконовых реле в соответствии с требуемой коммутационной способностью и допустимой МДС срабатывания.

Позисторы. Принцип действия, характеристики, области применения. Установка позисторов для защиты электродвигателей. Аппараты позисторной защиты. Схемы подключения к двигателю. Выбор позистора в зависимости от класса изоляции (допустимой температуры нагрева) обмотки двигателя.

РАЗДЕЛ 9. АВТОМАТИЧЕСКИЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ И ПРЕДОХРАНИТЕЛИ (20 часов)

[1], с. 504...552; [2], с. 186...212; [3], с. 168...242

Аварийные режимы работы электроустановок. Основные термины и определения. Параметры, характеризующие аварийные режимы. Защита электроустановок от аварийных режимов работы.

Автоматические выключатели. Назначение, основные понятия, принцип действия. Требования, предъявляемые к автоматическим выключателям.

Основные элементы конструкции автоматических выключателей, их функциональное назначение.

Автоматические выключатели общепромышленного применения (универсальные и установочные). Особенности конструкции, основные параметры и характеристики. Область применения.

Быстродействующие автоматические выключатели. Способы повышения быстродействия выключателей. Особенности конструкции. Основные параметры и характеристики. Область применения.

Выключатели с выдержкой времени (селективные). Понятие и схема селективной защиты электроустановок. Устройство селективного механизма, его работа.

Выключатели гашения магнитного поля. Область применения, принцип действия, особенности конструкции. Основные параметры и характеристики.

Выбор автоматических выключателей в соответствии с номинальными параметрами защищаемого электрооборудования, с допустимыми (по величине и времени) токами перегрузки, с предельно возможными токами короткого замыкания. Особенности выбора быстродействующих выключателей и выключателей гашения магнитного поля.

Плавкие предохранители. Назначение и требования, предъявляемые к предохранителям. Основные параметры и характеристики. Время-токовая (защитная) характеристика предохранителя и её согласование с характеристикой защищаемого объекта. Работа предохранителя при длительной нагрузке и при коротком замыкании. Конструкции современных предохранителей. Быстродействующие предохранители, эффект токоограничения. Защита мощных полупроводниковых приборов быстродействующими предохранителями.

Выбор предохранителей для защиты электродвигателей из условий длительной эксплуатации и по пусковому току. Выбор предохранителей по условию селективности отключения поврежденных участков электроцепи. Особенности выбора быстродействующих предохранителей для защиты мощных полупроводниковых приборов.

РАЗДЕЛ 10. ЭЛЕКТРОННЫЕ БЕСКОНТАКТНЫЕ АППАРАТЫ

(20 часов)

[1], с. 245...279; 331...334; 403...466; [2], с. 267...295; [3], с. 164...173

Общие сведения. Основные понятия и определения. Магнитные усилители. Принцип действия дроссельного усилителя и усилителя с

самонасыщением, основные параметры и характеристики, обратные связи и цепи смещения. Факторы, влияющие на работу магнитных усилителей. Быстродействующие и реверсивные магнитные усилители.

Бесконтактные реле на базе магнитных усилителей. Основные параметры и характеристики. Способы получения релейного режима работы магнитного усилителя. Достоинства и недостатки. Расчет и выбор параметров бесконтактных реле.

Полупроводниковые электрические аппараты управления. Релейный режим работы полупроводникового усилителя. Полупроводниковые реле тока, напряжения и времени. Бесконтактные коммутирующие устройства на основе тиристоров (тиристорные пускатели и станции управления), преимущества и недостатки по сравнению с контактными, область применения. Особенности выбора тиристорных пускателей.

Применение микропроцессоров в схемах автоматического управления. Согласование органов управления коммутационных аппаратов с системами микропроцессорного управления.

РАЗДЕЛ 11. ГИБРИДНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ (12 часов)

[1], с. 173...177; [2], с. 105...106; [3], с. 160...164

Понятие о гибридном аппарате. Гибридный аппарат как совокупность положительных свойств контактных и бесконтактных аппаратов.

Гибридные контакторы, принцип работы, силовые схемы контакторов и схемы управления тиристорами. Защита гибридных контакторов от токов короткого замыкания. Особенности выбора гибридных контакторов.

Гибридные быстродействующие выключатели. Принцип работы, требования к ним, основные конструктивные узлы, силовые схемы и схемы управления. Способы ускорения перевода тока из контактов в тиристоры. Особенности выбора и эксплуатации гибридных выключателей.

Методы ограничения коммутационных перенапряжений в гибридных аппаратах с принудительной коммутацией тиристоров.

РАЗДЕЛ 12. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ (16 часов)

[1], с. 552...691; [2], с. 149...162; 262...266

Понятие о комплексном распределительном устройстве. Коммутационные и защитные аппараты, входящие в состав этого устройства в зависимости от его назначения.

Высоковольтные выключатели: назначение, классы напряжения, общие требования. Устройство, краткая характеристика, основные параметры и применение воздушных, элегазовых, масляных, электромагнитных и вакуумных выключателей. Выбор вида и параметров выключателя в соответствии с условиями эксплуатации и возможными аварийными режимами работы.

Разъединители, отделители, короткозамыкатели: назначение, требования, основные параметры, устройство. Выбор по требуемому уровню термической стойкости при сквозных токах КЗ и требуемому классу напряжения.

Высоковольтные предохранители: устройство, основные параметры, время-токовые характеристики. Выбор предохранителей в соответствии с номинальными и возможными аварийными (перегрузкой, коротким замыканием) режимами работы защищаемой электроустановки.

Разрядники и ограничители перенапряжений. Назначение, принцип действия, требования, устройство, основные параметры и характеристики. Выбор в соответствии с вольт-секундной характеристикой защищаемого объекта.

Реакторы. Назначение, конструкции, основные параметры, принцип действия. Выбор реакторов по номинальным параметрам, по термической и электродинамической стойкости при ожидаемых токах короткого замыкания.

Трансформаторы тока и напряжения. Назначение, виды, требования, устройство, режимы работы. Выбор в соответствии с номинальными параметрами установки (током, напряжением) и токами короткого замыкания (электродинамической и термической стойкостью).

Заключение (2 часа)

Рассмотрены вопросы, которые являются общими для низковольтных и высоковольтных аппаратов как постоянного, так и переменного токов. Затрагиваются задачи, стоящие перед аппаратостроением, т. е. повышение отключающей способности аппаратов, повышение частоты отключения, возможность перехода на бесконтактные системы регулирования и управления и т. д. Указываются варианты выбора электрических аппаратов для конкретного режима работы электрической цепи. Это все создает условия адаптации специалистов производства современного аппаратостроения.

2.2. Тематический план дисциплины для студентов очной формы обучения

№ п/п	Наименование раздела (отдельной темы)	Кол-во часов по дневной форме обучения	Виды занятий и контроля											
			Лекции		ПЗ (С)		ЛР		Самостоятельная работа	Тесты	Контрольные работы	ПЗ (С)	ЛР	Курсовые работы
			аудит.	ДОТ	аудит.	ДОТ	аудит.	ДОТ						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	ВСЕГО	170	48	6	24	12	12		68					
	Введение	4							4					
1	Раздел 1. Классификация. Основные параметры и характеристики электрических аппаратов	4	2						2					
2	Раздел 2. Электродинамические силы в электрических аппаратах	12	2		6		4			№ 1		№ 2.1, 2.2	№ 2	
3	Раздел 3. Нагрев электрических аппаратов	12	4		6				2	№ 2		№ 3.1, 3.2		
4	Раздел 4. Контакты электрических аппаратов	10	2				4		4	№ 3			№ 1	
5	Раздел 5. Электрическая дуга	10	4		4				2	№ 4		№ 5.1, 5.2		
6	Раздел 6. Электромагнитные механизмы	10	2	2	4				2	№ 5		№ 6.1, 6.2		
7	Раздел 7. Электрические аппараты управления	18	2		4		4		8	№ 6		№ 7.1, 7.2	№ 3	
8	Раздел 8. Реле	20	4	4					12					
9	Раздел 9. Автоматические выключатели и предохранители	20	4			6			10					
10	Раздел 10. Электронные бесконтактные аппараты	20	6			4			10					
11	Раздел 11. Гибридные электрические аппараты	12	6			2			4					
12	Раздел 12. Электрические аппараты высоковольтных распределительных устройств	16	10						6					
	Заключение	2							2					

Тематический план дисциплины
для студентов очно-заочной формы обучения

№ п/п	Наименование раздела (отдельной темы)	Кол-во часов по дневной форме обучения	Виды занятий и контроля											
			Лекции		ПЗ (С)		ЛР		Самостоятельная работа	Тесты	Контрольные работы	ПЗ (С)	ЛР	Курсовые работы
			аудит.	ДОТ	аудит.	ДОТ	аудит.	ДОТ						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	ВСЕГО	170	20	52	10	6	12		68		1			
	Введение	4							4					
1	Раздел 1. Классификация. Основные параметры и характеристики электрических аппаратов	4		2					2					
2	Раздел 2. Электродинамические силы в электрических аппаратах	12	2		4		4		2	№ 1	Задача 1	№ 2.1, 2.2	№ 2	
3	Раздел 3. Нагрев электрических аппаратов	12	4	2	4				2	№ 2	Задача 3	№ 3.1, 3.2		
4	Раздел 4. Контакты электрических аппаратов	10	2				4		4	№ 3			№ 1	
5	Раздел 5. Электрическая дуга	10	2	4		2			2	№ 4				
6	Раздел 6. Электромагнитные механизмы	10			2	4			4	№ 5		№ 6.1, 6.2		
7	Раздел 7. Электрические аппараты управления	18	2	2		2	4		8	№ 6	Задача 2		№ 3	
8	Раздел 8. Реле	20	2						18		Задача 4			
9	Раздел 9. Автоматические выключатели и предохранители	20	2	12					6		Задача 5			
10	Раздел 10. Электронные бесконтактные аппараты	20	2	12					6					
11	Раздел 11. Гибридные электрические аппараты	12		10					2					
12	Раздел 12. Электрические аппараты высоковольтных распределительных устройств	16	2	8					6					
	Заключение	2							2					

Тематический план дисциплины
для студентов заочной формы обучения

№ п/п	Наименование раздела (отдельной темы)	Кол-во часов по дневной форме обучения	Виды занятий и контроля											
			Лекции		ПЗ (С)		ЛР		Самостоятельная работа	Тесты	Контрольные работы	ПЗ (С)	ЛР	Курсовые работы
			аудит.	ДОТ	аудит.	ДОТ	аудит.	ДОТ						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	ВСЕГО	170	12	82			8		68		1			
	Введение	4							4					
1	Раздел 1. Классификация. Основные параметры и характеристики электрических аппаратов	4		2					2					
2	Раздел 2. Электродинамические силы в электрических аппаратах	12		6			4		2	№ 1	Задача 1		№ 2	
3	Раздел 3. Нагрев электрических аппаратов	12		8					4	№ 2	Задача 3			
4	Раздел 4. Контакты электрических аппаратов	10	2				4		4	№ 3			№ 1	
5	Раздел 5. Электрическая дуга	10		8					2	№ 4				
6	Раздел 6. Электромагнитные механизмы	10		8					2	№ 5				
7	Раздел 7. Электрические аппараты управления	18	2	8					8	№ 6	Задача 2			
8	Раздел 8. Реле	20	2	8					10		Задача 4			
9	Раздел 9. Автоматические выключатели и предохранители	20	2	10					8		Задача 5			
10	Раздел 10. Электронные бесконтактные аппараты	20	2	10					8					
11	Раздел 11. Гибридные электрические аппараты	12		6					6					
12	Раздел 12. Электрические аппараты высоковольтных распределительных устройств	16	2	8					6					
	Заключение	2							2					

2.3. Структурно-логическая схема дисциплины



2.4. Временной график изучения дисциплины при использовании информационно-коммутационных технологий

№	Название раздела (темы)	Продолжительность изучения раздела (темы) (из расчета – 4 часа в день)
1	Раздел 1. Классификация. Основные параметры и характеристики электрических аппаратов	1 дн.
2	Раздел 2. Электродинамические силы в электрических аппаратах	3 дн.
3	Раздел 3. Нагрев электрических аппаратов	4 дн.
4	Раздел 4. Контакты электрических аппаратов	3 дн.
5	Раздел 5. Электрическая дуга	3 дн.
6	Раздел 6. Электромагнитные механизмы	3 дн.
7	Раздел 7. Электрические аппараты управления	4 дн.
8	Раздел 8. Реле	5 дн.
9	Раздел 9. Автоматические выключатели и предохранители	5 дн.
10	Раздел 10. Электронные бесконтактные аппараты	5 дн.
11	Раздел 11. Гибридные электрические аппараты	3 дн.
12	Раздел 12. Электрические аппараты высоковольтных распределительных устройств	4 дн.
	ИТОГО	43 дн.

2.5. Практический блок

2.5.1. Практические занятия (очная форма обучения)

Название раздела (темы)	<i>Наименование тем практических занятий</i>	Кол-во часов	
		АУД	ДОТ
Раздел 2	Тема 1. Электродинамические силы в электрических аппаратах	6	
Раздел 3	Тема 2. Нагрев электрических аппаратов	6	
Раздел 5	Тема 3. Электрическая дуга	4	
Раздел 6	Тема 4. Электромагнитные механизмы	4	
Раздел 7	Тема 5. Электрические аппараты управления	4	
Раздел 9	Тема 6. Автоматические выключатели и предохранители		6
Раздел 10	Тема 7. Электронные бесконтактные аппараты		4
Раздел 11	Тема 8. Гибридные электрические аппараты		2

Практические занятия (очно-заочная форма обучения)

Название раздела (темы)	<i>Наименование тем практических занятий</i>	Кол-во часов	
		АУД	ДОТ
Раздел 2	Тема 1. Электродинамические силы в электрических аппаратах	4	
Раздел 3	Тема 2. Нагрев электрических аппаратов	4	
Раздел 5	Тема 3. Электрическая дуга		2
Раздел 6	Тема 4. Электромагнитные механизмы	2	4
Раздел 7	Тема 5. Электрические аппараты управления		2

2.5.2. Лабораторные работы (очная форма обучения)

Название раздела (темы)	<i>Наименование тем лабораторных занятий</i>	<i>Кол-во часов</i>
Раздел 2	Исследование переходного сопротивления контактов	4
Раздел 4	Исследование электродинамических сил между шинами	4
Раздел 7	Исследование электромагнитного контактора постоянного тока	4

Лабораторные работы (очно-заочная форма обучения)

Название раздела (темы)	<i>Наименование тем лабораторных занятий</i>	<i>Кол-во часов</i>
Раздел 2	Исследование переходного сопротивления контактов	4
Раздел 4	Исследование электродинамических сил между шинами	4
Раздел 7	Исследование электромагнитного контактора постоянного тока	4

Лабораторные работы (заочная форма обучения)

Название раздела (темы)	<i>Наименование тем лабораторных занятий</i>	<i>Кол-во часов</i>
Раздел 2	Исследование переходного сопротивления контактов	4
Раздел 4	Исследование электродинамических сил между шинами	4

2.6. Балльно-рейтинговая система оценки знаний при использовании ДОТ

После изучения всех разделов студент выполняет тестовое задание, в котором содержится 30 вопросов. Каждый правильный ответ оценивается в два балла. При выполнении тестовых заданий студент может набрать максимальное количество баллов – 60.

Выполнение контрольной или творческой работы оценивается в 20 баллов. Выполнение практических работ – 10 баллов, лабораторных работ – 10 баллов для очной и очно-заочной форм обучения и 20 баллов для заочной формы обучения.

Итого каждый студент может получить максимально 100 баллов.

Допуск к зачету осуществляется при наличии 55 баллов.

Оценка результатов тестирования и экзамена производится следующим образом:

- удовлетворительно – 55 – 69 баллов;
- хорошо – 70 – 84 баллов;
- отлично – 85 – 100 баллов.

3. Информационные ресурсы дисциплины

3.1. Библиографический список

Основная:

1. Чунихин, А. А. Электрические аппараты: общий курс: учеб. для вузов / А. А. Чунихин. –М.: Энергоатомиздат, 1988.
2. Основы теории электрических аппаратов: учеб. для вузов / И. С. Таев [и др.]. –М.: Высш. шк., 1987.
3. Родштейн, Л. А. Электрические аппараты: учеб. пособие / Л. А. Родштейн. –Л.: Энергоатомиздат, 1989.
4. Электрические и электронные аппараты: учебник для вузов / под ред. Ю. К. Розанова. –М.: Энергоатомиздат, 1998.
5. Буль, О. Б. Методы расчета магнитных систем в электрических аппаратах. Магнитные цепи, поля и программа FEMM: учеб. пособие для вузов / О. Б. Буль. –М.: Академия, 2005.

Дополнительная:

6. Теория электрических аппаратов / Г. Н. Александров [и др.]. – М.: Высш. школа, 1985.
7. Могилевский, Г. В. Гибридные электрические аппараты низкого напряжения / Г. В. Могилевский. –М.: Энергоатомиздат, 1986.
8. Таев, И. С. Электрические аппараты управления: учеб. для вузов / И. С. Таев. –М.: Высш. школа, 1984.
9. Алиев, И. И. Электрические аппараты: справочник / И. И. Алиев, М. Б. Абрамов. –М.: Радио-Софт, 2004.

3.2. Опорный конспект

ВВЕДЕНИЕ

В дореволюционной России производство электрических аппаратов отсутствовало. Однако русскими учеными Э. Х. Ленцем, В. В. Петровым, В. С. Якоби, М. О. Доливо-Добровольским были разработаны предложения по конструкции аппаратов, и были сделаны теоретические их обоснования. В частности, О. М. Доливо-Добровольский предложил использовать в дугогасительных устройствах аппаратов металлические деионные (дугогасительные) решетки.

После принятия плана ГОЭРЛО по электрификации страны началось бурное развитие отрасли электропромышленности. Возникла большая потребность в развитии собственного электроаппаратостроения.

Автоматизация и механизация производственных процессов, усовершенствование транспорта, сельского хозяйства и других отраслей промышленности существенно расширяют потребность создания новых типов электрических аппаратов. Потребность электрических аппаратов объясняется тем, что они представляют собой средство управления режимами работы, регулирования параметров, контроля и защиты электрических систем и их основных частей.

Электрические аппараты являются конструктивно законченными техническими устройствами, реализующими определенные функции и рассчитанными на разные условия эксплуатации. Кроме того, резкий рост мощности промышленных установок и увеличение в связи с этим величины токов короткого замыкания в сетях напряжения до 1000 В и выше, вынуждает всемерно повышать отключающую способность электрических аппаратов. Это повышение должно сочетаться с уменьшением габаритов и металлоемкости аппаратов. Приходится учитывать и то, что мировые запасы многих контактных и токопроводящих материалов истощаются, и их экономия приобретает большое значения.

В основу опорного конспекта положены материалы, изложенные в источниках [2-5].

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Охарактеризуйте роль русских ученых в создании электрических аппаратов. Назовите имена основоположников русского электроаппаратостроения.

2. Какова роль электрических аппаратов в составе электроустановок различного назначения?

3. Назовите перспективные направления развития электроаппаратостроения.

РАЗДЕЛ 1. КЛАССИФИКАЦИЯ. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Электрический аппарат – это прибор, приспособление, электротехническое устройство, предназначенное для коммутации, управления, регулирования, стабилизации и защиты электрических цепей и машин, а также для контроля и регулирования различных неэлектрических процессов.

Главным требованием к любому виду электрического аппарата является нормальное функционирование в соответствии с конкретным назначением.

Нормальное функционирование – это удовлетворение ТУ и ГОСТу, определяющим функциональную пригодность аппарата.

Обычно, ТУ используются в стадии разработки аппарата на определённые номинальные технические параметры. ГОСТ – при серийном выпуске изделий.

Классификация электрических аппаратов

Электрические аппараты подразделяются по:

- принципу действия;
- назначению;
- напряжению;
- роду тока;
- исполнению.

По принципу действия: контактные и бесконтактные аппараты.

Контактные аппараты имеют подвижные и неподвижные контакты. Управление электрической цепью осуществляется путем замыкания и размыкания контактов.

Недостатки: электрическая эрозия, наличие большого механического привода.

Бесконтактные аппараты не имеют подвижных контактов. Коммутация цепи осуществляется при помощи управляемых полупроводниковых элементов (тиристоров, транзисторов) и управляемых дросселей насыщения.

Недостатки: не разрывают полностью электрическую цепь, не выдерживают перегрузок по току, не терпят перенапряжения, требуют искусственного охлаждения.

Бесконтактные аппараты применяются: в системах с большой частотой работы; в случаях, где требуется большое быстродействие; там, где требуется сочетание процессов преобразования и управления.

По назначению: коммутационные, защитные контролирующие, пускорегулирующие.

Коммутационные аппараты предназначены для замыкания и размыкания электрических цепей (рубильники, переключатели).

Защитные аппараты осуществляют защиту от перегрузок токов короткого замыкания (автоматические выключатели, плавкие предохранители, биметаллические реле и т. д.).

Контролирующие аппараты предназначены для контроля заданных электрических или неэлектрических параметров и преобразования до стандартной величины (реле, датчики, трансформаторы тока и напряжения и т. д.).

Пускорегулирующие аппараты предназначены для пуска, регулирования напряжения и тока электрических аппаратов (командоконтроллеры, контакторы, пускатели, сопротивления и реостаты).

По напряжению: аппараты низкого (АНН) и высокого (АВН) напряжения.

АНН до 1000 В делятся на аппараты управления и аппараты автоматики.

АВН – свыше 1000 В.

По роду тока: аппараты постоянного и переменного токов.

По исполнению согласно ГОСТу делятся: для общего применения в умеренном климате; тропического исполнения для влажного климата; тропического исполнения для сухого пустынного климата; для холодного климата; морское для умеренного климата; морское для тропического климата.

Все аппараты должны удовлетворять некоторым общим требованиям:

1) допустимой температуре нагрева токоведущих частей и деталей, находящихся вблизи них;

2) при протекании токов короткого замыкания аппараты должны обладать термической и электродинамической стойкостью;

3) надежности работы аппаратов при возникновении перенапряжений;

4) быстродействия, сопровождающего включение и отключение аппаратов.

Кроме этих требований к аппаратам существуют и специфические, которые будут рассматриваться ниже.

1. Понятие об электрическом аппарате. По каким признакам можно классифицировать электрические аппараты?
2. Как классифицируются аппараты по их назначению?
3. Какие основные требования предъявляются к электрическим аппаратам?
4. В каких режимах могут работать электрические аппараты?
5. Сформулируйте требования электродинамической и термической стойкости аппарата.

РАЗДЕЛ 2. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ СИЛЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТАХ

2.1. Общее положения

При протекании токов по проводникам вокруг них возникают магнитные поля. Они, взаимодействуя друг с другом, в некоторых областях усиливаются, в некоторых – ослабляются. В результате, между проводниками с токами, связанными общим магнитным потоком, возникают механические силы, которые называют *электродинамическими*. Аналогичные силы возникают между проводником, обтекаемым током и ферромагнитной массой.

При нормальных эксплуатационных условиях электродинамические силы, как правило, не *вызывают каких-либо деформаций* в аппарате.

Однако при коротком замыкании эти силы достигают больших величин и могут вызвать деформацию и разрушение отдельных частей или всего аппарата. Это обстоятельство требует проведения расчета аппарата (или отдельных его узлов) на электродинамическую стойкость, т. е. на способность выдержать без повреждений прохождение наибольшего возможного в эксплуатационных условиях тока короткого замыкания.

Такой расчет необходим ввиду того, что с целью получения минимальных габаритов в аппаратах стремятся располагать токоведущие части как можно ближе друг к другу.

Расчет электродинамических сил ведется обычно либо на основании законов взаимодействия проводника с током и магнитным полем (первый метод – закон Био-Савара-Лапласа), либо по изменению закона магнитной энергии системы (второй метод).

2.2. Расчет электродинамических сил с помощью закона Био-Савара-Лапласа

Согласно этому закону: сила, действующая на элемент длины \overline{dl} проводника с током I , находящегося в магнитном поле с индукцией \overline{B} , создаваемой другими проводниками равна

$$\overline{dF} = I[\overline{dl} \cdot \overline{B}], \quad (2.1)$$

где B – индукция в месте расположения \overline{dl} . Уравнение в векторной форме.

Уравнение в скалярной форме

$$dF = I B dl \sin\beta, \quad (2.2)$$

где β – угол между векторами \overline{dl} и \overline{B} . За направление вектора \overline{dl} принимается направление тока в этом элементе.

Для определения полной силы, действующей на проводник длиной l , необходимо просуммировать силы, действующие на все его элементы dl , т. е. надо проинтегрировать формулу (2.2), тогда

$$F = \int_0^l BI \sin\beta dl. \quad (2.3)$$

Индукция в месте расположения элемента \overline{dl} находится по формуле

$$\overline{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} I_2 \oint \frac{(\overline{dl}'r_0)}{r^2}, \quad (2.4)$$

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

Рассмотрим контур 2-х проводников (рис. 2.1)

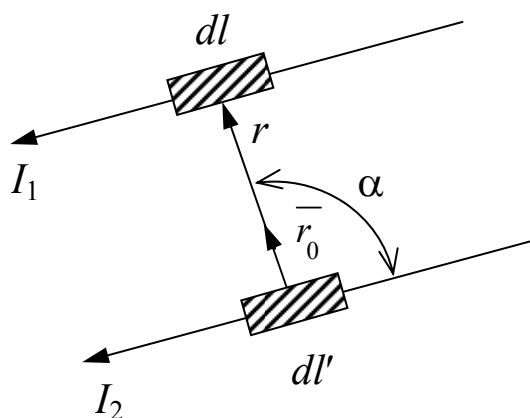


Рис. 2.1

где dl – элемент контура первого проводника;
 dl' – элемент контура второго проводника;
 r – расстояние между dl и dl' ;
 r_0 – единичный вектор, направление от dl к dl' ;
 I_2 – ток в проводнике dl' ;
 α – угол между векторами $\overline{dl'}$ и $\overline{r_0}$.

Интеграл берется по замкнутому контуру проводника с током I и в скалярной форме (2.4) будет выглядеть

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} I_2 \frac{dl' \sin \alpha}{r^2}. \quad (2.5)$$

Вектор \overline{B} перпендикулярен плоскости, где лежат вектора dl' и r_0 . Подставив выражение (2.5) в формулу (2.3) и проинтегрировав, получим

$$F = c I_1 I_2 \cdot \frac{\mu_0}{4\pi},$$

где $c = \int_l dl \cdot \int_l \frac{dl'}{r^2} \sin \alpha$ – безразмерная величина зависит от взаимного геометрического расположения проводников, если $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, то

$$F = 10^{-7} I_1 I_2 \cdot c. \quad (2.6)$$

2.3. Расчет электродинамических сил по изменению запаса магнитной энергии системы

Этот расчет основан на использовании энергетического баланса системы проводников с током.

Электромагнитное поле вокруг проводников и контуров с током обладает определенным запасом энергии

$$W = L \frac{I^2}{2}, \quad (2.7)$$

где I – ток в контуре.

Электромагнитная энергия 2-х контуров, обтекаемых токами I_1 и I_2 .

$$W = L_1 \frac{I_1^2}{2} + L_2 \frac{I_2^2}{2} + M I_1 \cdot I_2, \quad (2.8)$$

где L_1 и L_2 – индуктивности контуров;

M – взаимоиндуктивность контуров.

Всякая деформация контура или изменение взаиморасположения контуров приводит к изменению запаса электромагнитной энергии.

При этом работа сил равна изменению запаса энергии

$$Fdx = dW ,$$

где dW – изменение запаса при деформации системы под действием силы F в направлении x .

$$F = \frac{dW}{dx} \quad (2.9)$$

Сила F равна скорости изменения запаса энергии системы при ее деформации. Подставив выражение (2.7) в формулу (2.9) получим

$$F_K = \frac{I^2}{2} \frac{dl}{dx} . \quad (2.10)$$

Если мы рассмотрим два контура (рис. 2.2)

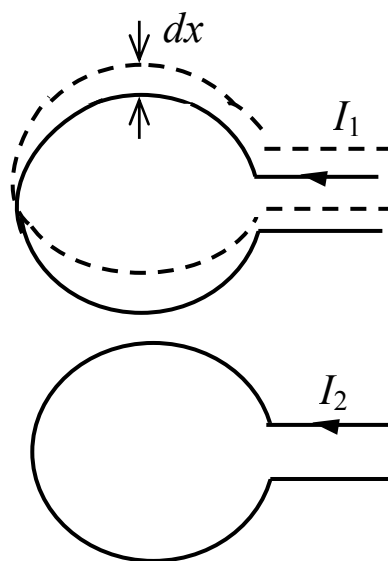


Рис. 2.2

Сила оказываемая вторым контуром на первый будет определяться [выражение (2.8) подставляем в (2.9)]

$$F_x = \frac{I_1^2}{2} \frac{dl_1}{dx} + \frac{I_2^2}{2} \frac{dl_2}{dx} + I_1 \cdot I_2 \frac{dM}{dx} . \quad (2.11)$$

При неизменной конфигурации контуров: $L_1 = \text{const}$ и $L_2 = \text{const}$; тогда

$$F_x = I_1 \cdot I_2 \frac{dM}{dx} . \quad (2.12)$$

2.4. Примеры электродинамического взаимодействия проводников

а) Взаимодействие между 2-мя параллельными проводниками круглого сечения для бесконечно длинных шин (рис. 2.3).

$$F = I_1 I_2 \cdot 10^{-7} \frac{2l}{a} \quad (2.13)$$

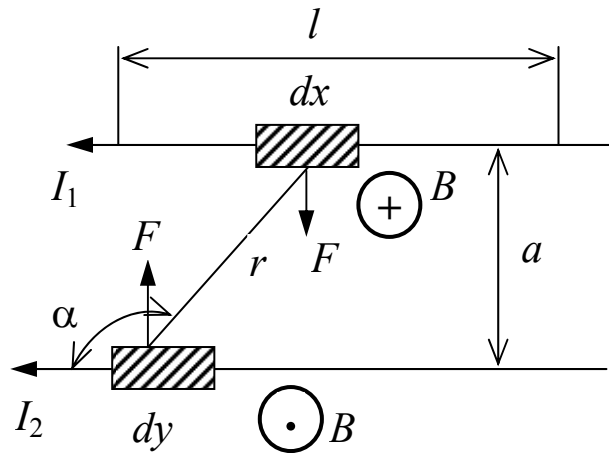


Рис. 2.3

Для конечной длины провода (рис. 2.3).

$$F = 10^{-7} I_1 I_2 \cdot \frac{2l}{a} \left[\sqrt{1 + \frac{a^2}{l^2}} - \frac{a}{l} \right] = 10^{-7} I_1 I_2 k_d \quad (2.14)$$

Для 2-х проводников разной длины с любым сдвигом (рис. 2.4) используется формула Холявского, где $\sum D$ – сумма диагоналей трапеции, построенной на взаимодействующих проводниках; $\sum S$ – сумма боковых сторон трапеции; k_d – геометрический фактор.

$$k_d = \frac{\sum D - \sum S}{a} \quad (2.15)$$

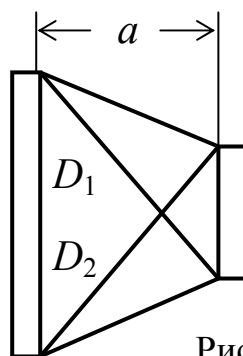


Рис. 2.4

б) Взаимодействие между 2-мя параллельными проводниками прямоугольного сечения (рис. 2.5).

$$F = 2 \cdot 10^{-7} I_1 I_2 \cdot \frac{al}{h^2} \left[2 \frac{h}{a} \operatorname{arctg} \frac{h}{a} - \ln \left(1 + \frac{h^2}{a^2} \right) \right];$$

$$k_d = \frac{a^2}{h^2} \left[2 \frac{h}{a} \operatorname{arctg} \frac{h}{a} - \ln \left(1 + \frac{h^2}{a^2} \right) \right];$$

$$F = 2 \cdot 10^{-7} I_1 I_2 \cdot \frac{l}{a} k_d . \quad (2.16)$$

k_d — определяется по кривым в зависимости от размеров сечения и взаимного расположения проводников.

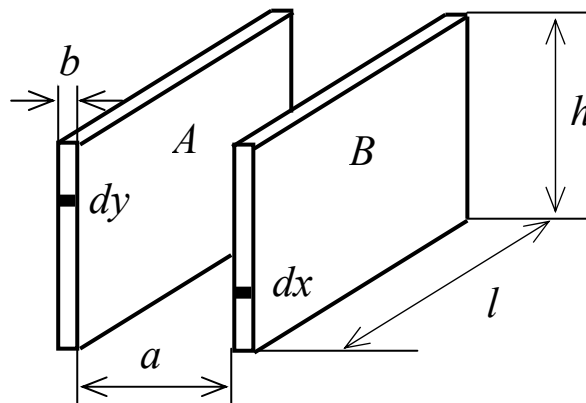


Рис. 2.5

Для рис. 2.6

$$F = 2 \cdot 10^{-7} I_1 I_2 \cdot \frac{l}{b^2} \left[(a + 2b) \ln(a + 2b) - 2(a + b) \ln(a + b) + a \ln a \right]. \quad (2.17)$$

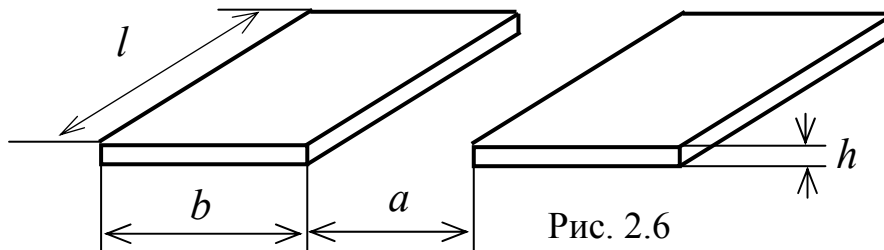


Рис. 2.6

в) Взаимодействие между круглыми взаимно перпендикулярными проводниками.

$$F = 10^{-7} I^2 \left(\ln \frac{a}{h + \sqrt{h^2 + a^2}} - \ln \frac{\rho}{h + \sqrt{h^2 + a^2}} \right). \quad (2.18)$$

По мере удаления от оси вертикального проводника индукция уменьшается и сила тоже (рис. 2.7).

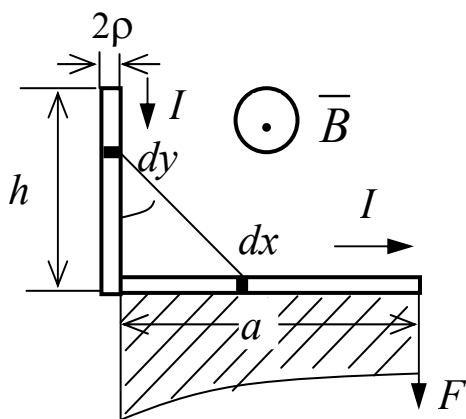


Рис. 2.7

Сила увеличивается вдвое в П-образном контуре (рис. 2.8).

$$F = 10^{-7} I^2 2 \left(\ln \frac{a}{h + \sqrt{h^2 + a^2}} - \ln \frac{\rho}{h + \sqrt{h^2 + a^2}} \right).$$

(2.19)

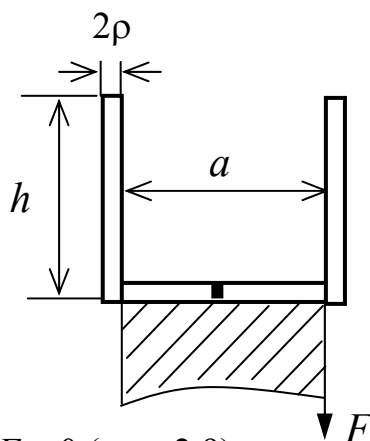


Рис. 2.8

В Z-образном контуре $F = 0$ (рис. 2.9).

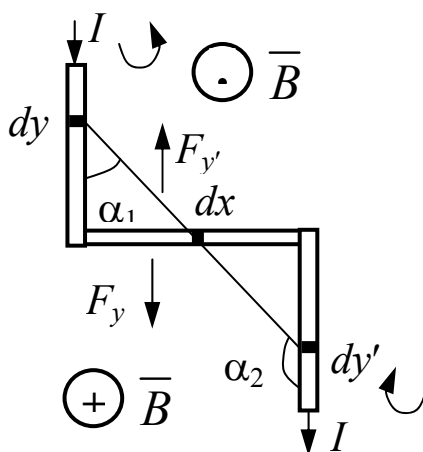


Рис. 2.9

2.5. Силы взаимодействия между проводником с током и ферромагнитной массой

Вблизи ферромагнитной массы магнитное поле вокруг проводника с током искажается, магнитные силовые линии стремятся замкнуться по массе, и возникают силы, стремящиеся притянуть проводник к этой массе (рис. 2.10.)

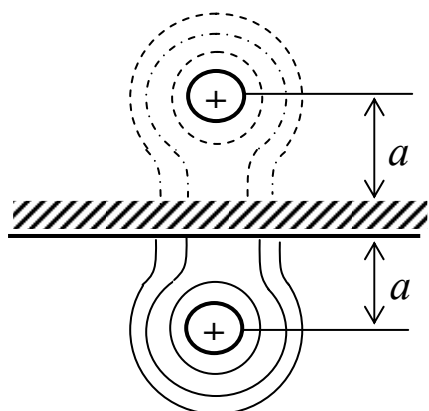


Рис. 2. 10

Заменим действия ферромагнитной массы вторым проводником с током того же направления, расположенным на таком же расстоянии от границы раздела сред. Картина поля не нарушается, так как с удвоением длины силовой линии, удвоилась и магнитодвижущая сила $2i$ и $2l$.

Сила взаимодействия между 2-мя параллельными проводниками из уравнения (2. 13) – $F = 10^{-7} I^2 \frac{2l}{a}$, так как вместо $a \rightarrow 2a$, то

$$F = 10^{-7} I^2 \frac{l}{a}. \quad (2.20)$$

Если проводник с током находится внутри ферромагнитной массы (рис. 2.11), то силы будут отталкивать его от границы раздела. Картина поля будет такая же, как если бы за пределами ферромагнитной массы на таком же расстоянии был расположен проводник с током обратного направления.

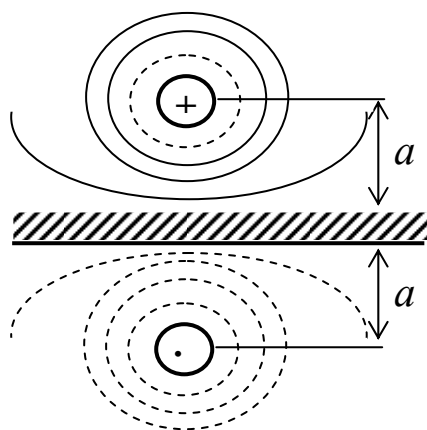


Рис. 2.11

F – вычисляется аналогично (2.20)

$$F = 10^{-7} I^2 \frac{l}{a}.$$

Силы притяжения будет испытывать и проводник, расположенный в щели постоянного или переменного сечения в ферромагнитной массе (рис. 2.12).

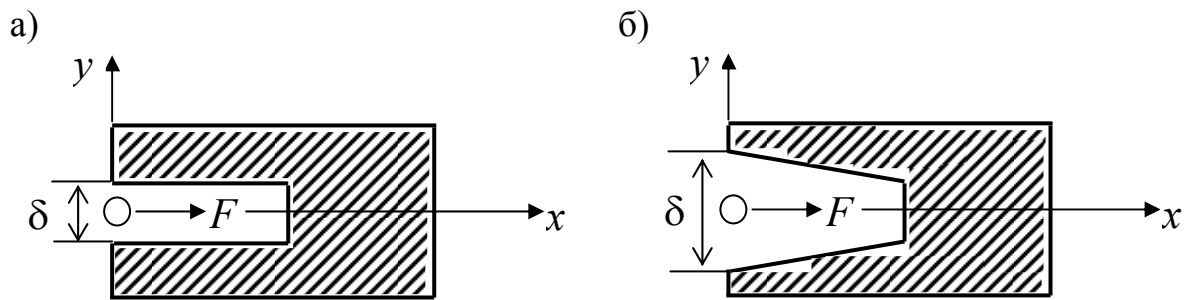


Рис. 2.12

$$F = 0,63 \cdot 10^{-6} I^2 \frac{l}{\delta_{\chi}}, \quad (2.21)$$

где l – длина щели (перпендикулярна рисунку);

δ или δ_{χ} – ширина щели в месте расположения проводника.

В щели постоянного сечения (рис. 2.12,а) сила затягивающая проводник вглубь, будет неизменной, а в щели переменного сечения (рис. 2.12,б) – переменной, возрастающей по мере сужения щели.

Уравнение (2.21) справедливо, когда проводник расположен в щели симметрично, и сила действует по оси x .

Если проводник окажется смещенным с оси симметрии, то силы притяжения его к противоположным стенкам по оси y окажутся неравными. Проводник будет перемещаться по какой-то кривой, определяемой 2-мя переменными составляющими сил F_x и F_y .

2.6. Электродинамические силы в контактах и способы их компенсации

Контакт может быть представлен как проводник переменного сечения (рис. 2.13).

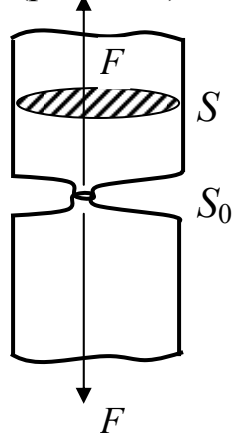


Рис. 2.13

В месте сужения линий тока возникают продольные электродинамические силы, стремящиеся разомкнуть контакт:

1) для однотоочечных контактов

$$F = 10^{-7} I^2 \ln \frac{S}{S_0}; \quad (2.22)$$

2) для многоточечных контактов

$$F = 10^{-7} \frac{I^2}{n} \ln \frac{S}{S_0}, \quad (2.23)$$

где S – кажущаяся площадь контакта, сечение контакта в том месте, где нет искривлений линий тока;

S_0 – действительная площадка контактирования.

Электродинамические силы при коротком замыкании достигают больших величин, и, при недостаточном давлении на контакт могут отбросить контакты друг от друга, вызывая дугу, которая, расплавляя металл контактов, может привести к их привариванию.

2.6.1. Мостиковый компенсатор (рис. 2.14).

Использован принцип деления цепи тока в контактах на 2-е параллельные ветви. Токи I_1 и I_2 имеют одинаковое направление и вызывают $F_{\text{ЭДУ}}$ притягивающие контакты друг к другу $F_0 = F_{\text{П}} + F_{\text{ЭДУ}} - 2F$, где F_0 – результирующее нажатие в контактах; $F_{\text{П}}$ – сила натяжения контактных пружин, F – сила контактного отброса.

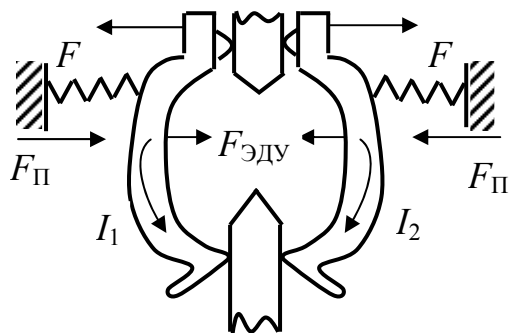


Рис. 2.14

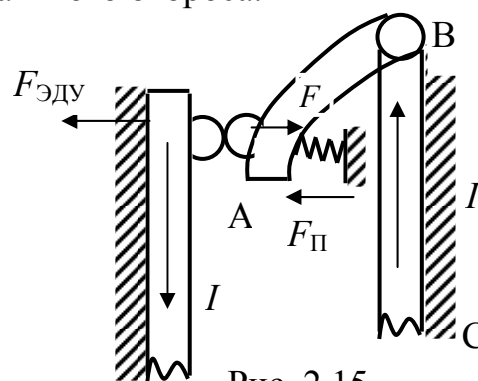


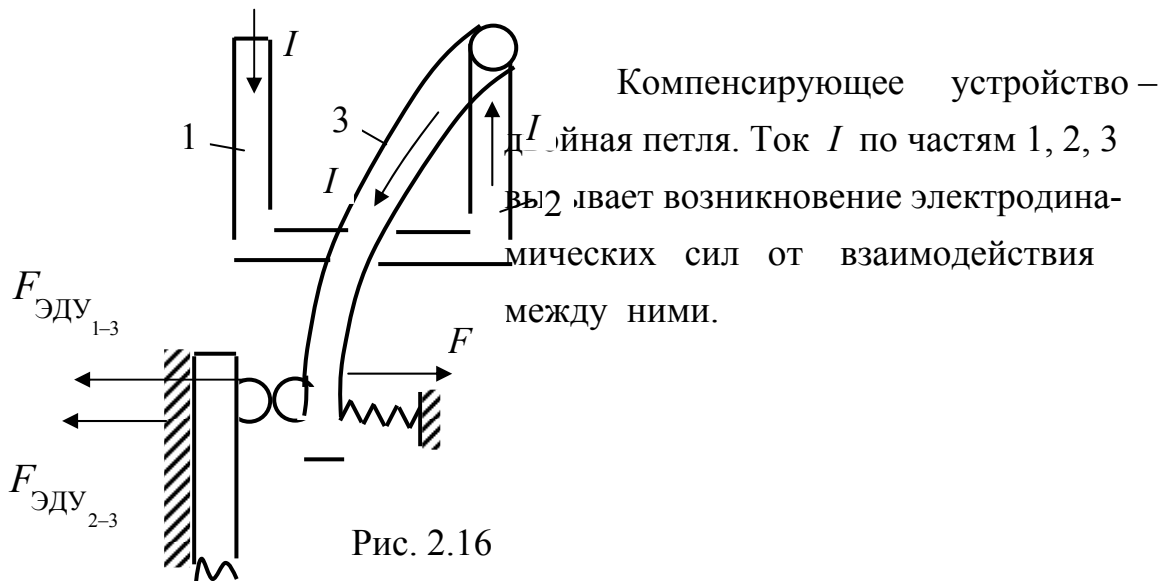
Рис. 2.15

2.6.2. Петлевой компенсатор (рис. 2.15).

В этом случае компенсирующее усилие $F_{\text{ЭДУ}}$ возникает за счет петли тока ABC (токи в участках АВ и ВС имеют противоположное направление). Эти

усилия возрастают с увеличением длины участков АВ и ВС и с уменьшением расстояния между ними $F_0 = F_{II} + F_{\text{ЭДУ}} - F$.

2.6.3. Двойной петлевой компенсатор (рис. 2.16).



$F_{\text{ЭДУ}_{1-3}}$ и $F_{\text{ЭДУ}_{2-3}}$ направлены согласно, в сторону противоположную направлению сил отталкивания в контактах F и компенсируют их. Устройство способно развивать большие компенсирующие усилия, благодаря двухстороннему действию сил на подвижный контакт 3.

$$F_0 = F_{\text{ЭДУ}_{1-3}} + F_{\text{ЭДУ}_{2-3}} - F + F_{II}.$$

2.7. Электродинамические силы при переменном токе в однофазной цепи

Электродинамические силы (ЭДУ) при протекании по проводникам переменного тока могут рассчитываться по тем же формулам, что и на постоянном токе, если заменить в них постоянные значения токов I_1 и I_2 мгновенными значениями токов i_1 и i_2 .

Мгновенные значения электродинамической силы F выражаются через мгновенные значения токов.

Пусть ток изменяется по следующему закону:

$$i = I_m \sin \omega t .$$

(2.24)

Электродинамическая сила по формуле (2.6) по закону Био-Савара-

Лапласа определяется

$$F = ci^2 = cI_m^2 \sin^2 \omega t = cI_m^2 \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} = c \frac{I_m^2}{2} - \frac{c \cdot \cos 2\omega t I_m^2}{2}; \quad (2.25)$$

$$F = \frac{F_m}{2} - \frac{F_m}{2} \cos 2\omega t, \quad (2.26)$$

где $F_m = cI_m^2$ – максимальное значение силы.

Сила изменяется с двойной частотой по сравнению с частотой тока

(рис. 2.17), и ее представляют в виде 2-х компонент: постоянной по величине

$$\frac{cI_m^2}{2} \text{ и переменной } - c \frac{\cos 2\omega t}{2} I_m^2.$$

Поскольку \cos угла принимает значения от +1 до -1, то сила будет изменяться от $F_m = cI_m^2$ до $F = 0$ не меняя своего знака.

Среднее значение силы в рассматриваемом случае, равно за период

$$F_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T F dt = \frac{cI_m^2}{2} = cI^2, \quad (2.27)$$

где I – действующее значение тока.

$$F_m = cI_m^2 = 2cI^2;$$

$$F_m = 2F_{cp} = 2cI^2 = cI_m^2; \quad (2.28)$$

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

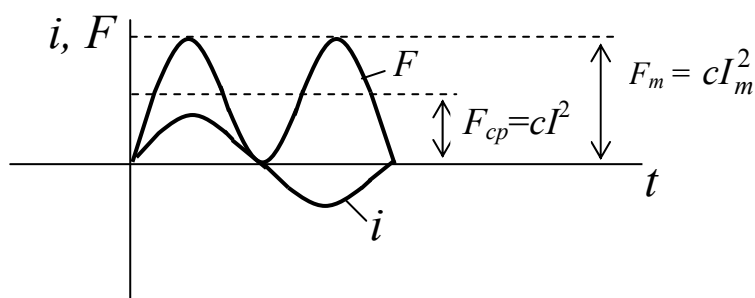


Рис. 2.17

При коротком замыкании в цепи переменного тока ток короткого замыкания кроме периодической (переменной) составляющей содержит также аperiodическую (постоянную) составляющую, величина которой зависит от момента замыкания цепи относительно нулевого значения переменной. При

расчете ЭДУ берется наиболее тяжелый случай, когда замыкание цепи происходит в момент максимального значения периодической составляющей тока.

В цепи наступает наибольший пик (ударный ток)

$$i_{y\partial} = k_{y\partial} \cdot I_m, \quad (2.29)$$

где $k_{y\partial}$ – ударный коэффициент, зависящий от мощности установки, расположения аппарата и вида цепи.

Чем больше мощность источника, чем ближе к нему расположен аппарат, тем больше ударный коэффициент.

При коротком замыкании в кабельной сети $k_{y\partial}$ мал, так как сопротивление R – велико, а индуктивность L – мала.

При расчете обычно $k_{y\partial} = 1,8$.

Максимальное значение силы будет при ударном токе

$$F_{\max} = ck_{y\partial}^2 I_m^2 = c \cdot 1,8^2 \cdot I_m^2 = 3,24cI_m^2, \quad (2.30)$$

т. е. аperiodическая составляющая тока короткого замыкания в 3,24 раза увеличивает амплитуду силы.

Подставив в выражение (2.30) $I_m = \sqrt{2}I$, где I – действующее значение тока, получим

$$F_{\max} = 2ck_{y\partial}^2 I^2 = 6,48cI^2, \quad (2.31)$$

т. е. при равном значении установившегося тока короткого замыкания при переменном токе электродинамическая сила может быть почти в 6,5 раз больше, чем при постоянном токе.

2.8. Механический резонанс и собственная частота электрических сетей низкого напряжения

Всякая механическая упругая система имеет собственную частоту колебаний. Благодаря пульсациям электродинамических сил между токоведущими частями аппарата при протекании по ним переменного тока, возможна вибрация шин. Если электродинамические силы будут меняться с частотой, равной частоте собственных колебаний системы, то система будет колебаться со все возрастающей амплитудой, теоретически до бесконечности, и конструкция разрушается – это называется механическим резонансом.

Для избегания механического резонанса необходимо, чтобы частота собственных колебаний системы отличалась от частоты изменения электродинамических сил. Лучше, когда частота собственных колебаний меньше частоты электродинамических сил. Если это не удастся, то выбирают собственную частоту колебаний системы выше двойной частоты силы.

Сведения о собственной механической частоте токоведущих частей крайне ограничены.

Например: для 2-х параллельных шин частоту собственных колебаний можно определить с помощью формулы

$$f = \frac{k}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{\gamma g}}, \quad (2.32)$$

где γ – удельный вес (кг/см³);

l – пролет между изоляторами (см);

E – модуль упругости материала (кг/см²);

J – момент инерции сечения шин (см²);

g – сечение шины (см²);

k – коэффициент, зависящий от характера крепления шин;

$k = 112$ – при жестком креплении шин изоляторов;

$k = 78$ – при свободном креплении на одной опоре и жестком на другой;

$k = 49$ – при свободнолежащих на опорах шины.

Из формулы видно, что собственная частота колеблющихся шин может изменяться за счет изменения пролета l .

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Сформулируйте два основных метода определения электродинамических сил и укажите область наиболее рационального применения каждого из них.

2. Приведите выражения для сил взаимодействия между параллельными проводниками бесконечной и конечной длины. Чем отличаются эти выражения друг от друга?

3. Как найти силы, действующие на перемычки П-образного и Z-образного контуров? Какой вид имеют эпюры этих сил?

4. Какие силы действуют в месте изменения сечения проводника? Как они направлены?

5. Как найти силы взаимодействия между проводником с током и ферромагнитными массами, ограниченными плоскостью?

6. Что такое электродинамическая стойкость электрического аппарата? Какими величинами она характеризуется?

РАЗДЕЛ 3. НАГРЕВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТАХ

3.1. Номинальные технические параметры

Джоулево тепло, которое выделяется при протекании тока в аппарате, частично расходуется на нагрев токоведущих частей и частично отдаётся в окружающую среду или находящимся вблизи или на них изоляционным деталям.

Нагревостойкость изоляционных деталей будет определять допустимую температуру токоведущих частей при длительном протекании тока.

В ГОСТе указаны допустимые температуры нагрева для основных классов электроизоляции. Учёт при проектировании аппаратов допустимой температуры определяет их надёжность.

Ток в проводниках, при котором температура в изоляционных частях будет соответствовать допустимой при длительном протекании, *называется номинальным*.

Номинальный ток и номинальное напряжение оговариваются в ТУ и являются основными требованиями к электрическим аппаратам.

3.2. Потери в проводниках, обтекаемых током

Мощность P , теряемая в проводнике при прохождении по нему тока равняется при постоянном токе (омическое сопротивление). При переменном токе ВЧ необходимо учитывать поверхностный эффект и эффект близости. Всё это учитывается коэффициентом дополнительных потерь $K_{\delta} = K_n K_{\delta}$. Сопротивление $R_a = K_{\delta} R$ Ом называется *активным сопротивлением*, где $K_{\delta} > 1$. Влияние поверхностного эффекта сильно сказывается при больших сечениях проводников ($D > 3$ см), при больших токах и высоких частотах. В этих случаях выгодно брать не сплошной круглый проводник, а трубчатый.

Для снижения температуры токоведущих частей трубки делят на части и раздвигают их (рис. 3.1).

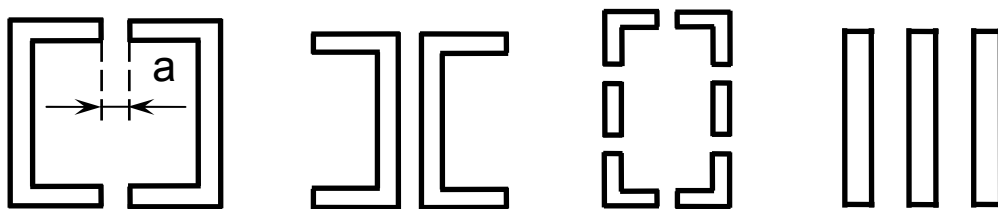


Рис. 3.1

3.3. Отдача тепла нагретым телом

Различают три вида передачи тепла от нагретого тела холодному: теплопроводность, конвекция, излучение.

Передача тепла *теплопроводностью* может происходить как внутри тела, так и между двумя соприкасающимися телами, и описывается уравнением Фурье

$$dQ = \lambda \frac{d\theta}{dx} dS dt .$$

Теплоотдача с поверхности тела обычно происходит *конвекцией* и *излучением*. В большинстве случаев определить их доли в теплоотдаче невозможно. Поэтому вводят понятие *коэффициента теплоотдачи* K_T (Вт/см²·°С).

K_T определяет количество тепла, которое отдаётся в окружающую среду за единицу времени с единицы поверхности теплоотдающим телом при разности температур тела и окружающего пространства в 1°С.

Количество тепла, отдаваемое телом за единицу времени, равно

$$Q = K_T (\theta_T - \theta_{cp}) F ,$$

где величину $\theta_T - \theta_{cp} = \tau$ называют температурой превышения тела над окружающей средой. Тогда

$$Q = K_T \tau F .$$

3.4. Установившийся процесс нагрева

В установившемся режиме все потери в проводнике отдаются в окружающую среду $P = K_T \tau_{уст} F$.

Откуда $\tau_{уст} = \frac{P}{K_T F}$ – формула Ньютона,

где $P = K_\delta I^2 R$; $R = \frac{\rho l}{S} = \frac{\rho_0 (1 + \alpha \theta_T) \cdot l}{S}$; $\tau_{уст} = \tau_{дон}$.

Пример: $P = K_\delta I^2 \frac{4\rho_0 (1 + \alpha \theta_T) \cdot l}{\pi d^2} = \pi d K_T \tau_{дон} l$; $\tau_{дон} = \theta_T - \theta_{cp}$.

Отсюда
$$d = \sqrt[3]{\frac{4K_{\partial}I^2\rho_0(1 + \alpha\theta_T) \cdot l}{\pi^2 K_T \tau_{\partial on}}}.$$

3.5. Нагрев изолированных проводников

Проводник круглого сечения покрыт равномерным слоем изоляционного материала. Рассматривается установившийся режим (рис. 3.2).

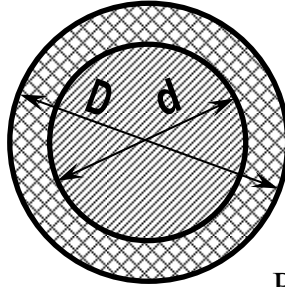


Рис. 3.2

$$\tau_{\partial on} = \tau_{уст} = \frac{F}{K_T F}.$$

Найдем τ_{\max} на внутренней стороне изоляции

$$\tau_{\max} = \tau_{\partial on} + \Delta\tau,$$

где $\Delta\tau$ – перепад температуры в толще изоляции $\Delta\tau = \frac{P}{2\pi l \lambda} \ln \frac{D}{d}$.

Тогда
$$\tau_{\max} = \frac{P}{K_T D l} + \frac{P}{2\pi D l} \ln \frac{D}{d}.$$

Для прямоугольного проводника (рис. 3.3) $\tau_{\max} = \tau_{\partial on} + \Delta\tau$.

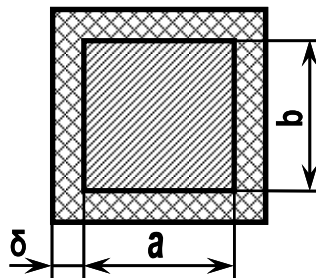


Рис. 3.3

$$\Delta\tau = \frac{P\delta}{2\lambda(a+b)} ; \quad \tau_{\max} = \frac{P}{2K_T l(2\delta + a + b)} + \frac{P\delta}{2\lambda(a+b)},$$

где λ – коэффициент теплопроводности изоляционного материала.

3.6. Нагрев и охлаждение проводника при длительном режиме работы

Процесс нагрева проводника. Запишем уравнение теплового баланса при прохождении тока по проводнику

$$Pdt = cMdt + K_T F \tau dt.$$

Отсюда $\frac{d\tau}{dt} + \frac{K_T F}{cM} \tau = \frac{P}{cM}$, где c – удельная проводимость, M – масса проводника, $C = cM$ – теплоемкость материала.

$$\tau = \frac{P}{K_T F} \left[1 - e^{-\frac{K_T F}{cM} t} \right] + \tau_0 e^{-\frac{K_T F}{cM} t}.$$

Здесь $\frac{P}{K_T F} = \tau_{уст} = \tau_{дон}$; $\frac{cM}{K_T F} = T$ – постоянная времени.

$$\text{Таким образом, } \tau = \tau_{уст} = \left[1 - e^{-\frac{t}{T}} \right] + \tau_0 e^{-\frac{t}{T}}.$$

Процесс охлаждения проводника. Уравнение теплового баланса примет вид

$$0 = cM d\tau + K_T F \tau dt.$$

Отсюда $\frac{d\tau}{dt} + \frac{K_T F}{cM} \tau = 0$. Получаем решение уравнения

$$\tau = \tau_{уст} e^{-\frac{t}{T}}.$$

Кривая охлаждения является зеркальным отражением кривой нагревания (рис. 3.4). Постоянная времени T определяется аналогично

$$T = \frac{cM}{K_T F}.$$

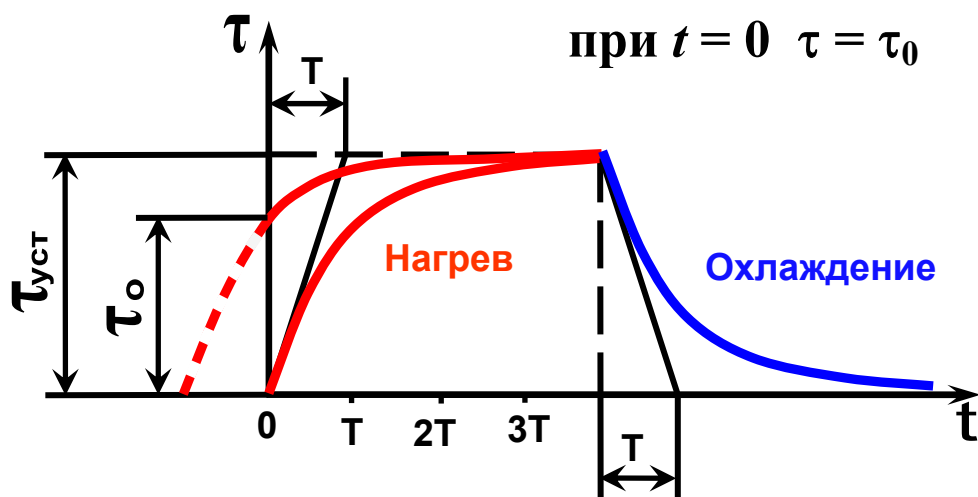


Рис. 3.4

3.7. Нагрев и охлаждение при кратковременной нагрузке (рис. 3.5)

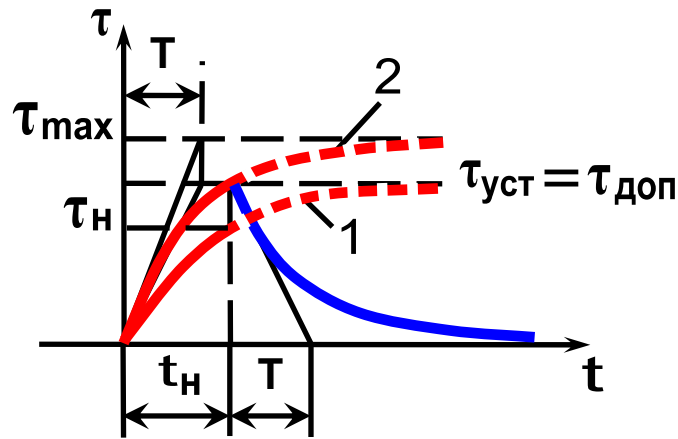


Рис. 3.5

При $\tau_n < \tau_{доп}$ – проводник недогружен по току.

Следует *дозагрузить* проводник так, чтобы при $t = t_n$; $\tau_n = \tau_{доп}$. Это в случае, если превышение изменилось по кривой 2.

Для расчета вводится *коэффициент перегрузки по мощности* K_p , который определяется из соотношения

$$K_p = \frac{P_{кр}}{P_{\delta}} = \frac{\tau_{max} K_T F}{\tau_{доп} K_T F} = \frac{\tau_{max}}{\tau_{доп}} = \frac{\tau_{max}}{\tau_{max} \left(1 - e^{-\frac{t_n}{T}}\right)} = \frac{1}{1 - e^{-\frac{t_n}{T}}} > 1.$$

Коэффициент перегрузки по току K_I найдем из выражения для коэффициента перегрузки по мощности

$$K_p = \frac{P_{кр}}{P_{\delta}} = \frac{K_{\delta} I_{max}^2 R}{K_{\delta} I_{\delta}^2 R} = \frac{I_{max}^2}{I_{\delta}^2} = K_I^2, \quad \text{т. е.} \quad K_I = \sqrt{K_p} = \frac{1}{1 - e^{-\frac{t_n}{T}}}.$$

Охлаждение проводника будет происходить по той же кривой, что и при длительном режиме.

3.8. Нагрев и охлаждение проводника при повторно-кратковременной нагрузке

Повторно-кратковременным называется режим, при котором периоды нагрузки t_n чередуются с паузами t_n .

Режим характеризуется относительной продолжительностью включений – ПВ %.

$$ПВ \% = \frac{t_n}{t_n + t_n} 100 \%,$$

где $t_n + t_n$ – длительность цикла.

Стандартные значения ПВ %: 15, 25, 40, 60 %.

На рис. 3.6 представлен процесс дозагрузки по мощности и току.

Кривая 2 не достигает $\tau_{уст} = \tau_{доп}$, кривая 1 – аппарат недозагружен током.

При длительном режиме превышении температуры было бы $\tau_{max} > \tau_{доп}$ (кривая 4). При повторно-кратковременном режиме кривая 3 достигает $\tau_{доп}$ (кривая 1). Коэффициент перегрузки по мощности и току

$$K_p = \frac{P_{нк}}{P_{\partial}} = \frac{\tau_{max}}{\tau_{уст}} = \frac{1 - e^{-\frac{t_n + t_n}{T}}}{1 - e^{-\frac{t_n}{T}}}; \quad K_I = \sqrt{K_p} = \sqrt{\frac{1 - e^{-\frac{t_n + t_n}{T}}}{1 - e^{-\frac{t_n}{T}}}}$$

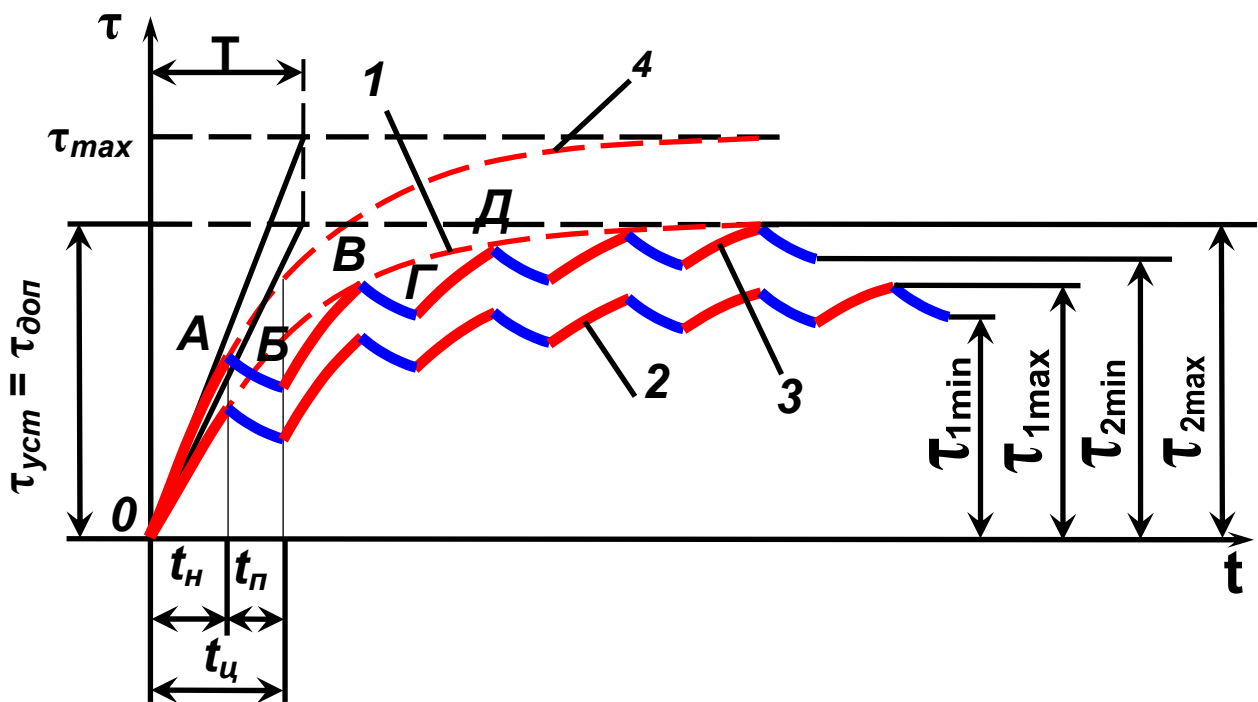


Рис. 3.6

3.9. Нагрев проводника при коротком замыкании (К.З.)

Короткое замыкание характеризуется большим током и малой длительностью (рис. 3.7). Уравнение теплового баланса запишется:

$$Pdt = cMdt$$

или, учитывая, что $d\tau = d\theta$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{d\tau}{dt} = \frac{K_{\partial} I^2 R}{cM} = \frac{K_{\partial} I^2 \rho^2 (1 + \alpha_{\theta_T}) l}{S c_0 (1 + \beta_T \theta_T) \gamma S l} \int_0^{t_{кз}} \frac{I^2}{S^2} dt = \int_{\theta_H}^{\theta_{кз}} \frac{c_0 (1 + \beta_T \theta_T) \gamma}{K_{\partial} \rho_0 (1 + \alpha_{\theta_T})} d\theta.$$

Введем понятие квадратичного импульса, выраженного через величину установившегося тока короткого замыкания

$$\int_0^{t_{кз}} \frac{I^2}{S^2} dt \int_0^{t_{кз}} \delta^2 dt = \delta_{\phi}^2 t_{\phi},$$

где t_{ϕ} – фиктивное время; δ_{ϕ} – фиктивная плотность тока.

Интегрируя правую часть и решая относительно $\tau_{кз}$, получим

$$\tau_{кз} = \frac{\rho_{гор}}{\gamma c_{гор}} K_{\delta} \delta_{\phi}^2 t_{\phi} + \tau_H,$$

где τ_H – превышение температуры проводника над окружающей средой в начальный момент короткого замыкания.

Охлаждение проводника происходит по тем же законам, что и после длительного нагрева.

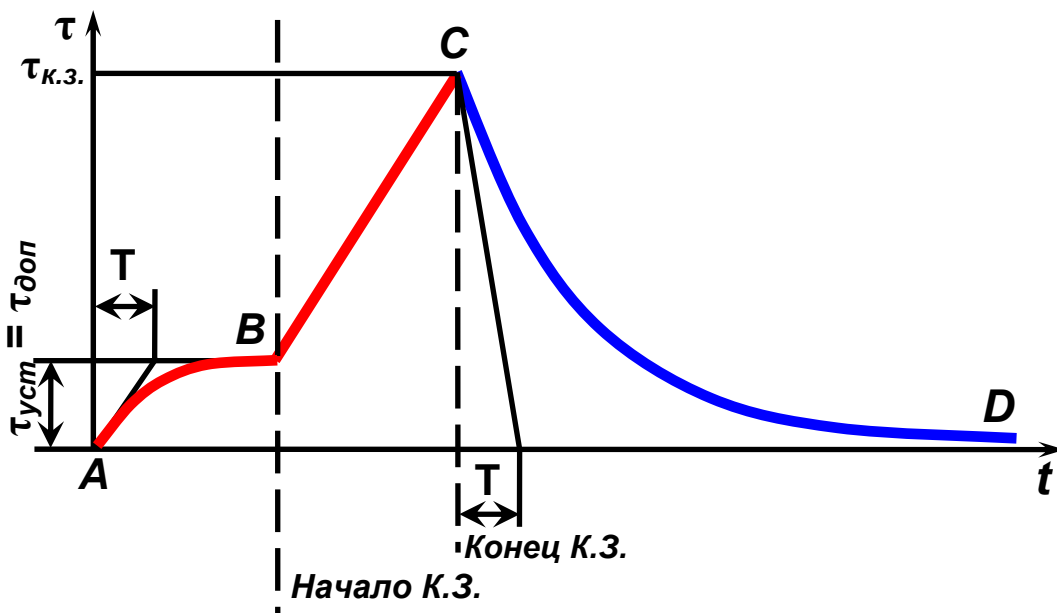


Рис. 3.7

3.10. Понятие о термической стойкости

Способность аппарата выдерживать воздействия токов короткого замыкания называется *термической стойкостью*.

Параметры, характеризующие термическую стойкость, показаны на рис. 3.8.

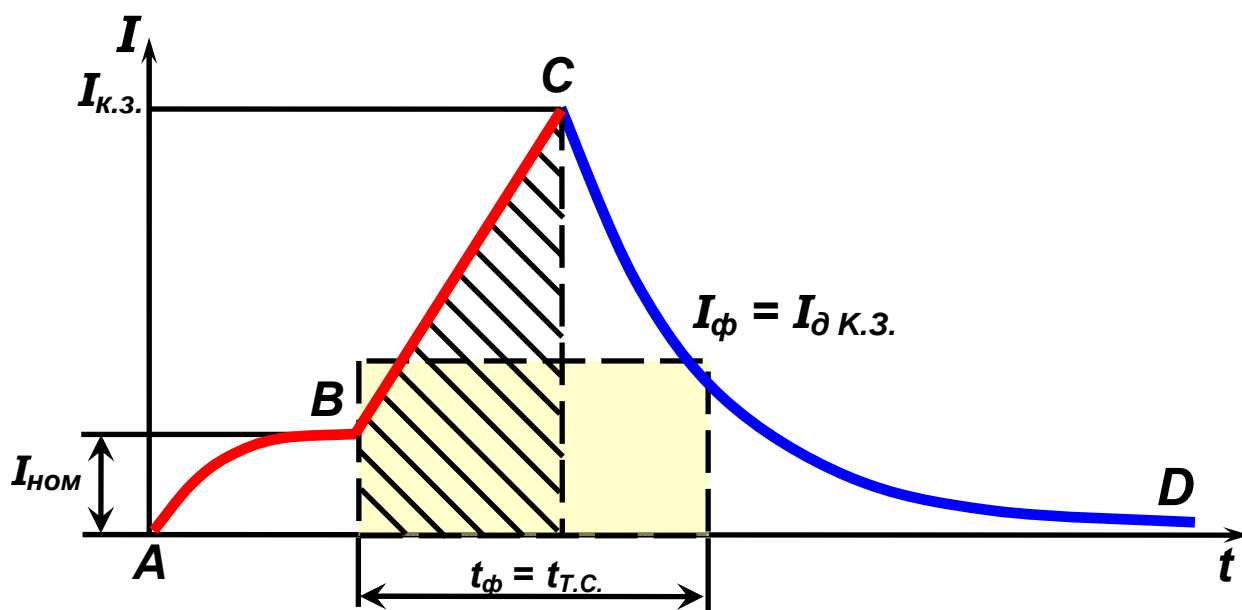


Рис. 3.8

Током термической стойкости аппарата называют наибольшее действующее значение тока короткого замыкания, выдерживаемое в течение определённого промежутка времени без нагрева частей аппарата свыше допустимого уровня и без повреждений, препятствующих его дальнейшей работе.

Время термической стойкости – наибольшее время, в течение которого ток термической стойкости может протекать через аппарат без повреждений, препятствующих его дальнейшей работе.

В аппаратах высокого напряжения величины времени термической стойкости ГОСТированы.

При напряжениях до 35 кВ – $t_{т.с.}$ не менее 4 сек.

При напряжениях до 110 кВ – $t_{т.с.}$ не менее 3 сек.

3.11. Предельная допустимая температура нагрева проводников

Короткое замыкание является кратковременным режимом и поэтому нагрев токами термической стойкости можно допустить более высокий, чем при длительном режиме. Однако этот нагрев не должен приводить к снижению электрических и механических свойств изоляции и проводов.

Предельно допустимая температура для токоведущих частей (кроме алюминия):

- соприкасающихся с органической изоляцией – 250°C;
- не соприкасающихся с изоляцией – 300°C.

Для алюминиевых токоведущих частей – 200°C.

3.12. Нагрев ферромагнитного материала

Ферромагнитный материал, находящийся в магнитном поле, нагревается.

Возникают потери $P_{жс} = P_B + P_G$, где P_B – потери на вихревые токи; P_G – потери, обусловленные гистерезисом.

Потери в магнитопроводе могут быть подсчитаны по формуле

$$P_{жс} = \left[\sigma_B \left(\frac{f}{100} \right)^2 + \sigma_G \left(\frac{f}{100} \right)^2 \right] B^2 \cdot 10^{-8} \text{ Вт},$$

где σ_B – и σ_G – коэффициенты для потерь на вихревые токи и гистерезис;
 f – частота; B – индукция.

Способы снижения нагрева:

- 1) замена не ферромагнитными материалами;
- 2) набор шихтованных пластин;
- 3) использование легированных сталей, имеющих узкую гистерезисную кривую;
- 4) изготовление канавок, создающих разрыв магнитных линий;
- 5) применение короткозамкнутых витков;
- 6) экранирование.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Назовите все источники тепловых потерь в электрических аппаратах.
2. Чем объясняете нагрев нетоковедущих ферромагнитных частей аппарата, находящихся вблизи проводников с переменным током? Перечислите меры борьбы с этим явлением.
3. Какое явление называют эффектом близости? Что такое поверхностный эффект, от каких параметров материала токоведущей части аппарата и как он зависит?
4. Назовите все виды отдачи тепла нагретыми частями аппарата. Приведите зависимости, определяющие величины различных видов теплоотдачи.
5. Что такое постоянная времени при нагреве и охлаждении токоведущих частей аппарата и от каких факторов она зависит?
6. Что понимается под повторно-кратковременным режимом работы аппарата? Дайте определение коэффициента перегрузки по мощности и току при этом режиме.

7. Чем отличается процесс нагревания токоведущей части аппарата при коротком замыкании от нагревания при нормальном режиме работы?

8. Какова максимально допустимая температура медных и серебряных контактов? Чем опасно превышение этой температуры?

9. Что такое термическая стойкость электрического аппарата и какими величинами она характеризуется?

РАЗДЕЛ 4. КОНТАКТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

4.1. Основные понятия

Электрической контактной системой называется конструктивный узел, при помощи которого производится соприкосновение 2-х или нескольких проводников для перехода тока из одного в другой.

Место соприкосновения этих проводников, через которые проходит ток, называется *электрическим контактом*.

Соприкосновение проводников может быть обеспечено болтами, зажимами, пружиной и т. д.

Контактные соединения являются важными конструктивными частями каждого электрического аппарата. Неправильная их конструкция, небрежное выполнение, неудовлетворительное состояние контакта могут быть причинами разрушения аппаратов и аварии.

Контактные соединения по условиям работы делятся на четыре вида.

1. **Неподвижные** (жесткие) – это контактные соединения, при работе которых не происходит отделения одной контактной поверхности от другой.

Неподвижные соединения осуществляются путём механического соединения проводников болтами, заклёпками, пайкой и другими способами. Используются в электрических аппаратах для присоединения к ним внешних токоведущих частей (шин) и внутренних.

2. **Подвижные** – контактные соединения, в которых должно быть обеспечено отделение одной контактной поверхности от другой. Размыкающиеся и замыкающиеся контактные соединения служат для периодического замыкания и размыкания электрических цепей, используются в выключателях, реле, контакторах и т. д.

Подвижные контактные соединения отличаются по отключаемой мощности, току и напряжению.

3. **Скользящие** – контактные соединения, в которых одна контактная поверхность перемещается по другой без нарушения между ними электрического контакта.

Применяются в электрических машинах и аппаратах.

Нажатие на подвижные и скользящие контакты главным образом осуществляется при помощи пружин.

4. **Жидкометаллические контакты (ЖМК)** – контакты, в которых переход электрического тока из одного электрода в другой осуществляется через слой электропроводящего жидкого металла.

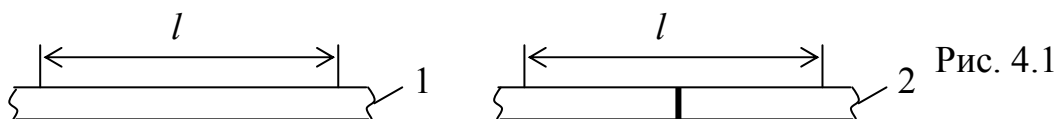
Ко всем контактным системам предъявляются следующие требования:

- 1) надёжность электрического контактирования;
- 2) достаточная механическая прочность;
- 3) перегрев не свыше допустимого значения при длительном режиме;
- 4) термической и электродинамической стойкости при протекании токов короткого замыкания;
- 5) наличие электропроводности и теплопроводности.

По форме контактирования различают три типа контактов:

- 1) точечный – контактирование только в одной площадке-точке (сфера-сфера, сфера-плоскость, конус-плоскость и т. д.);
- 2) линейный – условное контактирование происходит по линии (цилиндр-цилиндр, цилиндр-плоскость и т. д.), физическая картина – минимум две площадки контактирования;
- 3) плоскостной – условное контактирование происходит по плоскости, физическая картина – минимум три площадки контактирования.

4.2. Сопротивление контактов



Имеем проводник (1) длиной l (рис. 4.1). Известно его сопротивление R_1 . Разрежем проводник и соединим его половины. Сопротивление такого проводника будет $R_2 = R_1 + R_K$ (R_K – сопротивление контакта), хотя l и S одинаковы $R_2 > R_1$. Появление сопротивления R_K связано с 2-мя обстоятельствами.

Первое заключается в том, что при сжатии 2-х проводников, обращенных друг к другу плоскими гранями (рис. 4.2), касание будет происходить не по всей плоскости, а отдельными площадками в соответствии с микрогеометрией сдавливаемых граней. При этом картина протекания тока резко изменится: ток идёт уже не через всё сечение, а лишь через его часть, и по сравнению со

сплошным проводником будет использовано не всё поперечное сечение, т. е. сопротивление возрастёт.

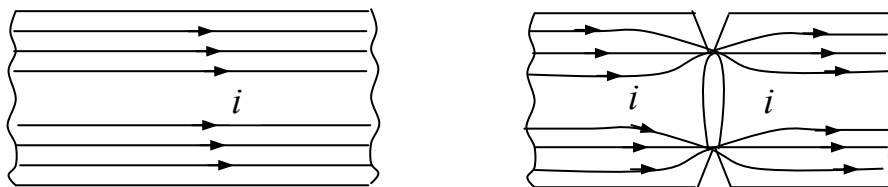


Рис. 4.2

Величина этого сопротивления, появляющегося в результате стягивания линий тока к точкам соприкосновения, называется *сопротивлением стягивания* R_C или *переходное сопротивление контактов* $R_{пер}$.

Второе обстоятельство является следствием загрязнения или окисления поверхностей, т. е. вводится дополнительное сопротивление различных пленок, образующихся на поверхности контактирующих тел $R_{пл}$. Таким образом, сопротивление контакта может быть представлено

$$R_K = R_C + R_{пл} . \quad (4.1)$$

Сопротивление пленок может меняться в процессе эксплуатации в широких пределах и определяется

$$R_{пл} = \rho \frac{\Delta}{S} . \quad (4.2)$$

где Δ – толщина пленки;

S – поверхность соприкосновения по пленкам;

ρ – коэффициент удельного сопротивления материала, из которого образованы пленки, например, для Cu_2O – $\rho = 10^8$ (Ом·м), для N_iO – $\rho = 10^6$ (Ом·м).

На контактных поверхностях, при отсутствии специальных средств защиты, между контактными точками образуются поры. В них могут проникать присутствующие в окружающей среде влага и другие химические активные вещества и, взаимодействуя с материалом контактов, они дают на поверхности контакта слой твердого химического соединения – пленку. Они обладают большим удельным сопротивлением, чем сам металл контактов, и ведут к увеличению переходного сопротивления контактов, к их коррозии. Влияние процесса окисления на сопротивление контактов (опытные данные) от времени t представлено в табл. 4.1

Таблица 4.1

Материал	$R_K(t=0)$	R_K после	t , час	Температура
Медь	$1,1 \cdot 10^{-4}$ Ом	$180 \cdot 10^{-4}$ Ом	2	$\theta = 35^\circ\text{C}$
Олово	$1,56 \cdot 10^{-4}$ Ом	$110 \cdot 10^{-4}$ Ом	12	
Серебро	$0,5 \cdot 10^{-4}$ Ом	$11 \cdot 10^{-4}$ Ом	100	
Медь	$1,1 \cdot 10^{-4}$ Ом	$1000 \cdot 10^{-4}$ Ом	15	$\theta = 70^\circ\text{C}$
Алюминий	$46 \cdot 10^{-4}$ Ом	$1060 \cdot 10^{-4}$ Ом	15	
Латунь	$6,7 \cdot 10^{-4}$ Ом	$38 \cdot 10^{-4}$ Ом	15	

Процессы окисления вызывают увеличение контактного сопротивления в десятки и сотни раз. Интенсивность окисления сильно зависит от материала контактов и от окружающей температуры. Например, процессу окисления сильно подвержены медные контакты, менее всего – серебряные.

4.3. Переходное сопротивление контактов. Сопротивление стягивания

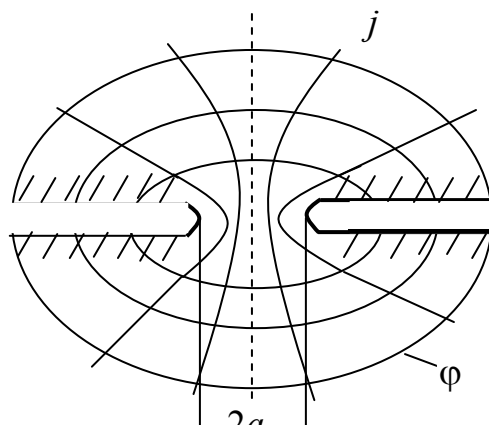


Рис. 4.3

Пусть площадка соприкосновения представит круг радиуса a (рис. 4.3). На этом же рисунке изображены линии плотности тока (j) и эллиптические линии равного потенциала (ϕ). Для расчета воспользуемся картиной эквивалентного сферического электрического поля (рис. 4.4).

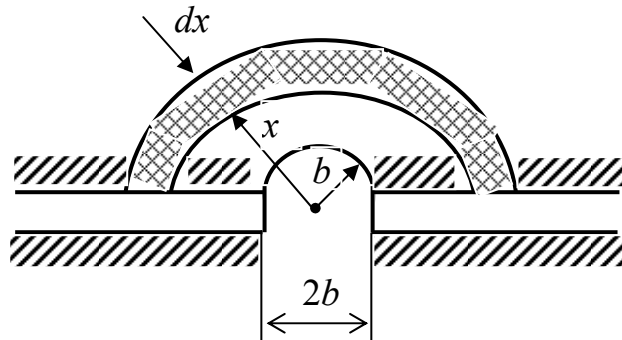


Рис. 4.4

Положим, что контакт происходит по шаровой поверхности радиусом b . Выделим элементарный слой толщиной dx на расстоянии x от центра контакта. Тогда условие эквивалентности будет следующим:

$$b = \frac{2}{\pi} a. \quad (4.3)$$

Электрическое сопротивление элементарного слоя dx

$$dR_x = \rho \frac{dx}{2\pi x^2}, \quad (4.4)$$

где ρ – удельное электросопротивление материала контакта;

$2\pi x^2$ – площадь поверхности полусферы.

Сопротивление стягивания контакта в верхней части

$$\frac{R_c}{2} = \int_b^{\infty} dR_x = \int_b^{\infty} \rho \frac{dx}{2\pi x^2} = \frac{\rho}{2\pi} \int_b^{\infty} \frac{dx}{x^2} = \frac{\rho}{2\pi} \left(-\frac{1}{x} \right) \Big|_b^{\infty} = \frac{\rho}{2\pi b}. \quad (4.5)$$

Сопротивление стягивания контакта (верхней и нижней части) с учетом эллиптической картины поля:

$$R_c = \frac{\rho}{\pi} \frac{1}{b} = \frac{\rho}{\pi} \frac{\pi}{2a} = \frac{\rho}{2a}. \quad (4.6)$$

Площадь контактной площадки (круг радиуса a)

$$S = \pi a^2 = \frac{P}{\sigma}, \quad (4.7)$$

где P – усилие нажатия на контакты;

σ – коэффициент сопротивления материала смятию.

Радиус контактной площадки:

$$a = \sqrt{\frac{P}{\pi\sigma}}. \quad (4.8)$$

Тогда сопротивление стягивание контакта

$$R_c = \frac{\rho}{2} \sqrt{\frac{\pi\sigma}{P}}. \quad (4.9)$$

Если имеется n площадок касания, то сопротивление стягивания

$$R_c = \frac{\rho}{2an}.$$

(4.10)

При этом усилие нажатия на одну площадку будет в n раз меньше

$$P_{nl} = \frac{P}{n}. \quad (4.11)$$

Сопротивление стягивания многоточечного контакта

$$R_{c_n} = \frac{\rho}{2n} \sqrt{\frac{\pi\sigma n}{P}} = \frac{\rho}{2} \sqrt{\frac{\pi\sigma}{Pn}}. \quad (4.12)$$

Примерами многоточечного контакта являются роликовые и щеточные контакты. Использование многоточечного контакта равносильно увеличению контактного нажатия.

Для определения сопротивления стягивания контактов часто применяют эмпирическую формулу

$$R_c = \frac{K}{0,102P^m}, \quad (4.13)$$

где K – коэффициент, зависящий от материала контакта и состояния контактной поверхности ($\text{Ом} \cdot \text{Н}^m$);

m – коэффициент, зависящий от формы контактов, от числа точек соприкосновения;

0,102 – коэффициент перевода Ньютон в килограмм.

Значения K и m получены опытным путем и приведены в справочной литературе для разных контактных пар и форм поверхностей, например:

одноточечный контакт (шар-плоскость) – $m = 0,5$;

двухточечный контакт (цилиндр-плоскость) – $m = 0,7$;

трехточечный контакт (плоскость-плоскость) – $m = 1$.

Таким образом, сопротивление стягивания (переходное сопротивление) является функцией материала, силы нажатия, состояния и формы контактных поверхностей. Поэтому изменение переходного сопротивления контакта происходит в основном по нелинейному закону.

4.4. Параметры контактной системы.

Влияние физических факторов на сопротивление контактов

4.4.1. Параметры контактной системы

1. Раствор контактов – кратчайшее расстояние между разомкнутыми контактными поверхностями подвижной и неподвижной контакт-деталей.

2. Провал контактной системы – продвижение подвижного контакта после соприкосновения контактных поверхностей (Δl).

3. Контактное нажатие – сила, сжимающая контакты. Различаются начальное P_n и конечное P_k нажатия, где $P_k = P_n + c\Delta l$ (c – жесткость контактной пружины).

4.4.2. Контактное нажатие

С увеличением контактного нажатия переходное сопротивление снижается. Это объясняется тем, что по мере роста нажатия на контакты увеличивается действительная площадь их соприкосновения вследствие деформации неровностей на соприкасающихся поверхностях. При дальнейшем увеличении нажатия материал контактов деформируется в меньшей степени, и уменьшение переходного сопротивления замедляется (кривая 1 рис. 4.5).

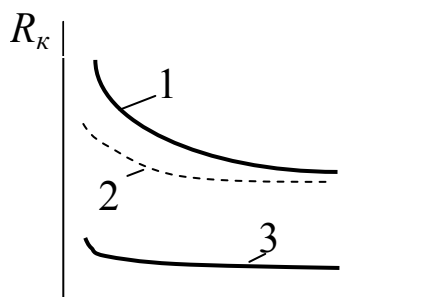


Рис. 4.5

Характер изменения переходного сопротивления при уменьшении контактного нажатия иной (кривая 2). Это обусловлено наличием остаточной деформации микронеровностей на контактирующих поверхностях. Это справедливо для твердометаллических контактов.

Для ЖМК сопротивление контактов практически не зависит от нажатия (кривая 3) и оно в несколько раз ниже, чем для твердометаллических контактов. Это объясняется тем, что в ЖМК действительная контактная поверхность равна кажущейся, т. е. микронеровности контактной поверхности не влияют на величину контактного сопротивления.

4.4.3. Контактная поверхность

С увеличением площади контактной поверхности увеличивается число точек соприкосновения n в выражении (4.10).

Однако для твердометаллических контактов влияние контактной поверхности на переходное контактное сопротивление невелико (кривая 1, рис. 4.6) вследствие того, что переходное сопротивление зависит не от удельного, а от полного нажатия на контакты, поскольку контактирование происходит не по кажущейся площади контакта, а в контактной точке (действительной площади).

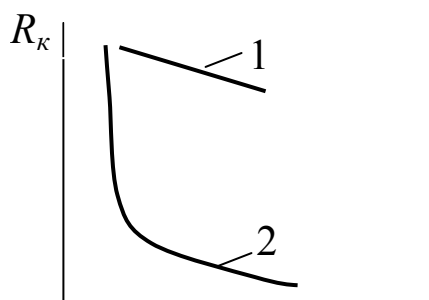


Рис. 4.6

Однако с величиной контактной поверхности приходится считаться в силу того, что при протекании тока через контакт происходит нагрев материала контакта. Поэтому при больших токах электрические потери могут быть значительными и для отвода тепла от контакта необходима достаточная величина поверхности контактного соединения.

Сопротивление ЖМК существенно уменьшается с увеличением площади их соприкосновения (кривая 2), вследствие указанной выше причины.

4.4.4. Температура контактной поверхности

С увеличением температуры нагрева твердометаллического контакта его переходное сопротивление возрастает вследствие повышения удельного электросопротивления контактного материала (участок а-б, кривая 1, рис. 4.7) согласно выражению

$$R_{\kappa_{\Gamma}} = R_{\kappa_0} \left(1 + \frac{2}{3} \alpha \theta \right)$$

(4.14)

где R_{κ_0} – электрическое сопротивление контакта в холодном состоянии;

α – температурный коэффициент материала контакта.

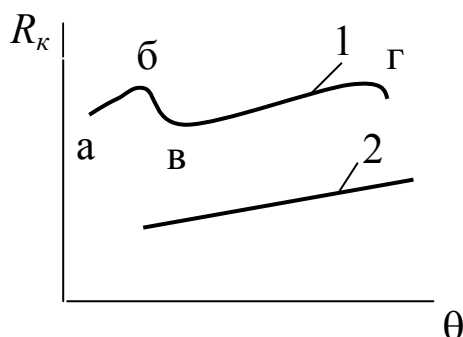


Рис. 4.7

Но с возрастанием температуры увеличивается поверхность соприкосновения, так как увеличивается деформация микронеровностей на контактирующих поверхностях вследствие снижения механической прочности

контактного материала, и сопротивление контакта уменьшается (участок б-в кривая 1). Последующее резкое снижение переходного сопротивления (в точке г) после некоторого его возрастания происходит при достижении температуры плавления контактного материала.

Сопротивление ЖМК монотонно возрастает с повышением температуры (прямая 2), вследствие увеличения удельного сопротивления жидкого металла.

При переходе тока через контактную поверхность происходит выделение тепла. Из-за наличия переходного сопротивления температура контактной поверхности превышает температуру контакт-детали. Превышение температуры контактной площадки над температурой контакт-детали будет соответствовать

$$\Delta\tau_{\max} = \frac{I^2 \rho \pi \sigma}{32 \lambda P}, \quad (4.15)$$

где λ – теплопроводность материала контакта, Вт/м·°С;

ρ – удельное сопротивление контактного материала, Ом·м;

P – сила контактного нажатия, Н;

σ – временное сопротивление сжатию.

Если принять, что $R_k = \rho / 2a$, где a – радиус контактной площадки, который определяется из условия $P / \sigma = \pi a^2$, то получим

$$\Delta\tau_{\max} = \frac{U_{\text{пер}}^2}{8 \lambda \rho},$$

где $U_{\text{пер}}$ – падение напряжения в переходном сопротивлении контакта.

Наряду с выделением джоулевой теплоты, в контактах при протекании тока могут проявляться три вида термоэлектрических эффектов, обусловленных взаимосвязью между электрическими и тепловыми явлениями в контакте.

Эффект Томпсона заключается в переносе теплоты с одного контакта на другой электрическими зарядами, в результате чего один из контактов нагревается сильнее.

Эффект Пельтье возникает при протекании тока через место контактирования проводников из 2-х разнородных металлов. Он объясняется наличием контактной разности потенциалов. Если электрическое поле, создаваемое контактной разностью потенциалов, ускоряет электроны, то в спаяе выделяется теплота Пельтье; если поле задерживает движение электронов, то теплота поглощается.

Эффект Колера является результатом туннельного сопротивления, присущего пленкам на поверхности соприкасающихся контактов. Кинетическая энергия прошедших через пленку туннельных электронов увеличивается, когда они достигают анода, имеющего меньший отрицательный потенциал, чем катод. Избыток энергии преобразуется в виде теплоты. В результате анодная сторона на пленке нагревается сильнее.

Все три эффекта имеют место независимо от выделения теплоты Джоуля в контакте. Существенное влияние они могут приобретать лишь в контактах при протекании весьма малых токов.

4.4.5. Состояние контактных поверхностей

Выше отмечалось, что на величину контактного сопротивления существенно влияют окисные пленки и загрязнения на поверхности контактов. Это особенно влияет на контакты, работающие в химически агрессивных средах, в условиях повышенной температуры, влажности, запыленности. Кроме некоторых благородных металлов (золота, платины), почти все металлы взаимодействуют с окружающей средой, образуя различные пленки.

Следует отметить, что окиси серебра имеют низкое электрическое сопротивление сравнимое с сопротивлением чистого серебра. Поэтому, учитывая относительно низкую стоимость серебра, серебряные контакты получили наибольшее применение в электрических аппаратах.

Коррозия контактных поверхностей может привести к временному или полному нарушению проводимости контакта.

Сильное окисление меди начинается уже при 70°C , а при 100°C сопротивление медных контактов может возрасти в несколько десятков раз. Необходимо защищать контакты от коррозии. Это осуществляется применением антикоррозийных покрытий из металла, лака или смазки. Для защиты контактов от коррозии применяется нажатие большой силы на контактные поверхности (происходит механическое разрушение окисных пленок).

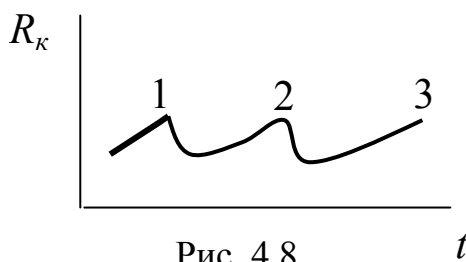
В коммутирующих подвижных контактах происходит эффект самоочищения контактных поверхностей от окисных пленок вследствие их разрушения при трении и взаимном перемещении контактов относительно друг друга.

Шлифовка контактных поверхностей увеличивает переходное сопротивление по сравнению с обработкой напильником, так как при шлифовке

бугорки, микронеровности на поверхности контакта становятся более пологими, и смятие их затрудняется.

4.4.6. Время эксплуатации

Электрическое сопротивление контакта не остается постоянным во времени, так как толщина окисных пленок на поверхности контакта с течением времени увеличивается. Однако при этом увеличивается падение напряжения на контактном переходе, градиент электрического поля в пленке и температура контакта (участок 1, рис. 4.8).



Совместное действие высокой температуры нагрева и электрического поля приводит к электрическому пробое (фритингу) и разрушению окисной пленки. Контактное сопротивление падает, но в последствии процесс повторяется (участок 2, 3).

4.5. Особенности работы подвижных контактных соединений

4.5.1. Режимы работы контактов

В работе подвижных контактов аппаратов различают три режима: замкнутое состояние, размыкание контактов, замыкание контактов.

1. Замкнутое состояние.

Процессы, происходящие в замкнутом состоянии контактных соединений, аналогичны процессам, происходящим в неподвижных контактах.

Это наиболее благоприятный момент работы для подвижных контактов.

2. Процесс размыкания цепи.

Это наиболее тяжелый момент работы подвижных контактов. Процесс размыкания имеет несколько фаз.

а) Начальная фаза – от $t = 0$ до $t = T_1$, контакты еще не разошлись, но изменяется либо площадь, либо усилие на контактах, что приводит к изменению переходного сопротивления $R_{пер}$. При $t = T_1$ $R_{пер}$ резко возрастает, вызывая усиленный нагрев контакта, который может быть достаточен для расплавления материала контакта.

б) Фаза при $t \geq T_1$ соответствует началу расхождения контактов. При этом первое время между контактами будет существовать жидкий мостик из расплавленного металла, который, при дальнейшем расхождении контакта прерывается, унося часть металла с анода.

в) При этой фазе расхождения контактов происходит резкое увеличение падения напряжения на контактах, которое может привести к возникновению газового разряда (дуги). Например: для Cu : $\Delta U = 12$ В, $I = 0,42$ А;
для Al : $\Delta U = 14$ В, $I = 0,5$ А.

3. Процесс замыкание цепи.

При уменьшении расстояния между контактами до 10^{-5} см резко увеличивается градиент напряжения $E = \frac{du}{dx}$. Под влиянием этого электрического поля E возникает автоэлектронная эмиссия электронов с поверхности катода, являющаяся причиной появления искры. Так как в следующий момент времени контакты замыкаются, то искра не успевает обычно превратиться в дугу. Однако дуга может возникнуть при замыкании контактов в случае наличия вибрации их.

Таким образом, возникновение электрических разрядов при замыкании и размыкании подвижных контактов приводит к разрушению их вследствие *электрического износа*.

4.5.2. Электрический износ контактов

Электрический износ или эрозия – это явления физического характера (плавление, испарение, распыление металла), происходящие на рабочих поверхностях. Сопровождаются переносом металла с одного контакта на другой.

При малых токах разрушение контакта вызывается плавлением контактных точек и вытягиванием жидких мостиков металла. Следствием этого является перенос металла контакта с анода на катод и образование иглы на поверхности катода и углубления (кратера) на поверхности анода, что приводит к значительному изменению формы контакта.

При горячей дуге интенсивная ионизация молекул газа вызывает бомбардировку и разрушение катода ионами газа. В этом случае наблюдается перенос металла с катода на анод. Вследствие термического действия дуги происходит испарение, разбрызгивание материала контактов. Разрушение происходит как у анода, так и у катода. Износ контактов тем больше, чем больше ток, протекающий через контакты.

Более твердые контактные материалы дают меньший износ, чем мягкие.

При дуговом разряде имеет место перенос металла с катода на анод, при искровом разряде – наоборот.

Следует отметить, что благородные металлы хорошо сопротивляются коррозии и сильнее подвержены действию эрозии.

Уменьшение эрозии контактов достигается:

- 1) за счет быстрого перемещения дуги из зоны горения и гашение ее (меньше расплавлено металла);
- 2) применением эрозионно стойких материалов из металлокерамики (медь – графит и др);
- 3) при малых токах применением шунтирования контакта емкостью (часть энергии разряда уходит на заряд конденсатора).

4.5.3. Механический износ контактов

Силы сжатия при ударе контактов, скольжение их друг о друга и контактное нажатие вызывают расплющивание, растрескивание, истирание материала контактов, т. е. их механическое разрушение. Чем больше число замыканий в единицу времени, тем больше износ. Чем выше сила нажатия, тем выше износ. Практически механический износ очень мал и составляет 1-3% от электрического износа.

В процессе работы подвижные контакты подвержены коррозии больше, чем неподвижные. Это вызывается большей возможностью для проникновения коррозии к контактным поверхностям при разомкнутых контактах. Кроме того из-за повышенной температуры, вызванной увеличением переходного сопротивления в момент размыкания, окисление контактов проходит более интенсивно.

Однако следует иметь ввиду, что у подвижных контактов замыкание и размыкание сопровождаются ударами и скольжением контактных поверхностей друг об друга, это приводит к разрушению и удалению окисного слоя (самоочищению), следовательно, $R_{неp}$ уменьшается.

У неподвижных же контактов процесс самоочищения отсутствует.

4.5.4. Вибрация и сваривание контактов

Вибрация контактов – отскакивание подвижных контактов – связана с механическими и электродинамическими силами в контактных соединениях. Подвижный контакт «а» (рис. 4.9) имеет массу m подходит к неподвижному контакту «б», находящемуся под действием пружины П со скоростью v и обладает кинетической энергией.

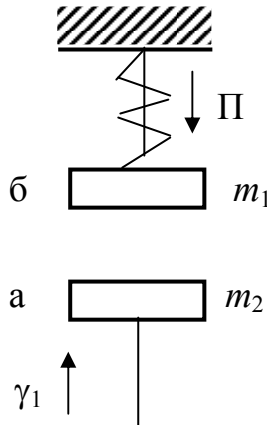


Рис. 4.9

При ударе контакт «б» отскакивает, сжимая пружину П, контакт «а» движется по инерции дальше. Через некоторое время контакты вновь соударяются и опять отскакивают, но уже на меньшее расстояние, так как пружина П оказывает уже больше противодействие и т. д. до тех пор пока отскоки не прекратятся.

Явление вибрации контактов проиллюстрировано на рис. 4.10.

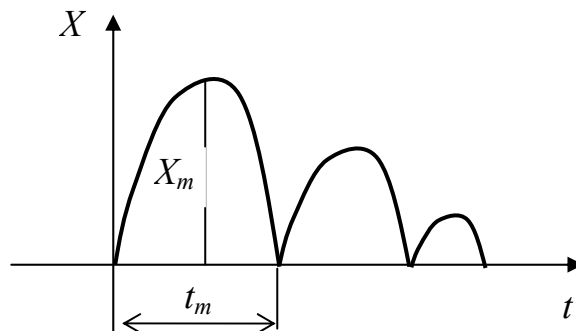


Рис. 4.10

X – расстояние между контактами;

t – время;

X_m – максимальный отскок во время первого отброса.

Кроме того, явление отталкивания контактов может быть вызвано также электродинамическими силами, вследствие искривления линий тока в точках соприкосновения контактов.

И если $F_{np} < F_{эду}$, то контакты будут отброшены (F_{np} – сила нажатия пружин).

Для грубой оценки времени отброса контактов при вибрации можно воспользоваться соотношением

$$t_m = \frac{mv}{F_{np}}, \quad (4.16)$$

где m – масса подвижного контакта;

v – скорость подвижного контакта к моменту удара;

F_{np} – сила предварительного натяжения контактной пружины.

Суммарное время вибрации контактов обычно в 1,5–1,8 раза больше продолжительности первого отскока контакта t_m .

Отношение m/F_{np} желательно иметь меньше порядка 10^{-3} кг/м. Тогда общее время вибрации контактов в реальных конструкциях контакторов определяется десятными долями миллисекунды.

В результате вибрации контактов происходит обгорание их. При определенных условиях вибрации может произойти сваривание контактов. При соответствующем подборе параметров системы (массы, пружины, скорости замыкания) можно существенно снизить вибрации. Вибрация может быть устранена применением различных успокоителей (воздушных, масляных и т. д.). Однако успокоители замедляют замыкание контактной системы. Чем больше нажатие на контакт, тем меньше вибрации.

Сваривание контактов происходит в результате высокого нагрева и плавления контактных точек. К свариванию может привести наличие вибрации, эрозии, больших токов короткого замыкания. Возникающая в результате вибраций электрическая дуга расплавляет поверхности контактов и при последующем соударении расплавленные поверхности, приходя в соприкосновение, сцепляются, металл застывает, так как уже дуги нет, и контакты оказываются сваренными.

Контакты могут свариться и в замкнутом состоянии, если через них протекает ток короткого замыкания, который вызывает значительное выделение тепла в переходном сопротивлении.

Сваривания можно избежать, уменьшая вибрации: увеличивая силу нажатия; уменьшая переходное сопротивление; применяя жидкометаллические контакты.

4.6. Материалы для контактных соединений

Контактные материалы должны:

- обладать высокой электрической проводимостью;
- быть устойчивыми против коррозии;
- иметь высокую дугостойкость;
- быть механически прочными;
- иметь невысокую стоимость.

Найти материал, который бы удовлетворял всем этим требованиям невозможно. Материал, обладающий высокой электропроводностью, имеет низкую электроэрозийную стойкость. Поэтому в сильноточных электрических аппаратах, например, применяют две системы контактов: основные контакты, которые проводят электрический ток, и дугогасительные контакты, которые предназначены для защиты основных контактов от воздействия электрической дуги. В качестве основных контактных материалов используются металлы: медь, серебро, золото, платина, олово, алюминий, латунь, бронза.

Дугостойкие материалы

Контактные материалы медь и серебро быстро изнашиваются при отключении цепей. Они применяются в электрической цепи с током до 80 А. В качестве износоустойчивых широко применяются металлокерамические материалы, представляющие композицию из 2-х материалов с высокой электропроводностью и тугоплавким материалом. Тугоплавкий компонент создает подобие решетки, поры которой заполнены материалом с высокой электропроводностью.

Композиционные контактные материалы изготавливаются методами порошковой металлургии. Смесь компонентов в соответствующей пропорции спекают под давлением в специальных формах.

Серебро – окись кадмия (85 % Ag), серебро-вольфрам (50 % на 50 %); серебро – никель (60% Ag, 40 % Ni); серебро – графит (3 % C), медь – вольфрам (80 % Cu); серебро – окись меди (90 % Ag); медь – графит (3 % C).

4.7. Основные контактные системы

Рассмотрим варианты наиболее трудоемких в работе контактных систем.

1. Размыкаемые контактные системы.

Применяются следующие контактные системы: пальцевые, врубные, розеточные, втычные, роликовые, стыковые, мостиковые контакты.

При малых токах используются одноступенчатые контактирования. В этом случае контакты служат для обеспечения длительного протекания тока. Следовательно, контакты должны удовлетворять требованию хорошей электропроводности. При размыкании контактов возникает электрическая дуга. В этом случае накладываются требования дугостойкости материала контактов. При больших токах применяются многоступенчатые контактные системы. Здесь два требования к контактным материалам разделяются. Главные контакты выполняют условие длительности проводимости тока, а дугогасительные выполняют работу в режимах включения и отключения.

2. Жидкометаллические контакты.

Известно, что запасы цветных металлов быстро истощаются. Это требует интенсивных поисков контактных материалов, которые смогли бы заменить благородные металлы.

В ряде случаев наиболее предпочтительными для применения в электрических аппаратах являются ЖМК. Основными достоинствами ЖМК являются малое переходное сопротивление, отсутствие необходимости в контактной нажатии, отсутствие отбрасывающих электродинамических сил, отсутствие дребезга, сваривания, вибрации при замыкании контактов, высокая механическая износостойкость.

ЖМК обладают и рядом недостатков, к которым следует отнести высокую температуру плавления жидких металлов и относительно высокую их стоимость, необходимость герметизации контактного узла, зависимость работоспособности аппарата от положения в пространстве, токсичность ряда материалов.

В настоящее время признаны перспективными разработки, направленные на создание композиционных ЖМК (КЖМК). КЖМК состоит из твердого каркаса либо прокладки пропитанной или смоченной жидким металлом. Такой контакт обладает вибростойкостью, и его работа не зависит от положения в пространстве. КЖМК присущи достоинства как твердометаллического, так и ЖМК при минимуме их недостатков.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что называется электрическим контактом? Назовите виды электрических контактов.
2. Что относится к важнейшим характеристикам и параметрам контактных систем аппаратов?
3. Как зависит сопротивление контактов от контактного нажатия и температуры?
4. Чем обусловлен коммутационный износ контактов при отключении цепи?
5. Чем обусловлен коммутационный износ контактов при включении цепи?
6. Какие требования предъявляются к контактным материалам ?

РАЗДЕЛ 5. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ДУГА

5.1. Коммутация электрических цепей

Коммутация электрических цепей осуществляется электрическими и электронными аппаратами.

Основным коммутационным органом аппаратов является контактная система, которая осуществляет дискретную коммутацию электрических цепей.

В электронных (бесконтактных) аппаратах используется усилительный режим, т.е. плавный переход к новому сопротивлению.

Основным органом коммутации является полупроводниковый прибор.

Характеристикой коммутационной возможности аппарата считается *глубина коммутации*. Это отношение сопротивления $R_{откл}$ коммутирующего органа в отключённом состоянии к сопротивлению $R_{вкл}$ во включённом состоянии

$$h_k = \frac{R_{откл.}}{R_{вкл}}$$

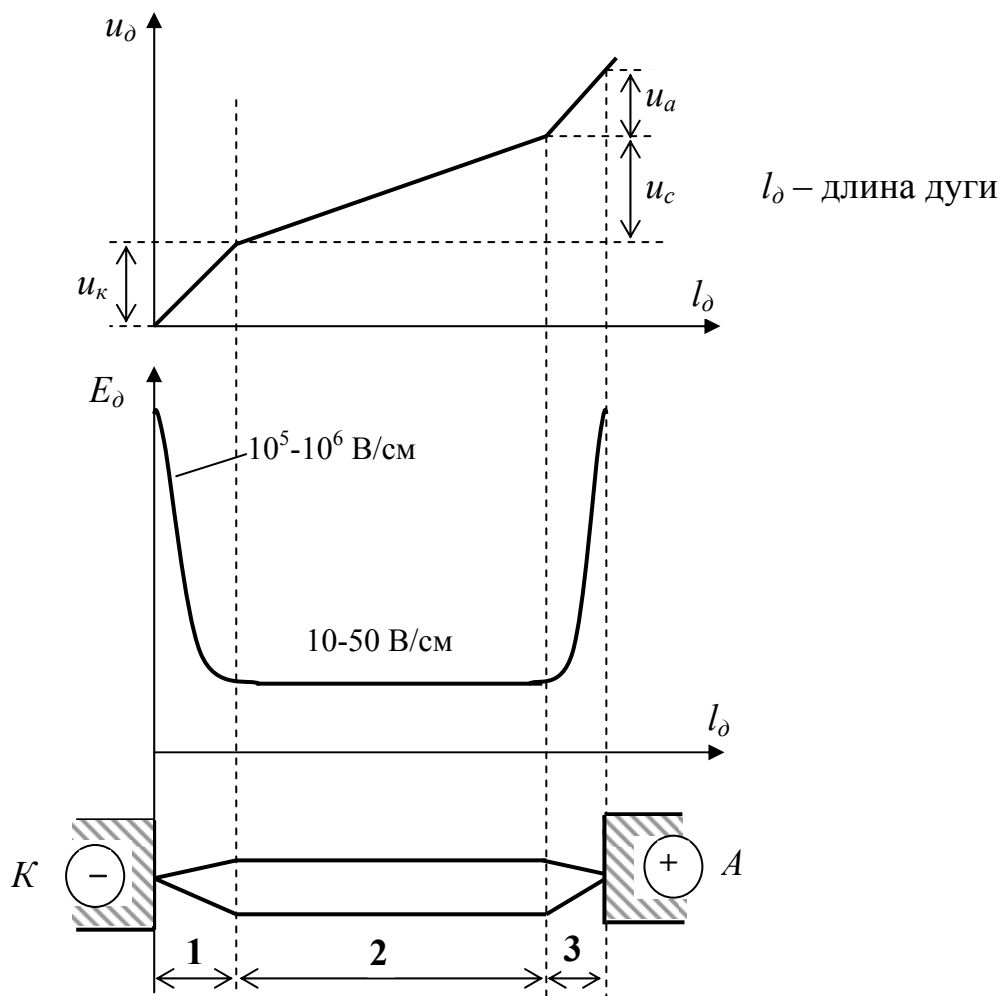
Для контактных аппаратов $h_k = 10^6 - 10^{14}$.

Для электронных (бесконтактных) $h_k = 10^4 - 10^7$.

5.2. Вольт-амперные характеристики дуги

5.2.1. Напряжение на дуговом промежутке

Падение напряжения на стационарной дуге распределяется неравномерно вдоль дуги. Изменение падения напряжения (u_∂) и продольного градиента напряжения (E_∂) вдоль дуги представлено на (рис. 5.1).



- 1 – область катодного падения напряжения (u_κ);
- 2 – ствол дуги, u_c – падение напряжения на стволе дуги;
- 3 – область анодного падения напряжения (u_a).

$$u_\partial = u_\kappa + u_a + u_c; \quad u_c = E_\partial l_\partial; \quad u_a = u_a + u_\kappa.$$

Под градиентом напряжения E_∂ понимают падение напряжения на единицу длины дуги.

Как видно из графиков, ход характеристик u_∂ и E_∂ в приэлектродных областях резко отличается от хода характеристик на остальной части дуги.

У электродов на промежутке длины порядка 10^{-4} см имеет место резкое возрастание падения напряжения. Величина этого падения зависит от материала электродов и окружающего газа и составляет 15-30 В.

Околоэлектродные u_k и u_a не зависят от длины дуги, а u_c – пропорционально длине дуги.

Градиент напряжения в приэлектродной области достигает 10^5 - 10^6 В/см.

$$u_d = u_c + E_d l_d ,$$

где E_d – градиент напряжения на створе дуги.

Анод не излучает положительные ионы. Ионы, возникающие в столбе дуги, движутся к катоду. Непосредственно у анода образуется преобладание отрицательных зарядов, и создается условие для анодного скачка напряжения (u_a).

В области ствола дуги градиент приблизительно постоянен вдоль столба дуги и достигает порядка 10-200 В/см.

Меньшая цифра относится к открытым дугам в воздухе, а большая – к дугам, находящимся в потоке газов или паров жидкости, когда отбор тепла от дугового столба делается особо интенсивным.

5.2.2. Вольт-амперные характеристики дуги

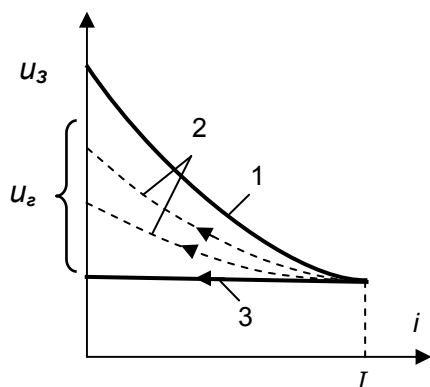


Рис. 5.2

Кривая 1 (рис. 5.2) получена при условии наступления теплового равновесия и называется *статической характеристикой дуги*.

Кривые 2 получены при разных скоростях изменения тока. В этом случае не наступает теплового равновесия. Падение напряжения будет лежать ниже значения кривой 1.

Вольт-амперные характеристики, полученные при быстром изменении тока, носят название *динамических*.

На рис. 5.2 значение u_3 соответствует напряжению начала дугового разряда, u_2 соответствует напряжению гашения дуги. Эти значения характеризуют изоляционные свойства промежутка, которые необходимы, чтобы возбудить электрическую дугу. Напряжение u_d на створе дуги характеризует дуговой промежуток как проводник.

5.3. Гашение электрической дуги постоянного тока

Электрическая дуга постоянного тока может быть погашена только в том случае, когда процесс деионизации дугового промежутка протекает с большей скоростью, чем процесс ионизации. Для цепи (рис. 5.3) содержащей активное сопротивление R , индуктивность L и дуговой промежуток с падением напряжения u_{δ} , и к которой приложено напряжение u источника тока, будет справедливо равенство

$$u = u_{\delta} + iR + L \frac{di}{dt}. \quad (5.1)$$

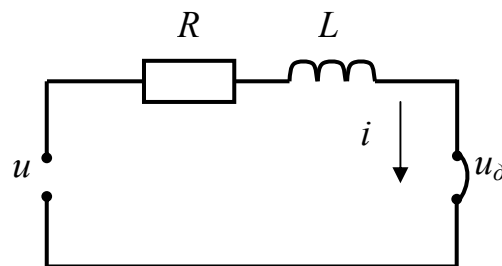


Рис. 5.3

Типичная осциллограмма гашения дуги постоянного тока представлена на рис. 5.4

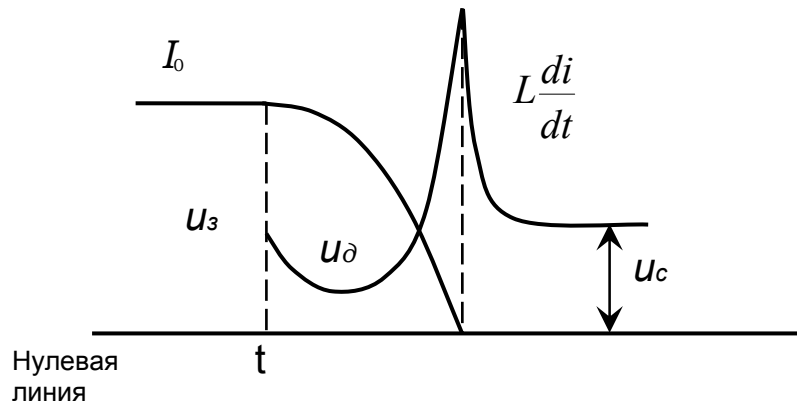


Рис. 5.4

Условия устойчивого и неустойчивого горения дуги следующие: переписываем уравнение (5.1)

$$0 > L \frac{di}{dt} = u - iR - u_{\delta} < 0. \quad (5.2)$$

При устойчиво горящей дуге $\frac{di}{dt} = 0$

$$u = u_{\delta} + iR. \quad (5.3)$$

Для погашения дуги необходимо, чтобы ток в дуге уменьшался, т. е. $\frac{di}{dt} < 0$ следует из (5.2)

$$u_{\delta} > u - iR. \quad (5.4)$$

Рассмотрим графическое решение этого уравнения (рис. 5.5). Снижение тока в дуге происходит вследствие уменьшения числа ионизованных частиц, которое в свою очередь ведет к росту сопротивления дуги.

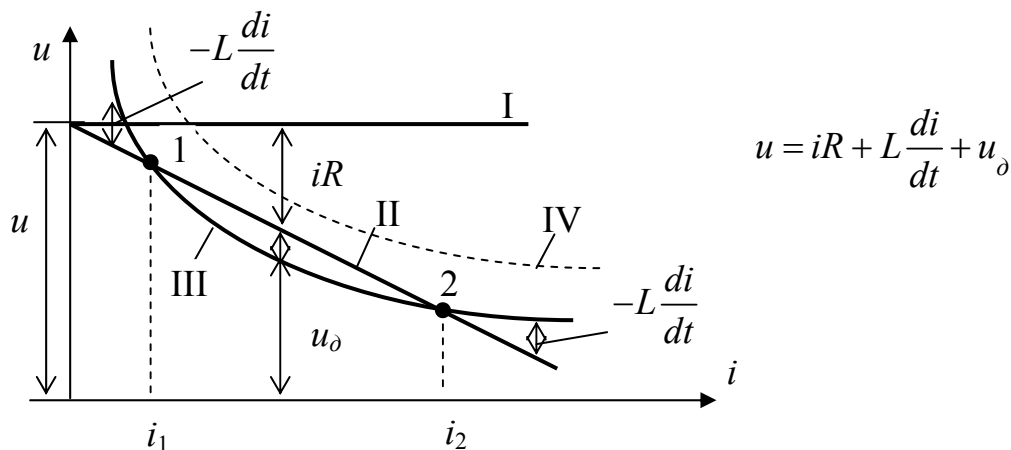


Рис. 5.5

Прямая I представляет напряжение источника u .

Прямая II — падение напряжения на омическом сопротивлении R .

Кривая III — вольт-амперная характеристика дуги u_{δ} .

Заключенные между кривыми отрезки представляют собой:

iR — между кривыми I и II; $L \frac{di}{dt}$ — между кривыми II и III;

$u - iR$ — между кривыми II и осью абсцисс; u_{δ} — между кривыми III и осью абсцисс.

Из рис. 5.5 видно, что в точках 1 и 2 выполняется условие устойчиво горящей дуги, т. е. $L \frac{di}{dt} = 0$. Однако в точке 1 это равновесие неустойчивое, так

как при точках $i < i_1$ — $u_{\delta} > u - iR$, а $L \frac{di}{dt}$ имеет отрицательное значение, и

если ток станет по какой-либо причине меньше i_1 , то он упадет до 0 и дуга погаснет. Если по какой-либо причине ток станет больше i_1 , то $u_{\delta} < u - iR$;

$L \frac{di}{dt} > 0$, т. е. в цепи как бы окажется избыточное напряжение, ток возрастет до

значения i_2 и дуга в этой точке будет гореть устойчиво, так как в точке 2.

$$L \frac{di}{dt} = 0.$$

При токах $i > i_2$ опять $u_0 > u - iR$, а $L \frac{di}{dt} < 0$; для поддержания тока такой величины напряжения u недостаточно и ток будет падать до i_2 , а дуга в этой точке будет гореть устойчиво. Т. е. между точками 1 и 2 величина $L \frac{di}{dt} > 0$, ток будет расти и в цепи накапливается электромагнитная энергия. При $i < i_1$, и $i > i_2$ $L \frac{di}{dt} < 0$, ток в цепи падает в первом случае до нуля, во втором случае – до тока i_2 .

Для гашения дуги необходимо, чтобы при любом значении тока соблюдалось условие $u_0 > u - iR$, следовательно, вольт-амперная характеристика дуги должна на всем протяжении лежать выше характеристики $u - iR$ (прямой 2) и не иметь с этой характеристикой ни одной точки соприкосновения. Здесь под вольт-амперной характеристикой понимается динамическая характеристика (кривая IV).

Подъем характеристики дуги до кривой IV осуществляется обычно удлинением дуги. При удлинении создается усиленная деионизация и как результат – большое падение напряжения.

Удлинение достигается раздвижением контактов или выдуванием дуги вследствие движения нагретого дугой воздуха, или путем электродинамического взаимодействия тока в дуге с магнитным полем. Надежное гашение дуги постоянного тока: вольт-амперная характеристика дуги лежит выше реостатной характеристики цепи.

При расчетах обычно в качестве исходных принимаются критические условия, когда эти характеристики касаются друг друга в одной точке (рис. 5.6).

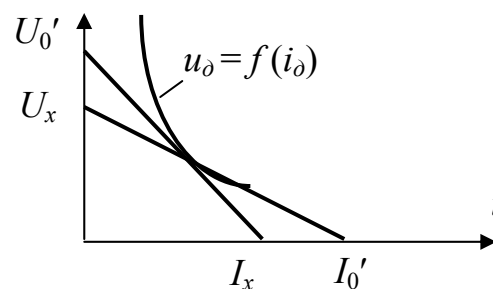


Рис. 5.6

5.4. Горение и гашение электрической дуги переменного тока

Дуга переменного тока обычно гасится легче, чем дуга постоянного тока. Чтобы погасить дугу постоянного тока надо свести ток к нулю. При переменном токе этого делать не требуется, так как через каждый полупериод ток естественным путем проходит через нулевой значение, т. е. каждый полупериод дуга гаснет и зажигается вновь. Необходимо создать лишь условия, при которых ток не восстанавливался бы после прохождения через нуль.

Изменение тока и напряжения на дуговом промежутке при переменном токе (рис. 5.7).

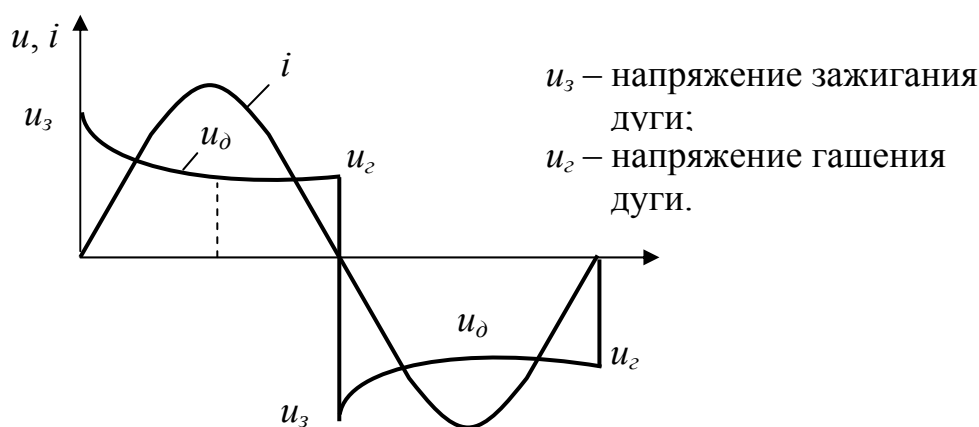


Рис. 5.7

В момент появления тока имеет место резкое нарастание напряжения u_3 . С ростом тока падение напряжения на дуге $u_{\text{д}}$ падает и достигает минимума при максимальном токе. Затем напряжение на дуге снова возрастает и достигает значения напряжения погасания u_2 при исчезновении тока.

То же можно сказать и о вольт-амперной характеристике дуги (рис. 5.8).

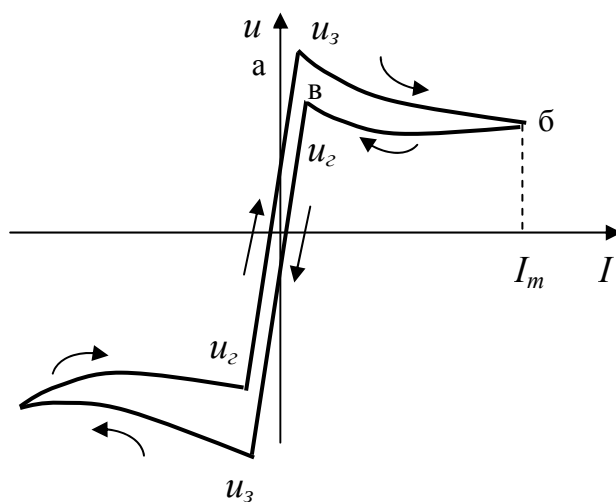


Рис. 5.8

Стрелки показывают направление изменения тока при снятии вольт-амперной характеристики. Кривые «аб» повторяются для каждого полупериода.

Электрическая дуга может зажечься вновь лишь в том случае, если в цепи окажется напряжение равное u_3 . Дуга переменного тока может погаснуть в *два отличных момента времени*: в середине полупериода и при прохождении тока через свой естественный нуль.

В первом случае процесс гашения дуги *переменного* тока почти ничем не отличается от гашения дуги *постоянного* тока (в этом случае также возможны перенапряжения).

Однако в подавляющем большинстве случаев гашение дуги переменного тока происходит в момент прохождения тока через 0.

В этом случае подвод энергии к дуге прекращается, и температура ее резко падает, ионизация падает, и процессы деионизации преобладают над ионизацией. Дуговой промежуток за это время теряет свою проводимость и гаснет.

В начале и в конце каждого полупериода величина тока в дуге не соответствует уравнению $i_m \neq I_m \sin(\omega t + \varphi)$, и ток отклоняется от синусоидальной формулы (рис. 5.9).

Ток в дуге в конце одного и в начале другого полупериодов меняется по закону, обусловленному выражением

$$i = \frac{u_d}{r_d}.$$

В этот промежуток времени сопротивление дугового промежутка становится настолько большим, что происходит резкое ограничение величины тока.

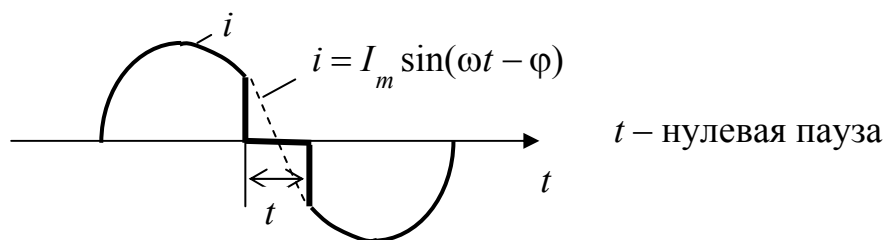


Рис. 5.9

Длительность нулевой паузы зависит от скорости деионизации и постоянных цепи (R, L), t колеблется от нескольких сотен до нескольких тысяч мкс. При малой индуктивности эта пауза больше и наоборот – при большей индуктивности очень мала.

В данный момент времени t дуговой промежуток из проводника превращается в диэлектрик, и одновременно растет напряжение на нем (индуктивность уменьшает нулевую паузу и способствует горению дуги).

Если нарастание сопротивления дугового промежутка тока, выраженное его пробивным напряжением u_{np} (кривая 1), будет опережать нарастание восстанавливающего напряжения u на промежутке (кривая 2), то дуга погаснет при переходе тока через 0 (рис. 5.10). Гашение дуги переменного тока показано на рис. 5.10.

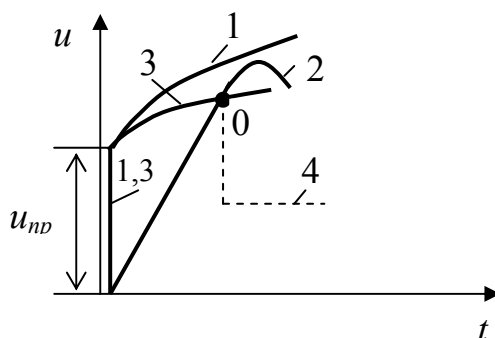


Рис. 5.10

Если же нарастание сопротивления промежутка пойдет медленнее (кривая 3), то в момент времени, соответствующий точке 0, произойдет повторное зажигание, и напряжение на дуге будет изменяться по кривой 4.

Как правило, электрическая прочность дугового промежутка вначале растет быстрее, а затем ее рост замедляется. Судя по опытам, с момента исчезновения тока в дуге околокатодное пространство почти мгновенно приобретает электрическую прочность порядка 150-250В. Это объясняется наличием объемных зарядов у катода (электроны уйдут в анод, и объемного отрицательного заряда у анода не будет). У катода образуется положительный объемный заряд из малоподвижных ионов, и пространство у катода становится свободным от электронов. При долго горящей дуге электроды сильно разогреваются, и это существенно снижает величину электрической прочности промежутка у катода, и она может составлять всего несколько десятков вольт.

В цепях с активной нагрузкой, при прохождении тока через нуль, напряжение цепи также равно нулю, и условия гашения дуги намного благоприятнее, чем в индуктивных цепях, в которых в момент прохождения тока через нуль напряжение достигает максимальной величины (рис. 5.11).

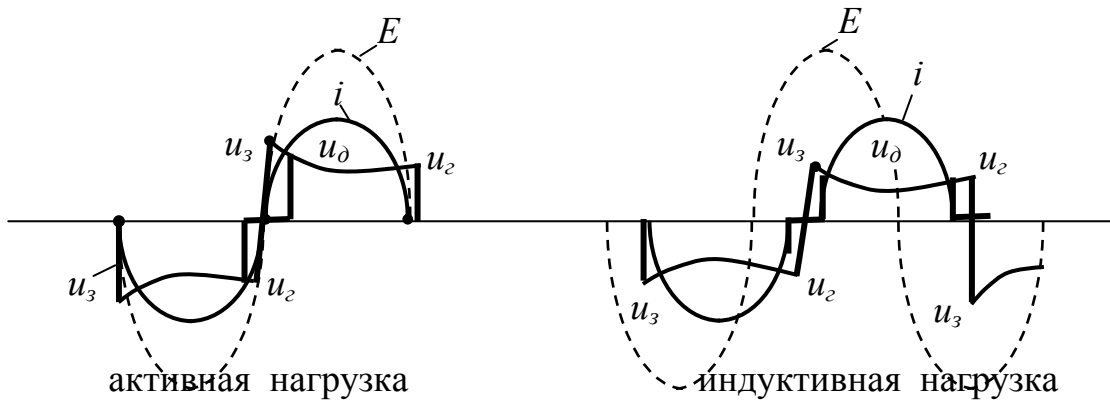


Рис. 5.11

Для эффективного гашения дуги в цепях переменного тока необходимо уменьшить индуктивность цепи.

5.5. Энергия дуги

Количество энергии, выделяемой в процессе гашения дуги, определяется током цепи i , напряжением источника u и дуги u_d , сопротивлением дуги r_d , временем горения дуги t_d и постоянным дугогасительного устройства.

От энергии дуги зависит характер процесса гашения дуги.

$$r_d = \frac{u_d}{i}; \quad P_d = u_d i = r_d i^2. \quad (5.5)$$

Имеем уравнение (5.1)

$$u = u_d + iR + L \frac{di}{dt}. \quad (5.6)$$

Умножим обе части уравнения на idt и проинтегрируем в пределах от 0 до t и соответственно от i до 0.

$$\int_0^t u idt = \int_0^t u_d idt + \int_0^t i^2 R dt - L \int_i^0 idi. \quad (5.7)$$

Знак "-", так как меняем пределы интегрирования.

Энергия дуги

$$A_d = \int_0^t u_d idt. \quad (5.8)$$

Выделим из уравнения (5.5) A_d получим

$$A_d = \frac{Li^2}{2} + \int_0^t (u - iR) idt \quad \text{— при постоянном токе.} \quad (5.9)$$

Из формулы (5.9) следует, что в дуге расходуется вся электромагнитная энергия запасенная цепью в начальный момент отключения $\left(\frac{Li^2}{2}\right)$ и энергия, подаваемая от источника питания за вычетом потерь цепи (i^2R). Отсюда следует ранее уже сделанный вывод, что чем больше (L), тем больше запас энергии, и тем труднее осуществляется гашение дуги.

Энергия дуги переменного тока определяется исходя из того, что гашение дуги осуществляется при прохождении тока через ноль $i = 0$, т. е. электромагнитная энергия в данный момент отсутствует.

$$A_{\delta} = \int_0^t u_{\delta} i dt = \int_0^t (u - iR) i dt. \quad (5.10)$$

$$A_{\delta} = \int_0^t P_{\delta} dt. \quad (5.11)$$

Необходимо стремиться к уменьшению A_{δ} путем активного воздействия на дугу гасящей средой. При этом возрастают процессы деионизации, и длительность горения дуги t_{δ} уменьшается.

Энергия дуги идет на нагрев контактов, подводящих проводов, нагрев и испарение гасящей среды, разложение жидкой или твердой гасящей среды, нагревание и расширение газов, разложение молекул и т. д.

5.6. Способы гашения электрической дуги постоянного тока

Гашение электрической дуги является одной из актуальных проблем современного электроаппаратостроения. Надежность работы выключающих аппаратов, равно как их конструктивные формы и области применения, определяются способом гашения дуги.

Дугогасительные устройства применяются для гашения электрической дуги между контактами электрических аппаратов. Гашение дуги может быть достигнуто либо увеличением скорости деионизации дугового промежутка, либо уменьшением скорости восстановления напряжения, либо совместным использованием обоих этих средств.

Исходя из уравнения $u_{\delta} = u_{\delta} + E_{\delta} l_{\delta} > u - iR$, это можно осуществить следующими способами.

1. Удлинением дуги (l).

Этот способ используется при малых токах и малоэффективен при токах больше 2 А.

Увеличение длины дуги осуществляется за счет раствора контактов или за счет конфигурации дугогасительных рогов.

2. Увеличением напряженности электрического поля (E_0).

Продольный и поперечный обдув дуги сжатым воздухом или элегазом, а также охлаждением дуги в трансформаторном масле сопровождается интенсивным тепломассообменом. Отбор тепловой энергии от дуги приводит к увеличению E_0 . Такой способ используется в высоковольтных аппаратах (АВН).

Существует обратный способ. Дуга движется в воздухе под действием собственного и магнитного дутья. Этот способ практикуется как в АВН, так и в АНН (низковольтных). Магнитное дутье является электродинамической силой, возникающей при взаимодействии поперечного магнитного поля с током, протекающим через ствол дуги.

3. Увеличение приэлектродного напряжения ($u_э$).

В дугогасительной камере устанавливается дугогасительная (деионная) решетка. Металлические пластины решетки разделяют дугу на ряд коротких дуг, которые образуют $(n + 1)$ опорных пятен, где n – число пластин. Напряжение $u_э$ возрастает до величины $(n + 1) u_э$. Гашение дуги становится интенсивным. Такой способ применим как в АВН, так и в АНН.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Какие характерные области различают в дуговом разряде? Какие процессы ионизации и деионизации имеют место в каждой из этих областей?

2. Опишите основные стадии развития электрической дуги при размыкании контактов электрического аппарата.

3. Что представляет собой вольт-амперная характеристика дуги? В чем различие между статической и динамической вольт-амперными характеристиками?

4. В чем состоит условие погасания дуги постоянного тока? Почему погасание дуги сопровождается перенапряжением?

5. В чем заключаются особенности горения и гашения дуги переменного тока? Какие явления имеют место при прохождении тока через нуль?

6. Сформулируйте условие погасания дуги переменного тока.

7. Как влияют на величину энергии, выделяющейся в дугогасительном устройстве аппарата, параметры отключаемой цепи?

8. Перечислите способы гашения дуги путем воздействия на её ствол. Какие способы гашения дуги оказывают воздействие на процессы, происходящие у электродов?

РАЗДЕЛ 6. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ МЕХАНИЗМЫ

6.1. Основные понятия

Электромагнитные механизмы применяются для приведения в действие контактной системы аппаратов и подразделяются:

1) по способу действия: удерживающие – для удержания тех или иных грузов и деталей; притягивающие – совершают определенную работу, притягивая свой якорь;

2) по способу включения: с параллельной катушкой – ток в катушке определяется параметрами самого электромагнита и напряжением сети (рис. 6.1, а); с последовательной катушкой (рис. 6.1, б) – катушка включается в силовую цепь, ток в катушке определяется параметрами электрической цепи;



Рис. 6.1

3) по роду тока: постоянного и переменного токов;

4) по характеру действия якоря: поворотные – якорь поворачивается вокруг какой-то оси или опоры; прямоходовые – якорь перемещается поступательно.

6.2. Динамическая характеристика электромагнита

На рис. 6.2 приведена динамическая характеристика для электромагнитов постоянного тока.

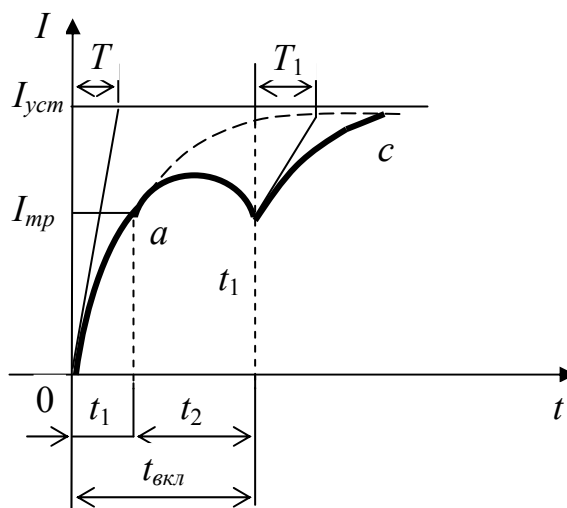


Рис. 6.2

Кривая нарастания тока в катушке соответствует включению электромагнита. Точка *a* соответствует моменту трогания якоря. Величина тока, при котором начинается движение якоря, называется током трогания (I_{mp}), а время нарастания тока от 0 до t_1 – временем трогания (t_1). При дальнейшем движении якоря из-за изменения индуктивности катушки ток нарастает медленно, а затем уменьшается до момента замыкания контактов (t_2). После остановки якоря ток снова увеличивается до установившегося значения (I_{ycm}).

Время $t_1 + t_2 = t_{cp}$ называется временем срабатывания на включение. При отключении время срабатывание на отключение равняется $t_1 + t_2 = t_{cp}$, где t_1 – время трогания на отключения, t_2 – время движение якоря.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Чем отличается работа электромагнита переменного тока от работы электромагнита постоянного тока? Для чего в электромагнитах переменного тока применяют короткозамкнутый виток?

2. Что представляют собой статическая и динамическая тяговые характеристики электромагнита? Чем они отличаются?

3. Каково должно быть соотношение между тяговой характеристикой электромагнита и механической характеристикой аппарата?

4. Какие способы применяются для ускорения действия электромагнитов? Каким образом можно замедлить их действие?

5. Какие параметры определяются при расчете обмотки электромагнита?

РАЗДЕЛ 7. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ УПРАВЛЕНИЯ

Электрические аппараты управления осуществляют функции управления током на пути от источника электрической энергии к потребителю – это коммутация, стабилизация, регулирования и преобразования. Аппараты подразделяются на следующие группы:

- низковольтные (АНН);
- высоковольтные (АВН);
- электрические аппараты автоматики (АНН), к ним относятся электрические реле и датчики;
- автоматические регуляторы и стабилизаторы;

– статические преобразователи (тока, частоты и т. д.).

К наиболее распространенным аппаратам управления относятся следующие аппараты.

Контакторы – аппараты дистанционного действия, предназначенные для частых включений и отключений силовых электрических цепей. Отключение и включение производится электромагнитным, пневматическим или гидравлическим приводом.

Командоаппараты – устройства преимущественно ручного управления, предназначенные для переключения в цепях управления аппаратов переменного и постоянного тока. Командоаппараты бывают контактные и бесконтактные. К контактным аппаратам относятся: кнопки управления, переключатели, пакетные ключи и командоконтроллеры.

Реостат – совокупность элементов сопротивлений.

Контроллер – многоступенчатый, многоцепной аппарат, предназначенный для изменения схемы силовой цепи двигателя или цепи возбуждения, а также осуществляющий изменения сопротивления в силовой цепи.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что такое командоаппарат? Какие группы командоаппаратов применяются на практике?

2. Каково назначение кнопок и кнопочных постов управления? Как они устроены и как работают? По каким параметрам выбираются?

3. Какие аппараты называются контроллерами? Перечислите виды контроллеров, укажите особенности их конструкции, области применения и принципы выбора.

4. Какие элементы сопротивлений (резисторы) применяются для реостатов? Как выбирается сопротивление пускового резистора?

5. Какие аппараты называют контакторами? Какие функции они выполняют? По каким параметрам производится их выбор?

6. Как зависят рабочие параметры контактора и предъявляемые к нему требования от категории применения контактора и условий его эксплуатации?

7. Что представляет собой магнитный пускатель? Какие аппараты входят в его состав? Как производится выбор магнитного пускателя?

8. Приведите схему включения нереверсивного пускателя и поясните его работу на примере пуска асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

РАЗДЕЛ 8. РЕЛЕ

8.1. Основные понятия

Реле – электрический аппарат, в котором при плавном изменении входной величины происходит скачкообразное изменение выходной величины.

По области применения реле подразделяются на схемы автоматики, управления и защиты электроприводов, а также на схемы защиты энергосистем.

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

По принципу воздействия на управляемую цепь реле делятся на контактные и бесконтактные. Характеристики реле «вход – выход» представлены на рис.8.1.

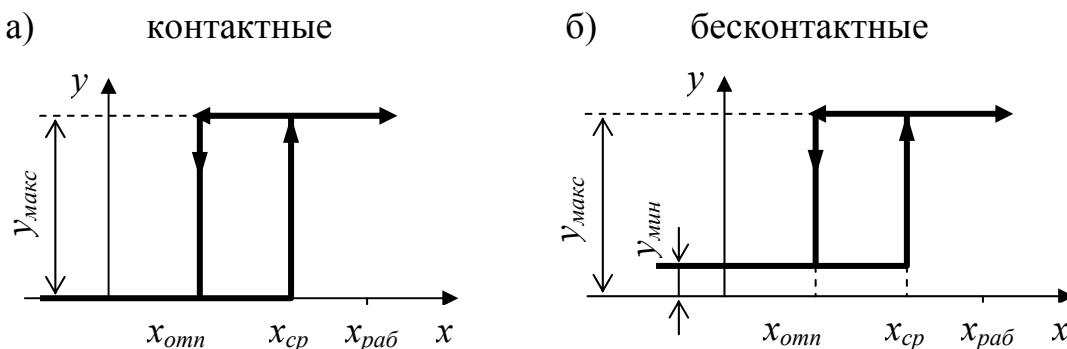


Рис. 8.1.

Реле, используемые в системах электростанций и в электрических сетях, часто называют реле защиты. К ним относятся и тепловые аппараты.

8.2. Аппараты тепловой защиты

Аппараты служат для защиты электрической цепи от длительного протекания токов перегрузки, в 5 – 7 раз превышающих номинальные токи.

Основным исполнительным механизмом является термобиметаллическая пластина. Один конец пластины жёстко закреплён, а другой свободен.

Существуют три способа подогрева пластины (рис. 8.2): непосредственный, косвенный, комбинированный.

Тот или иной способ подогрева определяется значением протекающего по цепи тока.

Упрощенные схемы подогрева пластины показаны на рис. 8.2.

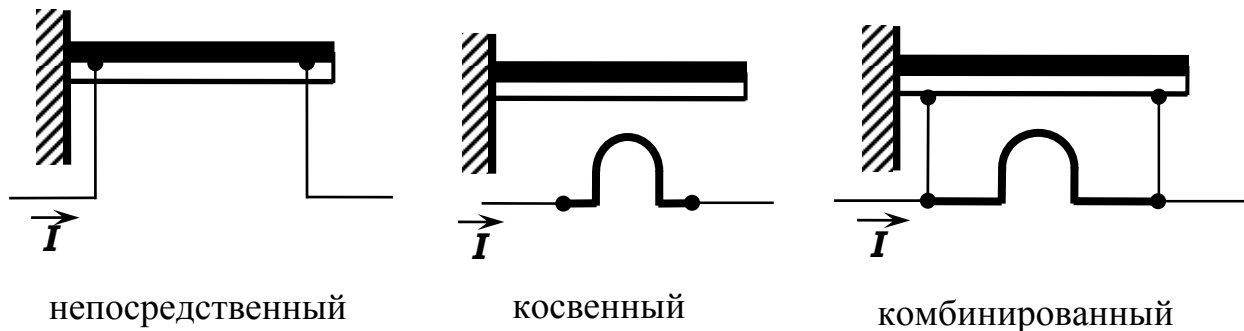


Рис. 8.2.

На рис. 8.3 представлены упрощенные схемы аппаратов тепловой защиты.

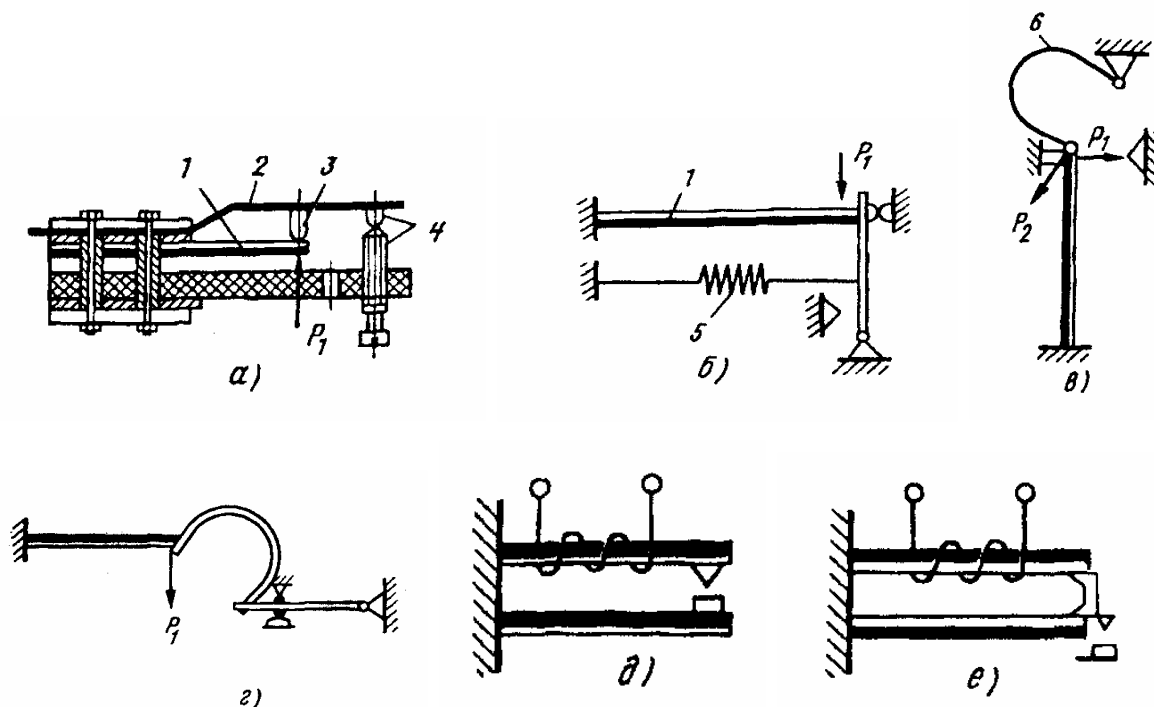


Рис. 8.3

Эти аппараты защиты являются аппаратами косвенного действия, так как реагируют на ток, вызывающий повышение температуры.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Какие электрические аппараты называют реле? Перечислите основные функциональные органы реле. Приведите классификацию реле по назначению и по принципу действия.

2. Что такое характеристика «вход-выход» реле? Перечислите основные параметры реле.

3. Какие требования предъявляются к реле? Как соотносятся эти требования с назначением и условиями эксплуатации реле?

4. Поясните принцип действия электромагнитных реле. На какие параметры воздействия такие реле могут реагировать?

5. Где находят применение электромагнитные реле максимального тока?

6. Где находят применение электромагнитные реле напряжения? Как производится их выбор для защиты двигателя от снижения напряжения?

7. Каков принцип действия электромагнитного реле времени? Где они применяются? Как производится их выбор для схем пуска двигателей в функции времени?

8. На чем основан их принцип действия?

9. Что представляет собой время-токовая (защитная) характеристика теплового реле?

10. Укажите разновидности герконовых реле и способов управления герконами. На чем основан принцип действия герконовых реле с магнитной памятью?

РАЗДЕЛ 9. АВТОМАТИЧЕСКИЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ И ПРЕДОХРАНИТЕЛИ

Автоматические выключатели выполняют функции защитных автоматов при коротких замыканиях, перегрузках, снижении или исчезновении напряжения, изменении направления передачи мощности или тока и т. д. Не зависимо от выполняемых функций их можно подразделить по времени срабатывания на: номинальные, селективные и быстродействующие. В отдельную группу можно выделить автоматы гашения магнитного поля и предохранители. Автоматы гашения магнитного поля применяются в цепях возбуждения крупных машин.

Плавкие предохранители

Плавкие предохранители служат для автоматического отключения электрической цепи при коротком замыкании.

Основные элементы предохранителей:

- а) корпус или несущая часть;
- б) плавкая вставка;
- в) контактное присоединительное устройство;
- г) дугогасительное устройство или дугогасительная среда.

Параметры предохранителей:

- номинальный ток плавкой вставки;
- плавящий (пороговый) ток;
- время-токовая характеристика.

Время-токовая характеристика представлена на рис. 9.1, а, и упрощенный вид плавкой вставки – на рис. 9.1, б.

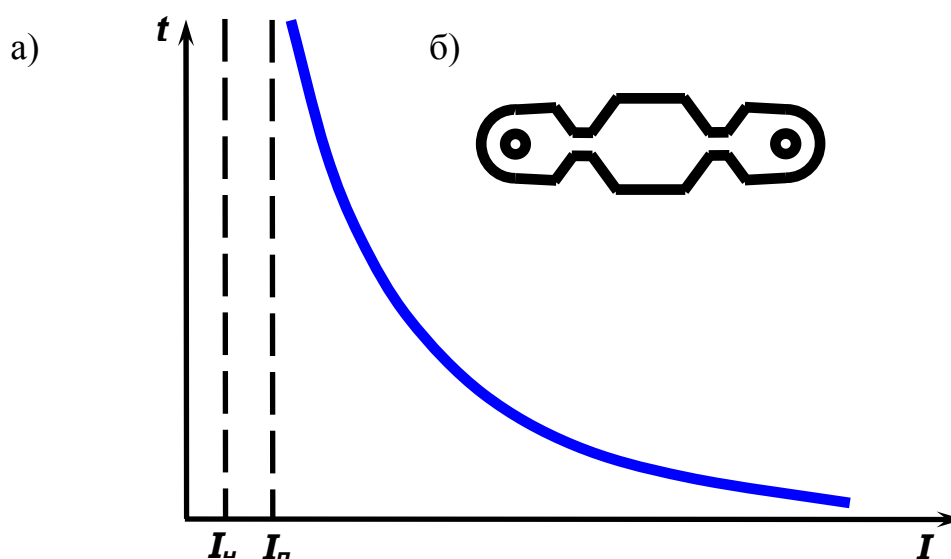


Рис. 9.1

Плавящий ток (I_n) – это наибольший ток, при котором плавкая вставка не перегорает.

При калибровке предохранителя задаются:

- минимальный ток $I_{сmin} = (1,3 \dots 1,4) I_n$, при котором плавкая вставка перегорает до 2 часов;
- максимальный ток $I_{сmax} = 1,6 I_n$, при котором плавкая вставка перегорает в течение 1...2 часов.

Для слаботочных предохранителей используют металлургический эффект.

На тонкую проволочку наносят капельку олова. При плавлении олово становится химически агрессивным и растворяет токоведущую проволочку.

Этот эффект применяется при диаметре проволочек до 0,3 мм.

Во многих конструкциях используются электродинамические силы, которые разрывают токоведущие части (рис. 9.2).

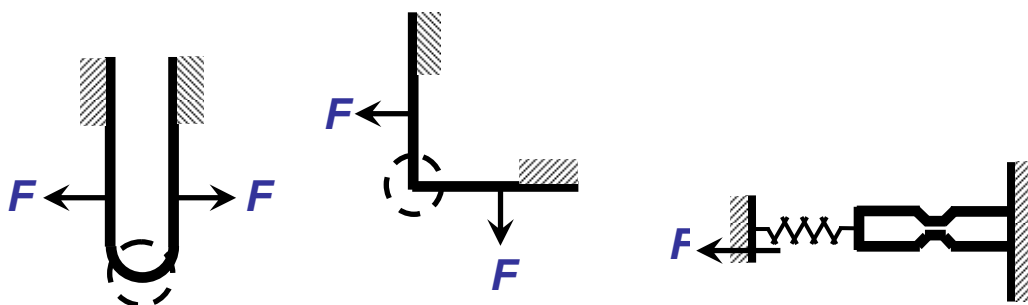


Рис. 9.2

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Какие аварийные режимы работы могут иметь место в электроустановках? Почему необходима защита электроустановок от этих режимов?
2. Какие аппараты называют автоматическими выключателями? Какие к ним предъявляются общие требования ?
3. Какие автоматические выключатели называются быстродействующими? За счет чего достигается их быстродействие? Почему для них характерен эффект токоограничения?
4. Для каких целей служат селективные автоматические выключатели? С помощью какого устройства достигается у них выдержка времени при отключении тока короткого замыкания?
5. Какие функции выполняют автоматические выключатели гашения поля? В чем заключаются особенности их работы?
6. Из каких основных элементов состоят плавкие предохранители? Какие требования предъявляются к предохранителям?
7. Дайте определения пограничного и номинального токов плавкой вставки. Что характеризует их отношение?
8. Что представляет собой время-токовая характеристика предохранителя? Как она должна согласовываться с аналогичной характеристикой защищаемого объекта?

РАЗДЕЛ 10. ЭЛЕКТРОННЫЕ БЕСКОНТАКТНЫЕ АППАРАТЫ

В электронных аппаратах коммутация цепи осуществляется при помощи управляемых полупроводниковых элементов (тиристоров, транзисторов, диодов и управляемых дросселей насыщения).

В основе принципа действия полупроводниковых элементов лежат явления и процессы, возникающие на границе между двумя областями с

различными типами электронной проводимости – электронный (n -типа) и дырочный (p -типа).

Аппараты температурной защиты

Температурные защитные характеристики зависят непосредственно от температуры нагрева защищаемого объекта и относятся к защитам прямого действия.

К ним относятся: терморезисторы и биметаллические контактные и полупроводниковые терморезисторы

Полупроводниковые терморезисторы подразделяются на термисторы (с отрицательным коэффициентом сопротивления) и на позисторы (с положительным коэффициентом сопротивления).

Преимущество: чувствительность в 50-60 раз выше проволочных, выходной сигнал имеет высокий уровень, что не требует дорогих усилителей.

Позисторы обладают пороговым сопротивлением срабатывания при изменении температуры.

Зависимость сопротивления от температуры позисторов представлены на рис. 10, а и на рис. 10, б – последовательно соединенные три позистора.

а)

б)

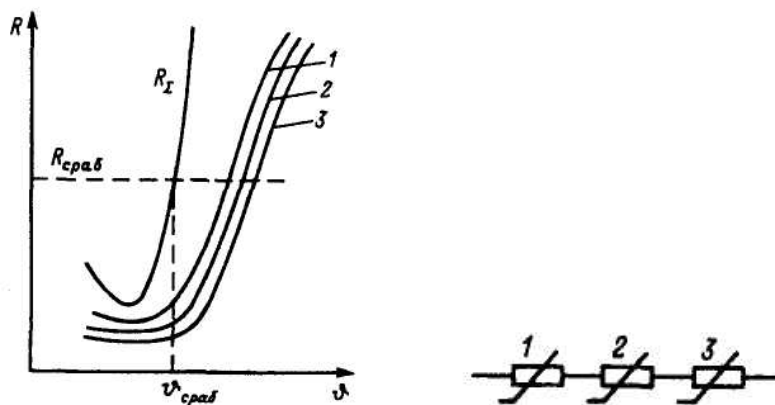


Рис. 10

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Какое устройство называется бесконтактным электрическим аппаратом? Перечислите преимущества и недостатки бесконтактных коммутационных электроаппаратов.

2. На основе каких принципов можно создать бесконтактные реле на базе магнитных усилителей? Какой вид могут иметь их характеристики “вход-выход”. Перечислите достоинства и недостатки этих реле.

3. Приведите схему полупроводникового реле тока и поясните его работу.
4. Как работает полупроводниковое реле времени? На чем основан принцип работы цифровых реле времени ?
5. Приведите схему тиристорного ключа и поясните его работу, используя вольт-амперную характеристику тиристора.
6. Перечислите достоинства и недостатки тиристорных пускателей, укажите области их применения.
7. Что представляет собой позистор? Какой вид имеет зависимость сопротивления позистора от температуры? Где находят применение позисторы? Как выбираются для защиты электродвигателя?
8. Приведите схему позисторной защиты двигателя и поясните её работу. Почему позисторы разных фаз двигателя соединяются последовательно?

РАЗДЕЛ 11. ГИБРИДНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

Гибридными электрическими аппаратами называются комбинированные аппараты для коммутации цепей, имеющие полупроводниковую приставку, подключенную параллельно к контактной системе.

Пример простейшей схемы аппарата постоянного тока, реализующий быстродействие тиристора, приведен на рис. 11.

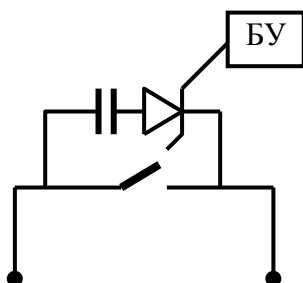


Рис. 11.

При размыкании контактов аппарата, между контактами возникает металлический мостик, а затем короткая электрическая дуга. Увеличение длины дуги сопровождается увеличением напряжения. Напряжение на дуге увеличивается до порогового напряжения, которое воздействует на блок управления (систему). Система управления подает сигнал на тиристор, который открывается, и ток начинает протекать через тиристор навстречу основному току. Наложение двух токов приводит к интенсивному гашению дуги. В некоторых случаях в цепь с тиристором подключается емкость, с помощью которой увеличивается ток в параллельной цепи. Для цепей переменного тока

параллельно к главным или дугогасительным контактам подключаются неуправляемые диоды.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что называют гибридным электрическим аппаратом? Перечислите преимущества и недостатки гибридных аппаратов.

2. Каково их функциональное назначение? Поясните работу гибридного контактора.

3. Как осуществляется защита гибридных контакторов от токов короткого замыкания?

4. Из каких основных узлов состоит гибридный быстродействующий выключатель? Каково их функциональное назначение? Поясните работу гибридного выключателя?

5. Почему необходимо и как достигается ускорение перевода тока из контактов выключателя в тиристоры?

6. В чем заключаются особенности эксплуатации и выбора гибридных выключателей?

7. С помощью каких мер достигается ограничение коммутационных перенапряжений в гибридных аппаратах?

РАЗДЕЛ 12. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Аппараты высокого напряжения (АВН) используются в распределительных устройствах (РУ) для передачи энергии от ее источника к потребителю для защиты агрегатов при аварийных условиях и контроля за состоянием систем высокого напряжения.

По функциональным признакам АВН подразделяются на: коммутационные, измерительные, ограничивающие, компенсирующие аппараты и комплектные распределительные устройства (КРУ).

Рассмотрим наиболее распространенные аппараты:

– коммутационные аппараты (выключатели) предназначены для осуществления оперативной и аварийной коммутации в энергосистемах, для выполнения включения и отключения отдельных цепей;

- разъединители применяются для коммутации обесточенных при помощи выключателей участков токоведущих систем, для переключения РУ с одной ветви на другую без перерыва тока;
- отделитель служит для отключения обесточенной цепи высокого напряжения за малое время (не более 0,1 с);
- короткозамыкатель служит для создания искусственного короткого замыкания в цепи высокого напряжения;
- токоограничивающие реакторы (разрядники) представляют собой катушку индуктивности без стали и служат для ограничения короткого замыкания и поддержания напряжения на шинах распределительного устройства;
- комплектные распределительные устройства представляют полностью или частично закрытый шкаф со встроенными в них АВН.

Требования к аппаратам высокого напряжения

АВН должны надежно работать в нормальном длительном режиме и контролировать основные параметры энергосистемы: номинальное напряжение и ток, состояние изоляционных материалов. Токи короткого замыкания вызывают появления значительных электродинамических усилий и термодинамических процессов на несущих механических конструкциях. Электродинамическая и термическая стойкость аппаратов является важнейшим требованием.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что представляет собой комплектное высоковольтное распределительное устройство? Зависит ли комплектация этого устройства и виды аппаратов от его назначения?
2. Какие требования предъявляют к высоковольтным выключателям? Перечислите их основные параметры и характеристики.
3. В чем заключается основное назначение разъединителей? Какие требования к ним предъявляются?
4. Для чего предназначены короткозамыкатели? Перечислите основные требования к ним.

5. Как производится выбор разъединителей, отделителей и короткозамыкателей? Какие параметры при этом учитываются?

6. Какие требования предъявляются к высоковольтным предохранителям? Перечислите основные параметры и характеристики предохранителей.

7. Какие параметры защищаемой электроустановки должны учитываться при выборе предохранителей? Как должны при этом согласовываться время-токовые характеристики предохранителя и защищаемого объекта?

8. Что представляют собой реакторы? Для чего они предназначены? Какие требования к ним предъявляются?

9. Для чего предназначены разрядники? Каковы их характеристики и как должны быть согласованы с аналогичными характеристиками защищаемого оборудования?

10. В чем состоит основное отличие между разрядниками и ограничителями перенапряжений? Какое из этих устройств является более перспективным и почему?

11. Для чего служат измерительные трансформаторы тока и напряжения? Укажите режимы их работы.

Заключение

Представленный опорный конспект позволяет облегчить усвоение основы теории электрических аппаратов, которые связаны с их развитием и эксплуатацией. Даны классификация и требования к аппаратам, которые применяются в энергетических системах, в схемах энергоснабжения промышленных предприятий и автоматизации производственных процессов.

Затрагиваются вопросы защиты крупных машин и электрических цепей при возникновении аварийных режимов.

В каждом разделе даны вопросы для самопроверки, которые нацеливают студентов на самостоятельную работу.

ГЛОССАРИЙ

Термин	Что обозначает
Вибрация контактов	Процесс отскакивания контактов друг от друга при их соударениях под действием упругих сил в материале контактов и электродинамических сил отброса
Вольт-амперная характеристика	Зависимость напряжения от тока
Глубина коммутации	Отношение сопротивления коммутирующего органа в отключенном состоянии к сопротивлению во включенном состоянии
Допустимая температура	Температура токоведущих частей, при которой гарантируется надежная длительная работа аппарата
Дугогасительная камера	Устройство электрического аппарата, предназначенное для гашения электрической дуги
Жидкометаллические контакты	Электрический контакт, в котором переход электрического тока из одного электрода в другой осуществляется через слой электропроводного жидкого металла
Ионизация	Физический процесс отделения от нейтральной частицы одного или нескольких электронов и образования свободных электронов и положительных ионов
Магнитная цепь	Совокупность тел и сред, представляющих собой путь, вдоль которого замыкается магнитный поток
Коэффициент запаса	Отношение тяговой силы к механической силе, возникающей в электромагнитном механизме
Магнитное дутье	Явление перемещения электрической дуги по поверхностям расходящихся контактов под действием магнитного поля, создаваемого электромагнитной катушкой
Металлический износ контактов	Физическое явление, возникающее в подвижных контактах при их соударении, скольжении, трении друг об друга, что приводит к расплющиванию, растрескиванию, истиранию материала контактов, т. е. к их механическому разрушению и износу.
Механическая характеристика	Зависимость механической силы аппарата, создаваемой пружинами, силами трения и тяжести, от значения зазора между якорем электромагнита и полюса катушки

Переходное сопротивление (сопротивление стягивания)	Значение электрического сопротивления контакта, появляющегося в результате эффекта стягивания линий тока к точкам соприкосновения контактных площадок
Позисторы	Полупроводниковые терморезисторы, у которых сопротивление растет с увеличением температуры
Постоянная времени нагрева	Значение времени, в течение которого проводник нагревается до установившейся температуры без отдачи тепла в окружающую среду
Рекомбинация	Процесс, при котором различно заряженные частицы, приходя во взаимное соприкосновение, образуют нейтральные частицы
Сваривание контактов	Физическое явление, возникающее в контактах, которое происходит в результате высокого нагрева и плавления контактных площадок
Теплопроводность	Физическое явление передачи тепла через твердые, жидкие и газообразные тела
Термисторы	Полупроводниковые терморезисторы, у которых сопротивление падает с увеличением температуры
Термическая стойкость	Способность электрического аппарата пропускать ток короткого замыкания в течение определенного времени, пока температура нагрева токоведущих элементов не превысит допустимых значений
Ток втягивания (трогания)	Значение электрического тока (напряжения) в катушке электромагнита, при котором якорь начинает притягиваться к полюсу (процесс включения)
Ток отпускания	Значение электрического тока (напряжения) в катушке электромагнита, при котором якорь отходит от полюса (процесс отключения)
Тяговая характеристика	Зависимость электромагнитной (тяговой) силы, создаваемой электромагнитом, от значения зазора между якорем и полюсом катушки.
Электрическая дуга	Физическое явление, возникающее при коммутации электрического тока на подвижных контактах электрического аппарата
Электрический аппарат	Электрическое устройство, предназначенное для коммутации, управления, регулирования, стабилизации и защиты электрических цепей и машин, а также для контроля и регулирования различных неэлектрических процессов

Электрический контакт	Конструктивный узел, при помощи которого производится соединение 2-х или нескольких проводников для перехода электрического тока из одного в другие
Электрический износ контактов	Физическое явление, возникающее в подвижных контактах при коммутации электрического тока под действием электрической дуги, что и приводит к плавлению, испарению, распылению металла контактов
Электродинамическая стойкость	Способность электрического аппарата пропускать ток короткого замыкания, при этом он не должен быть разрушен, его контакты отброшены
Электродинамические силы	Электродинамические силы, возникающие во всякой системе проводников стоками, связанных общим магнитным потоком
Электромагнитный механизм	Электрический аппарат, преобразующий электромагнитную энергию в механическую

3.3. Методические указания к проведению лабораторных работ

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

Лабораторные работы соответствуют тематике дисциплины «Электрические и электронные аппараты». Работы выполняются в лаборатории электрических аппаратов кафедры электротехники и электромеханики в течение одного семестра четвертого курса.

Студенты обязаны: прослушать лекции по данной дисциплине; уяснить физику явлений, изучаемых в лабораторных работах; ясно представлять себе ожидаемые результаты опытов и уметь их объяснить. Для лучшей подготовки к лабораторным работам в описаниях этих работ приведены краткие теоретические сведения и указана литература, которую студенты должны изучить до выполнения лабораторных работ.

Особое внимание студенты должны уделить метрологической подготовке и, прежде всего, методам и средствам измерения электрических и магнитных величин и их размерностей.

К работе на лабораторных установках допускаются студенты, ознакомленные с содержанием лабораторных работ и подготовленные к их выполнению, изучившие инструкцию по технике безопасности при выполнении лабораторных работ, обученные безопасным методам работы в действующих электроустановках, прошедшие инструктаж по технике безопасности и расписавшиеся в журнале прохождения студентами этого инструктажа.

По окончании каждой лабораторной работы студент представляет на проверку преподавателю черновые записи. Отчёты о лабораторных работах оформляются в соответствии с требованиями, приведёнными в методических указаниях. К следующей работе допускаются студенты, предъявившие оформленный отчёт о предыдущей работе.

РАБОТА 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ КОНТАКТОВ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Приобретение навыков расчета и экспериментального определения контактного сопротивления электрических аппаратов.

2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Электрическим контактом называется соединение двух (или нескольких) проводников, предназначенное для проведения электрического тока. Деталь, соприкасающаяся с другой при образовании электрического контакта, называется контакт-деталью.

Соприкосновение контактов происходит не по всей кажущейся поверхности контактирования, а лишь в нескольких её местах, так как на поверхности контактов всегда имеются микроскопические выступы и впадины (микронеровности). Поэтому сопротивление контакта электрическому току значительно больше сопротивления сплошного проводника.

Контактное сопротивление является важнейшей характеристикой электрического контакта: чем оно больше, тем больше тепловой энергии выделяется в контакте а, следовательно, тем выше его температура.

В данной работе исследуются зависимости контактного сопротивления от силы контактного нажатия для контактов различных форм и материалов. Кроме того, выясняется влияние поверхностных пленок на контактное сопротивление.

Контактное сопротивление зачищенного контакта связано с силой нажатия следующим соотношением, Ом:

$$R_k = \frac{k}{(0,102F)^m}, \quad (1.1)$$

где R_k – контактное сопротивление, Ом;

F – сила контактного нажатия, Н;

k – коэффициент, учитывающий материал контактов и состояние контактных поверхностей, Ом·Н ;

m – показатель степени, зависящий от формы контактов.

Значения k и m , определенные опытным путем, приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Материал контактов	Коэффициент K , Ом×Н ^{m}	Состояние контактных поверхностей
Медь – медь	$(0,08 \div 0,14) \cdot 10^{-3}$	Очищенные от окислов
Латунь – латунь	$0,67 \cdot 10^{-3}$	Очищенные от окислов
Алюминий – алюминий	$(3 \div 6) \cdot 10^{-3}$	Очищенные от окислов
Серебро – серебро	$0,06 \cdot 10^{-3}$	Очищенные от окислов

Таблица 2

Вид контакта	Коэффициент m
Шар – плоскость	0,5
Линия – плоскость	0,7
Плоскость – плоскость	1,0

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Механическая часть установки (рис. 1) представляет собой стальной жесткий рычаг первого рода 5, ось которого шарнирно закреплена на основании 4, выполненном из швеллера. Исследуемые контакты 6 закрепляются в обоймах 7, одна из которых расположена на рычаге 5, а другая – на полке швеллера 4. Обоймы 7 могут поворачиваться во взаимно-перпендикулярных плоскостях, благодаря чему достигается самоустановка контактов.

С помощью тяги 2 и грузов 3 контакты прижимаются друг к другу. Отношение плеч рычага равно 1:10, поэтому сила нажатия на контакт будет в 10 раз больше силы тяжести грузов. Для уравнивания собственной массы рычага служит противовес 1.

Электрическая схема установки представлена на рис. 2. Выпрямленный ток напряжением 3,5 В подается на контакты от выпрямителя UZ, питающегося от сети переменного тока через регулируемый автотрансформатор T1 и понижающий трансформатор T2. Величина тока в цепи исследуемых контактов определяется по показаниям амперметра, подключенного к измерительному шунту RS.

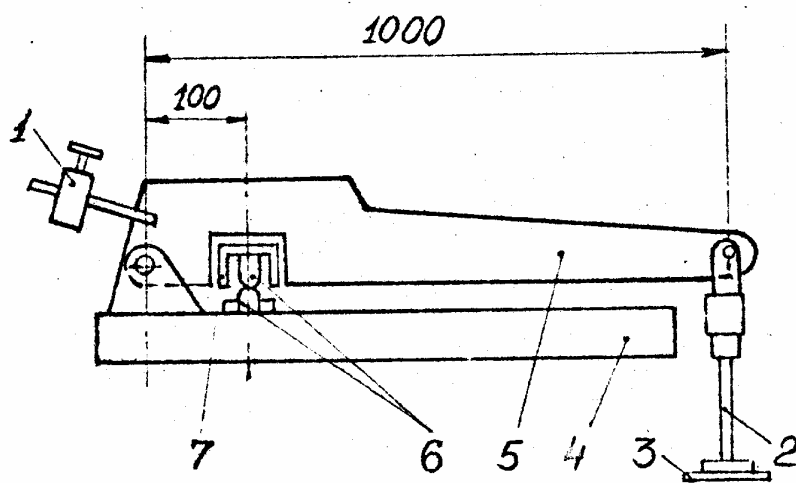


Рис. 1

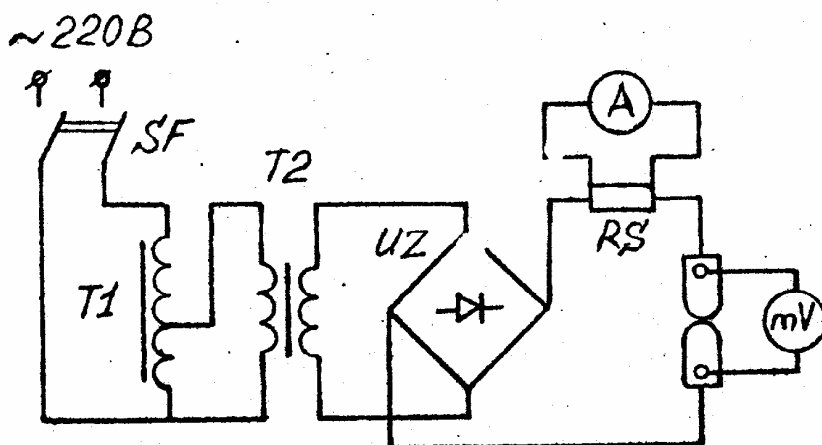


Рис. 2

Падение напряжения на контактах регистрируется милливольтметром. Это напряжение будет небольшим при воздействии на контакты значительной прижимающей силы. Если же эта сила будет мала или контакты разойдутся, то к милливольтметру будет проложено полное напряжение выпрямителя, и милливольтметр выйдет из строя. Для предотвращения этого контакты установки должны быть всегда надежно прижаты, поэтому минимальная масса грузов, приложенных к свободному концу рычага, составляет 1 кг.

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с лабораторной установкой и порядком включения средств измерения.

2. Записать технические и метрологические характеристики основного оборудования и средств измерения, используемых в работе.

3. Определить зависимости контактного сопротивления от силы нажатия на контакт для зачищенных медных и латунных контактов, для этого первоначально следует закрепить в обоймах установки медные зачищенные контакты шар-плоскость и подключить их к главной и измерительной цепям. Зачистку контактов надо производить непосредственно перед началом работы шлифовальной бумагой. Затем с помощью нагрузочного устройства создать начальную силу нажатия на контакт, равную 98 Н (что соответствует массе груза 1 кг). Включением автоматического выключателя S подать напряжение на схему и установить в цепи контактов ток 200 А. Прежде чем приступить к измерению падений напряжений, следует милливольтметр включить на наивысший предел измерения и только затем, по мере надобности, предел измерения уменьшают.

В процессе исследования силу нажатия на контакт следует последовательно изменять, устанавливая грузы массой от 1 до 6 кг. Измерения необходимо производить вначале при возрастающей, а затем при убывающей силе контактного нажатия. Зная падение напряжения на контактах в каждом опыте и величину протекающего по ним тока 1-200 А, определяют контактное сопротивление, Ом.

$$R_{к.оп} = \frac{U}{I}.$$

Аналогичные измерения и определения величины $R_{к.оп}$ следует произвести для всех видов медных и латунных зачищенных контактов, указанных в табл. 2.

Результаты измерений занести в табл. по форме 1.

Форма 1

Опыт							Расчёт $R_{к}, Ом$
$F, Н$		$U_{к}, мВ$		$R_{к}, Ом$			
возр.	убыв.	возр.	убыв.	возр.	убыв.	сред.	

4. Рассчитать зависимости контактного сопротивления от силы нажатия по формуле (1.1) для всех исследованных медных и латунных зачищенных контактов. При расчетах использовать те же значения сил, что и в опытах. Опытные и расчетные зависимости построить на одном графике и сравнить их между собой.

5. Определить зависимость контактного сопротивления от силы нажатия для окисленного алюминиевого контакта при различных формах контактной поверхности. Данные измерений занести в табл. по форме 2.

Форма 2

Опыт			Расчёт $R_{к}, Ом$
$F, Н$	$U_{к}, мВ$	$R_{к}, Ом$	

6. Рассчитать зависимость контактного сопротивления от силы нажатия по формуле (1.1) для всех исследованных видов алюминиевого контакта при зачищенных поверхностях контактирования, используя те же значения сил нажатия, что и в опыте. Построить на одном графике опытные и расчетные зависимости и, сравнив их между собой, выяснить влияние поверхностной пленки на контактное сопротивление.

5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Краткое описание лабораторной установки, схематический эскиз установки, схема электрических соединений.

2. Технические данные основного оборудования и метрологические характеристики средств измерения.

3. Результаты измерений и расчетов, таблицы, графики экспериментальных и расчетных зависимостей.

4. Выводы по работе.

6. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что такое электрический контакт?

2. Что понимают под кажущейся поверхностью электрического контакта? Какая поверхность контакта воспринимает усилие нажатия?

3. Дайте определение контактного сопротивления. Какие факторы и как влияют на величину контактного сопротивления?

4. На какие виды подразделяются контакты по форме контактной поверхности?

5. Приведите эмпирическую формулу, связывающую контактное сопротивление с усилием нажатия, формой контактов, материалом контактов и состоянием их контактных поверхностей.

6. Как экспериментально определяется величина контактного сопротивления?

Литература: [1], с. 308...315; [2], с. 69...80; [3], с. 191...198.

РАБОТА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ СИЛ МЕЖДУ ШИНАМИ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Приобретение навыков расчета и экспериментального определения электродинамических сил между двумя шинами.

2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Многие электрические аппараты во время аварий в электрической сети подвергаются действию сквозных токов короткого замыкания, величина которых может в десятки и даже сотни раз превышать номинальный ток аппарата. Эти токи, проходя по токоведущим частям аппарата, приводят к возникновению значительных электродинамических сил, которые стремятся деформировать эти части и разрушить изоляционные элементы их крепления.

Конструкция электрического аппарата должна быть рассчитана таким образом, чтобы он мог выдержать воздействие электродинамических сил при прохождении токов короткого замыкания. Поэтому расчет электродинамических сил, действующих на токоведущие элементы электрических аппаратов, имеет большое значение в практике электроаппаратостроения.

В данной работе исследуются электродинамические силы взаимодействия между прямоугольными параллельными шинами конечной длины. Сила взаимодействия между двумя круглыми длинными проводниками определяется по формуле, Н

$$F = \frac{\mu_0 I^2 \ell}{2\pi a}, \quad (2.1)$$

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

I – величина тока, протекающего по проводникам;

ℓ – длина проводников;

a – расстояние между осями проводников.

Если проводники имеют небольшую длину, то эта формула может дать грубую ошибку, поэтому принято вводить в неё поправочный коэффициент k , учитывающий отношение расстояния между проводниками к их длине

$$k = \sqrt{1 + \left(\frac{a}{\ell}\right)^2} - \frac{a}{\ell}. \quad (2.2)$$

Таким образом, для проводников круглого сечения и конечной длины сила взаимодействия определяется по формуле

$$F = \frac{\mu_0 I^2 \ell}{2\pi a} k_1. \quad (2.3)$$

Для проводников прямоугольного сечения вводится коэффициент k_2 , учитывающий их прямоугольную форму и взаимное расположение. Если толщина шины b значительно меньше её ширины h и расстояния между шинами a , то коэффициент k_2 можно определить по формуле

$$k_2 = \frac{a^2}{h^2} \left[2 \frac{h}{a} \operatorname{arctg} \frac{h}{a} - \ln \left(1 + \frac{h^2}{a^2} \right) \right]. \quad (2.4)$$

Если размером b пренебречь нельзя, то расчетные формулы получаются громоздкими, и величину коэффициента k_2 удобнее определять по кривым Двайта.

Приведенные выше формулы выведены для постоянного тока. При переменном токе электродинамические силы пульсируют с двойной частотой. Однако если под F понимать среднее за период значение электродинамической силы, а под I – действующее значение тока, то формула остается верной и для переменного тока.

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка представляет собой (рис. 3) две прямоугольные параллельно расположенные шины, одна из которых 1 жестко закреплена, а другая 2 подвешена на блоках 3 и ее сила тяжести уравновешена грузами 4. Подвижная шина 2 соединена с токоподводом и с неподвижной шиной 1 гибкими соединениями 4 и 5. При прохождении по шинам тока в противоположном направлении между ними возникают электродинамические силы отталкивания. Их уравновешивают гири 6. Расстояние между шинами определяется с помощью шкалы 7.

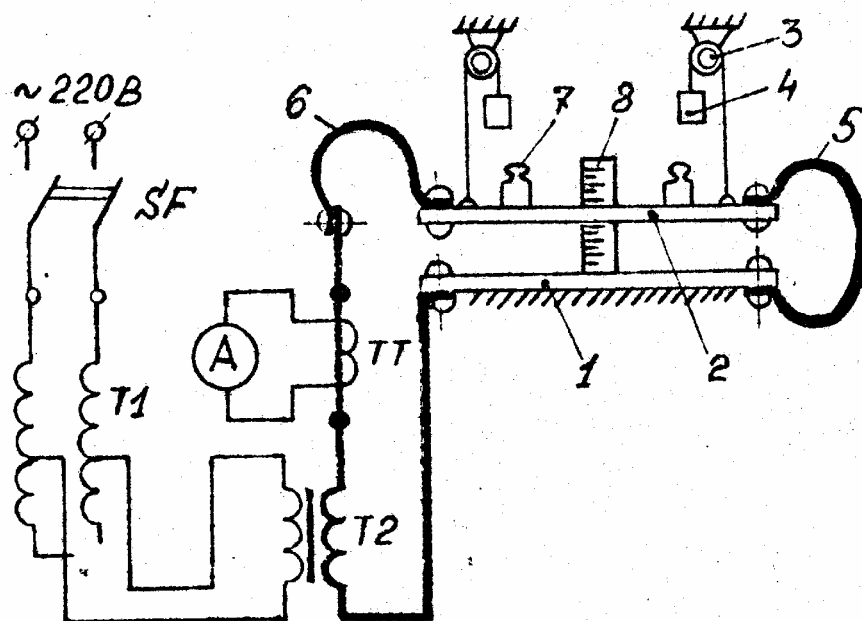


Рис. 3

Питание установки осуществляется от сети переменного тока через регулируемый автотрансформатор Т1 и понижающий трансформатор Т2. Величина тока, протекшего по шинам, измеряется с помощью амперметра и трансформатора ТТ, имеющего коэффициент трансформации, равный 400.

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с лабораторной установкой и порядком включения средств измерения.

2. Записать технические и метрологические характеристики основного оборудования и средств измерений, используемых в данной работе.

3. Определить зависимость величины электродинамической силы от расстояния между шинами. Для этого выключателем S (рис. 3) подать напряжение на установку, с помощью автотрансформатора Т1 установить в цепи шин ток 800 А. Затем, последовательно устанавливая на подвижной шине гири массой 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 кг, зафиксировать расстояние между шинами для каждого случая.

Аналогичные измерения следует провести при токах 1000, 1200, 1400 А. Результаты измерений занести в табл. по форме 3. На основании полученных результатов построить зависимости электродинамической силы от расстояния между шинами при различных значениях тока (рис. 4,а).

При выполнении экспериментов схема должна включаться под напряжение только на время производства опыта, который следует проводить быстро во избежание перегрева установки. Смену гирь разрешается производить только при отсутствии напряжения на установке.

Форма 3

Измерено		Вычислено при $I = 1200$ А								
Масса гирь, кг	$F, Н$	Расстояние, см при токах, А				K	по формуле (2.4)		По графику	
		800	1000	1200	1400		K_ϕ	$F, Н$	K_ϕ	$F, Н$
0,5	4,9									
1,0	9,8									

1,5	14,7									
-----	------	--	--	--	--	--	--	--	--	--

4. Определить зависимость величины электродинамической силы от тока при расстоянии между шинами, равном 3 см. Для этого следует на графике кривых $F = f(a)$, приведенном на рис. 4,а, провести вертикальную прямую $a = 3$ см. Ординаты точек пересечения этой прямой с кривыми определяют силы взаимодействия между шинами при соответствующих токах.

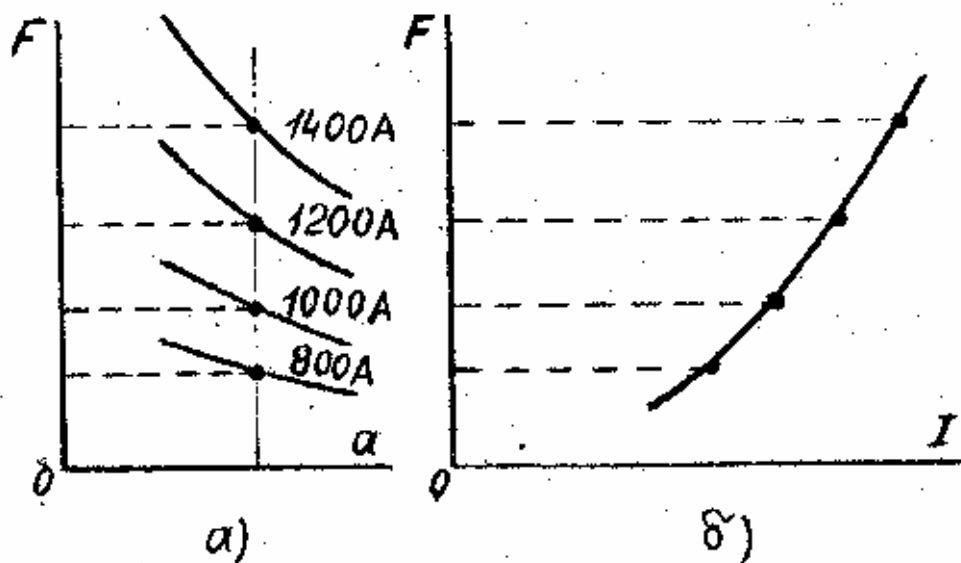


Рис. 4

Затем надо нанести на график $F = f(I)$ полученные значения сил и, соединив полученные точки кривой, определить зависимость силы взаимодействия между шинами от величины тока при $a = 3$ см (рис. 4,б).

5. Определить расчетным путем электродинамические силы при токе 1200 А для тех же расстояний между шинами, что и в опыте. Расчет сил произвести для двух случаев:

- пренебрегая толщиной шины и вычислив K_ϕ по формуле (2.4);
- учитывая толщину шины и определив K_ϕ из графика $k_2 = f((a - b)/(b + h))$, приводимого в литературе [1], [2] или [3].

Результаты вычислений занести в табл. по форме 3. По данным таблицы построить расчетные кривые $F = f(a)$ при $I = 1200$ А на одном графике с экспериментальной кривой и сравнить их между собой.

5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Краткое описание лабораторной установки, схематический эскиз конструкции установки со схемой электрических соединений.

2. Технические данные основного оборудования и метрологические характеристики средств измерения.

3. Результаты измерений и расчетов, таблица, графики экспериментальных и расчетных зависимостей.

4. Выводы по работе.

6. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. В каких случаях в токоведущих частях электрических аппаратов возникают значительные электродинамические силы? Чем они опасны?

2. Почему в электроаппаратостроении придают большое значение расчету электродинамических сил?

3. Как рассчитываются электродинамические усилия между длинными параллельными проводниками круглого сечения?

4. Какие поправочные коэффициенты необходимо ввести в расчетные уравнения для проводников прямоугольного сечения конечной длины и почему?

5. При каких условиях уравнения, выведенные для расчета электродинамических сил при постоянном токе, могут быть использованы для определения этих сил при переменном токе?

Литература: [1], с. 31...38; [2], с. 8...14.

РАБОТА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КОНТАКТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Практическое ознакомление с конструкцией и работой электромагнитного контактора, овладение навыками экспериментального определения его основных характеристик.

2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Контактор представляет собой коммутационный электрический аппарат с дистанционным управлением, предназначенный для частых включений и отключений силовых электрических цепей при нормальных режимах работы. Наиболее широкое применение получили электромагнитные контакторы, т. е. имеющие электромагнитный привод. Контактторы постоянного тока

предназначены для коммутации цепей постоянного тока и, как правило, приводятся в действие электромагнитом постоянного тока.

Кратчайшее расстояние между контактными поверхностями подвижного и неподвижного контактов в их разомкнутом положении называется зазором контакта. Расстояние, на которое переместится из замкнутого положения подвижный контакт при удалении неподвижного, называется провалом контакта. Величина провала выбирается из условий допустимого износа контактов и обеспечивает соприкосновение контактов, несмотря на их постепенный износ при работе. Во включенном положении контактора его контакты должны быть сжаты такой силой, которая обеспечивает выполнение условий допустимого нагрева контактов при длительном режиме работы и их электродинамической стойкости при сквозных токах короткого замыкания.

Основными характеристиками контактора являются механическая и тяговая. От оптимального согласования этих характеристик во многом зависит надежная и долговечная работа контактора.

Механическая характеристика – это зависимость момента, создаваемого силами сопротивления движению подвижной системы, от угла поворота якоря электромагнита, т. е. $M_{\text{мех}} = f(\alpha)$. Этот момент создается силами возвратной (отключающей) и контактной пружин, массой неуравновешенных частей, а также силами трения. Статическая тяговая характеристика – это зависимость величины тягового момента электромагнита от угла поворота якоря при неизменной величине приложенного напряжения на обмотке электромагнита, т. е. $M_{\text{эм}} = f(\alpha)$. Моменты всех сил определяются относительно оси поворота якоря электромагнита. Типичные для контактора механическая и тяговые характеристики представлены на рис. 5.

График $M_{\text{мех}} = f(\alpha)$ представляет собой ломаную линию. В начале движения при $\alpha = \alpha_{\text{мах}}$ (что соответствует наибольшему зазору между якорем и сердечником электромагнита) противодействующий момент M_1 создается усилием предварительного сжатия возвратной пружины, силами трения и силой тяжести неуравновешенных относительно оси якоря масс подвижной системы. На участке от $\alpha_{\text{мах}}$ до $\alpha_{\text{кас}}$ момент постепенно нарастает до значения M_2 в результате сжатия возвратной пружины. При соприкосновении подвижного контакта с неподвижным (при $\alpha = \alpha_{\text{кас}}$) происходит скачкообразное увеличение противодействующего момента до величины M_3 из-за наличия предварительного начального сжатия контактной пружины. Величину изменения

момента $M_3 - M_2$ можно рассчитать как произведение силы начального контактного нажатия на расстояние от точки приложения этой силы до оси поворота якоря. При дальнейшем повороте якоря до $\alpha = 0$ (что и соответствует соприкосновению якоря с сердечником электромагнита) момент возрастает до значения M_4 за счет дальнейшего сжатия контактной и возвратной пружин.

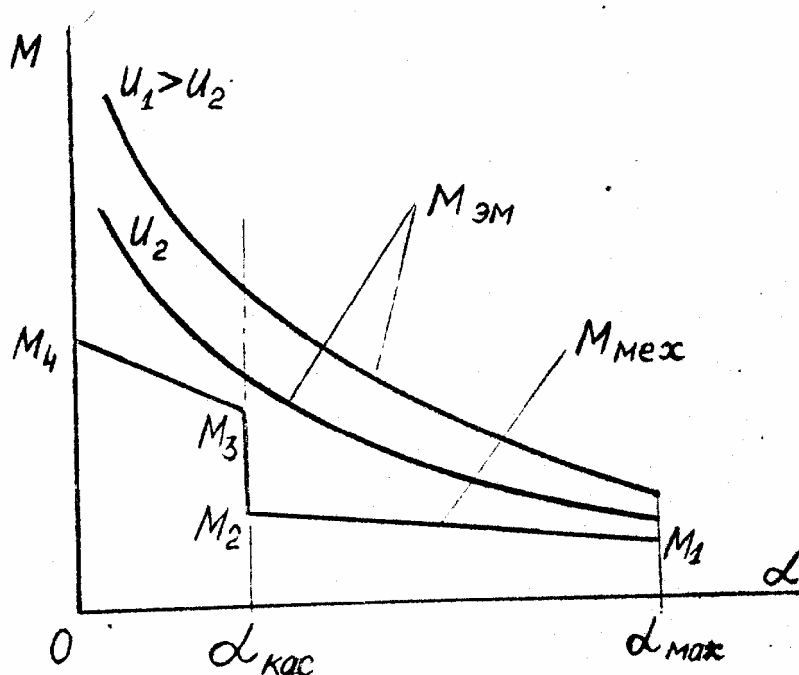


Рис. 5

График тяговой характеристики $M_{эм} = f(\alpha)$ представляет собой плавную кривую, резко возрастающую с уменьшением угла α . Каждому значению приложенного к обмотке электромагнита напряжения соответствует определённая тяговая характеристика на графике, и наоборот.

Для полного включения контактора необходимо, чтобы тяговая характеристика располагалась на графике выше механической, т. е., чтобы при любом значении α соблюдалось неравенство $M_{эм} > M_{мех}$. Контактёр срабатывает только тогда, когда при α_{max} величина $M_{эм}$ становится больше $M_{мех}$, и, наоборот, если при $\alpha = 0$ значение $M_{эм}$ станет меньше $M_{мех}$, то контактор отключается. Остановка подвижной системы контактора в промежуточном положении недопустима как при срабатывании, так и при отключении.

Наименьшее значение напряжения на катушке (тока в катушке), при котором начинается и полностью заканчивается втягивание якоря электромагнита, называется напряжением (током) втягивания. Наибольшее

значение напряжения на катушке (тока в катушке), при котором начинается и полностью заканчивается отпадение якоря электромагнита, называется напряжением (током) отпадения.

Важными параметрами контактора, характеризующими его быстродействие, являются собственные времена включения и отключения.

Собственным временем включения называется интервал времени с момента подачи питания на катушку (т. е. подачи команды на включение) до момента соприкосновения замыкающего контакта. Собственным временем отключения называется интервал времени с момента прекращения питания катушки (т. е. подачи команды на отключение) до момента прекращения соприкосновения контактов.

Сила притяжения электромагнита контактора может определена по формуле Максвелла, Н

$$F_{эм} = \frac{B_{\delta}^2 * S_{\delta}}{2\mu_0} = \frac{\Phi^2}{2\mu_0 * S_{\delta}}, \quad (3.1)$$

где $B_{\delta} = \Phi / S_{\delta}$ – индукция в рабочем зазоре, Тл;

S_{δ} – сечение воздушного зазора, м²;

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

Магнитное сопротивление воздушного зазора электромагнита определяется выражением

$$R_{м\delta} = \frac{\delta}{\mu_0 \cdot S_{\delta}} \quad 1/\text{Гн}, \quad (3.2)$$

где δ – длина воздушного рабочего зазора, м.

Магнитный поток определяется уравнением, Вб

$$\Phi = \frac{IW}{R_{м\delta}}, \quad (3.3)$$

где IW – магнитодвижущая сила, развиваемая электромагнитом, А.

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

В данной работе исследуется контактор постоянного тока типа КП-500, внешний вид которого представлен на рис. 6. Основными элементами контактора являются главные контакты, электромагнит и дугогасительное устройство.

Главные контакты (неподвижный 2 и подвижный 3) осуществляют замыкание и размыкание силовой электрической цепи. Для создания

контактного нажатия служит пружина 4, предварительным сжатием которой и определяется величина силы начального контактного нажатия.

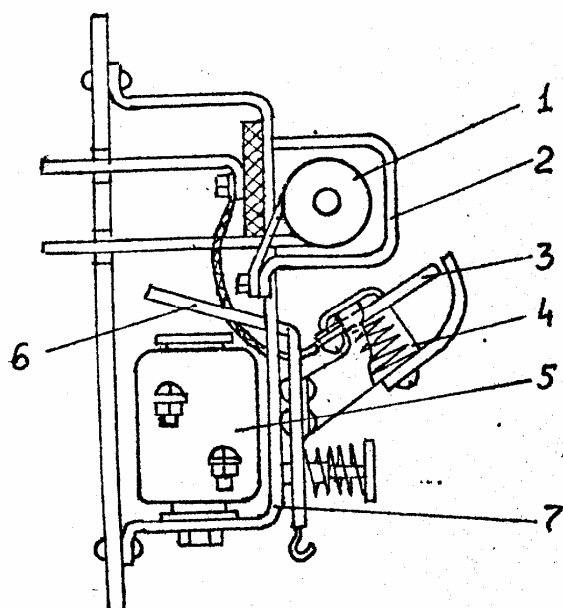


Рис. 6

Электромагнит служит для включения контактора и удержания контактов в замкнутом положении (при полном выборе провала). Он состоит из магнитной системы клапанного типа (якорь 6 и ярмо с сердечником 7) и втягивающей катушки 5.

Дугогасительное устройство предназначено для гашения электрической дуги, возникающей при размыкании главных контактов. Оно состоит из щелевой дугогасительной камеры (на рисунке не показана) с магнитным дутьем, осуществляемым серийной катушкой 1. Сила взаимодействия магнитного поля дутья с током дуги ускоряет ее перемещение с контактов в зону активного дугогашения.

Схема электрических соединений, используемая при исследовании контактора, приведена на рис. 7. Катушка К контактора получает питание от сети переменного тока через регулируемый автотрансформатор Т и выпрямитель UZ. Измерение напряжения на катушке и тока в ее цепи производится соответственно с помощью вольтметра и амперметра. Для измерения собственных времен включения и отключения контактора используется электросекундомер РТ.

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с лабораторной установкой и порядком включения средств измерения.

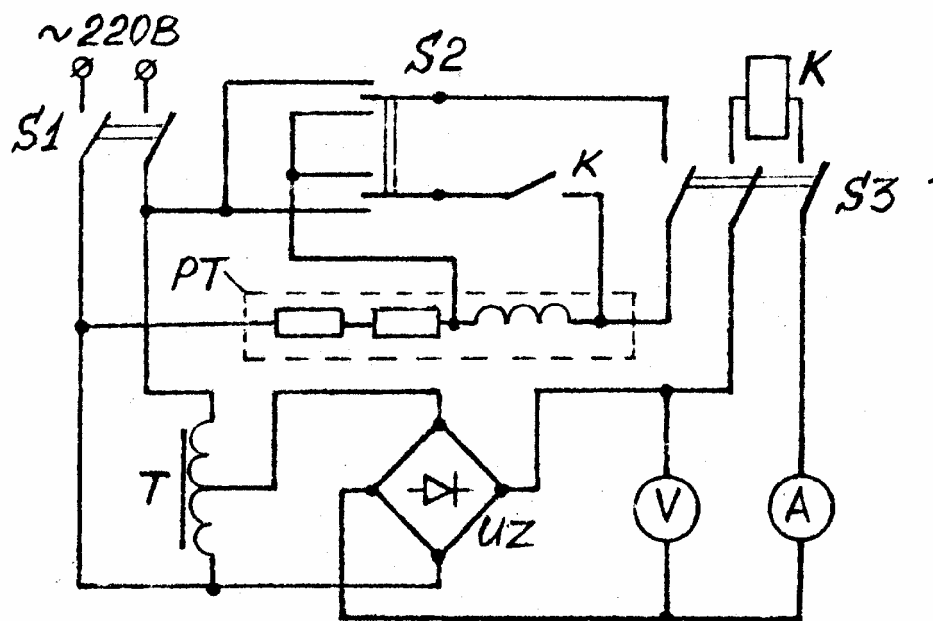


Рис. 72.

2. Записать технические и метрологические характеристики основного оборудования и средств измерений, используемых в работе.

3. Определить при помощи линейки или штангенциркуля величины зазора и провала контактов.

4. Измерить с помощью динамометра величины начального и конечного нажатия на контакты и зафиксировать угол поворота якоря, соответствующий касанию контактов.

Для измерения величины начального нажатия следует положить между подвижным контактом и его упором полоску тонкой бумаги и, оттянув динамометром контакт (с помощью специальной скобы) до освобождения бумаги, зафиксировать показание динамометра.

Для измерения величины конечного нажатия необходимо включить контактор, подав на его катушку К напряжение 220 В посредством включения выключателей S1 и S2. При этом выключатель S2 должен находиться в среднем положении. В этом случае полоска бумаги подкладывается между неподвижным и подвижным контактами. Затем, оттянув динамометром подвижный контакт до освобождения бумаги, следует зафиксировать показание динамометра.

При всех этих измерениях усилие динамометра должно прикладываться к подвижному контакту в месте его соприкосновения с неподвижным, а направление этого усилия должно быть перпендикулярным плоскости подвижного контакта. Результаты измерений следует занести в табл. по форме 4.

Форма 4

Нажатие на контакт, Н		Провал, мм	Зазор, мм	$\alpha_{кас}$, град
Начальное	Конечное			

5. Определить механическую характеристику $M_{мех} = f(\alpha)$, для этого следует прикрепить динамометр к хвостовику якоря так, как указано на рис. 8, а, и зафиксировать его значения при нескольких значениях угла α , включая $\alpha = \alpha_{кас}$ и α_{max} .

При $\alpha \approx 15^\circ$ следует заложить полоску бумаги между хвостовиком якоря и упором его в скобу магнитопровода. Оттянув хвостовик до освобождения бумаги, зафиксировать показания динамометра.

При $\alpha = \alpha_{кас}$ полоска бумаги закладывается сначала между контактами и натяжением динамометра зажимается в их зазоре. Ослабляя постепенно натяжение динамометра, следует зафиксировать его показание в момент освобождения бумаги. Это показание соответствует противодействующему усилию непосредственно перед касанием контактов. Затем полоска бумаги закладывается между подвижным контактом и его упором. Постепенно увеличивая натяжение динамометра, следует зафиксировать его показание в момент освобождения бумаги. Это показание соответствует появлению усилия начального контактного нажатия (скачок на механической характеристике при $\alpha = \alpha_{кас}$).

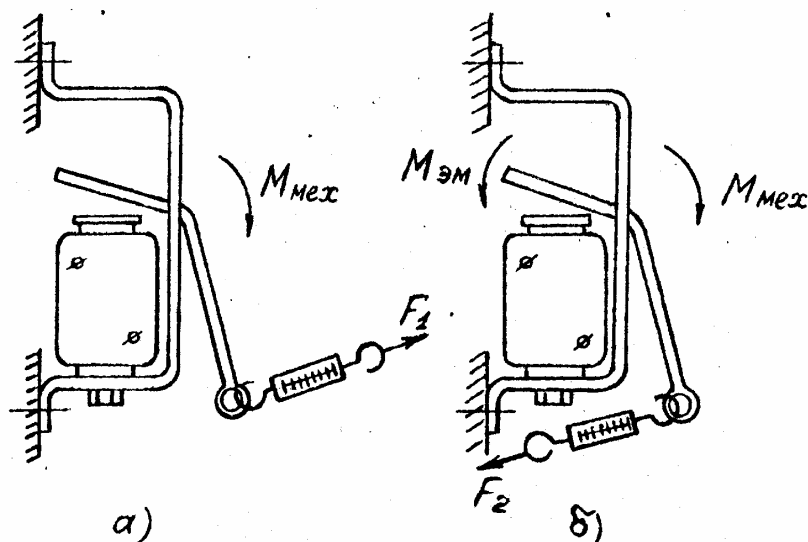


Рис. 8

При $\alpha = 0$ бумагу следует заложить между якорем и полюсом сердечника и зажать ее натяжением динамометра. Затем, ослабляя натяжение, надо зафиксировать показание динамометра в момент освобождения бумаги.

Рекомендуется, кроме указанных выше значений α , измерить величину усилия F_1 при $\alpha \approx 10^\circ$ и $\alpha \approx 2^\circ 30'$. При этих измерениях бумага прокладывается между регулировочным винтом, специально вворачиваемым для этой цели в якорь, и полюсом сердечника.

Для каждого измеренного значения усилия определяется соответствующее значение момента $M_{мех} = F_1 l$, где F_1 – показание динамометра, l – плечо приложения усилия F_1 относительно точки поворота якоря на встречных призмах. Результаты измерений и расчета $M_{мех}$ следует занести в табл. по форме 5.

Форма 5

α , град	Измерено		Вычислено		
	F_1 , Н	F_2 , Н	$M_{мех}$, Нм	M , Нм	$M_{эм}$, Нм

6. Определить тяговую характеристику контактора. При этом следует учитывать, что на подвижную систему контактора действует момент сил, равный разности тягового и противодействующего моментов $M = M_{эм} - M_{мех}$. Для измерения этого момента динамометр надо закрепить так, как показано на рис. 8, б. Зависимость $M = f(\alpha)$ необходимо определить, измеряя усилия F_2 для тех же значений углов α , что и при определении механической характеристики. При этом для каждого значения справедливо

выражение $M = F_2 \cdot \ell$, где F_2 – показание динамометра, ℓ – плечо приложения усилия F_2 относительно точки поворота якоря на встречных призмах.

При $\alpha = \alpha_{\text{макс}}$ следует, удерживая избыточным натяжением динамометра подвижную систему контактора в отключенном положении, подать на его катушку напряжение 220 В. Для этого выключатель S2 надо поставить в среднее (нулевое) положение и включить выключатели S1 и S3. Затем, постепенно уменьшая натяжение динамометра, зафиксировать его показание при срабатывании л электромагнита. Отключить выключатели S1 и S3.

При других углах α , кроме $\alpha = 0$, их величины устанавливаются регулировочным винтом, повернутым для этой цели в якорь. Постепенно увеличивая натяжение динамометра следует фиксировать его показания при отрыве якоря, электромагнита. Напряжение на катушке всегда устанавливается равным 220 В и снимается со схемы отключением выключателей S1 и S3 сразу же после проведения опыта.

Результаты измерений усилий F_2 и вычислений моментов M и $M_{\text{эм}} = M + M_{\text{мех}}$ следует занести в табл. по форме 5. По данным этой таблицы необходимо построить на одном графике зависимости $M_{\text{мех}} = f(\alpha)$, $M = f(\alpha)$, $M_{\text{эм}} = f(\alpha)$.

7. Определить величину коэффициента возврата контактора. Для этого, постепенно увеличивая ток в катушке контактора, надо зафиксировать его наименьшее значение $I_{\text{сраб}}$, при котором происходит четкое срабатывание контактора (без остановки в промежуточном положении). Затем, постепенно уменьшая ток катушки, следует зафиксировать наибольшее значение $I_{\text{отп}}$, при котором происходит четкое отпадение якоря, опыт необходимо проделать три раза и определить среднее арифметическое значение измеренных величин. Результаты измерений и вычислений следует занести в табл. по форме 6.

Форма 6

№ опыта	$I_{\text{отп}}, \text{А}$	$I_{\text{сраб}}, \text{А}$	$K_{\text{в}}$
1			
2			
3			
Среднее значение			

8. Определить собственные времена замыкания $t_{зам}$ и размыкания $t_{разм}$ контактора при напряжениях на катушке электромагнита, равных 240, 220, 200, 180 и 160 В. Для этого при определении выключатель S2 надо поставить в верхнее (первое) положение, включить выключатель S1 и установить напряжение 240 В, включить выключатель S3. При этом напряжение одновременно подаётся на катушку К и электросекундомер РТ, который начнет отсчитывать время. В момент замыкания главных контактов К ими шунтируется двигатель секундомера, и он останавливается, зафиксировав собственное время замыкания $t_{зам}$ контактора. После этого следует отключить выключатель S3 и, дождавшись возвращения подвижной системы контактора в отключенное положение, повторить опыт включением выключателя S3.

При каждом напряжении опыт следует проделать три раза и найти среднее арифметическое значение. Полученные результаты вносятся в табл. по форме 7.

Форма 7

$U_k, В$	240	220	200	180	160
$t_{зам}, с$					

Для определения собственного времени размыкания контактора выключатель S2 надо поставить в нижнее (второе) положение, установить напряжение 240 В, включить выключатель S3. При этом подается питание на катушку К электромагнита и одновременно шунтируется двигатель электросекундомера. После включения контактора выключатель S3 следует разомкнуть. При этом отключается катушка электромагнита и начинает работать электросекундомер. При размыкании главных контактов контактора К электросекундомер теряет питание и останавливается, зафиксировав собственное время размыкания контактора $t_{разм}$. Для повторения опыта необходимо включить выключатель S3 и отключить его после того, как включится контактор.

При каждом значении напряжения опыт следует проделать три раза и определить среднее арифметическое значение $t_{разм}$. Полученные результаты необходимо занести в таблицу, аналогичную форме 7.

По данным таблиц надлежит построить на одном графике зависимости $t_{разм} = f(U)$ и $t_{зам} = f(U)$.

9. Рассчитать величины $M_{эм}$ для тех же значений углов α , что и в эксперименте. Для этого предварительно необходимо определить величины рабочего зазора δ , соответствующие этим значениям углов α из соотношения, м

$$\delta = \ell_{я} \cdot \operatorname{tg} \alpha ,$$

где $\ell_{я}$ – расстояние от точки поворота якоря на встречных призмах до центра сердечника электромагнита, м. Затем по уравнениям (3.1), (3.2) и (3.3) рассчитываются величины усилий $P_{эм}$, соответствующие этим значениям зазора δ и величины моментов $M_{эм} = F_{эм} \cdot \ell_{я}$, Нм .

10. Построить на одном графике расчетную и опытную зависимости $M_{эм} = f(\alpha)$, и сравнить их между собой.

5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Краткое описание лабораторной установки, эскиз контактора, схема электрических соединений.
2. Метрологические характеристики средств измерения.
3. Результаты опытов и расчетов, таблицы, графики.
4. Выводы по работе.

6. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Из каких основных элементов состоит конструкция контактора постоянного тока? Каково их назначение?
2. Какие основные параметры характеризуют контактную систему контактора? Дайте им определение и поясните их функциональную значимость?
3. Что представляют собой механическая и тяговая характеристики контактора? Изобразите типичный вид этих характеристик на графике. Что понимается под согласованием этих характеристик?
4. Какие параметры контактора характеризуют его быстродействие? Дайте им определение?
5. Какие параметры контактора необходимо знать, чтобы определить величину его коэффициента возврата?
6. Где находят применение контакторы постоянного тока?

Литература: [1] , с. 308 ... 318; [2] , с. 227... 235; [3], с. 75... 95; 133... 139.

3.4. Методические указания к проведению практических занятий

Практические занятия предусматривают решения задач по разделам данной дисциплины: основы расчета электродинамических сил, электрические контактные соединения, тепловые процессы в электрических аппаратах, электрическая дуга в аппаратах управления, магнитные цепи электрических аппаратов и электромагнитные механизмы. Ниже приводятся задачи по этим разделам, и даются решения этих задач.

Раздел 2. Электродинамические силы в электрических аппаратах

Задача 2.1

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

Решение. Величина электродинамического усилия выражение (2.16)

$$F = 2 \cdot 10^{-7} k_d I^2 l / a. \text{ Для данного случая расположения проводников величина } (a-b)/(b+h) = (20-10)/(10+100) = 0,091; \quad b/h = 10/100 = 0,1.$$

Тогда из рис. 1 коэффициент формы $k_d = 44$. Следовательно,

$$F = 2 \cdot 10^{-7} \cdot 0,44 \cdot 54^2 \cdot 10^6 \cdot 2 / (20 \cdot 10^{-3}) = 257000 \text{ Н.}$$

Ответ: $F = 257000$ Н.

Значение коэффициента формы для параллельных шин показано на рис. 1.

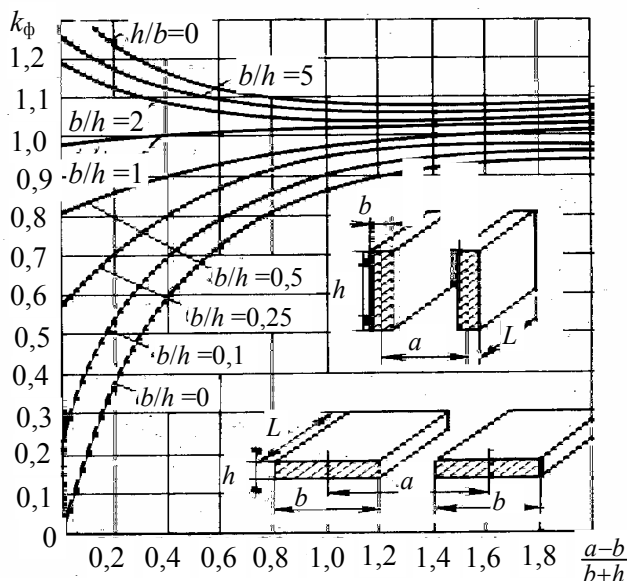


Рис. 1

Задача 2.2

Определить электродинамическое усилие, действующее на 1 м круглого проводника диаметром $d = 10$ мм. Проводник расположен вдоль ферромагнитной стенки на расстоянии 20 см от нее, и по нему протекает ток $I = 1000$ А.

Решение. Так как диаметр проводника значительно меньше, чем расстояние до ферромагнитной стенки, то к решению следует подходить, как и в случае бесконечно тонкого проводника. Методом зеркального изображения найдем электродинамическое усилие, которое действует между данным проводником и его зеркальным изображением относительно поверхности ферромагнитной стенки с тем же током I по выражению (2.20)

$$\text{Тогда } F = 10^{-7} I^2 l / a = 10^{-7} \cdot 10^6 / 0,2 = 0,5 \text{ Н.}$$

$$\text{Ответ: } F = 0,5 \text{ Н.}$$

Раздел 3. Нагрев в электрических аппаратах

Задача 3.1.

Определить температуру медного круглого окрашенного краской проводника диаметром $d = 25$ мм, по которому протекает постоянный ток $I = 100$ А. Проводник находится в спокойном воздухе с температурой $\theta_0 = 35^\circ\text{C}$.

Решение. Исходным уравнением для решения задачи является формула Ньютона

$$P = K_T \tau F,$$

где $\tau = \theta_n - \theta_0$ – превышение температуры нагрева над температурой окружающей среды; F – поверхность теплоотдающего тела.

$$P = I^2 R = I^2 \rho_0 (1 + \alpha \theta_n) \cdot l / S_{сеч} - \text{тепловые потери в проводнике.}$$

Для приближенных расчетов коэффициент теплоотдачи K_T определяют по эмпирическим формулам:

– для окрашенной краской прямоугольной шины, находящейся в спокойном воздухе, большая сторона сечения которой расположена вертикально

$$K_T = 9,2 \left(1 + 0,9 \cdot 10^{-2} \tau \right); \quad (1)$$

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

$$K_T = 10K_1(1 + K_2 \cdot 10^{-2} \tau), \quad (2)$$

где K_1 и K_2 – определяют из табл. 3.1.

Таблица 3.1

Диаметр проводника, мм	0,3	10	40	80	200
K_1 , Вт/(м ² ·К)	4,5	2,24	1,11	1,08	1,02
K_2 , К ⁻¹	1,7	1,14	0,88	0,75	0,68

– для круглой трубы диаметром d , внутри которой протекает вода со скоростью w

$$K_T = 1710w^{0,8}d^{0,2}(22 - \theta)^{0,4}; \quad (3)$$

– для цилиндрических катушек в случае, когда охлаждающая поверхность $10^{-4} < F < 10^{-2}$ м²

$$K_T = 3,6[1 + 0,005(\theta - \theta_0)]/\sqrt[3]{F}; \quad (4)$$

– для цилиндрических катушек в случае, охлаждающая поверхность которых $10^{-2} < F < 0,5$ м²

$$K_T = 3,6[1 + 0,005(\theta - \theta_0)]/\sqrt[5]{F}. \quad (5)$$

Коэффициент теплоотдачи, по условию задачи, определяется по выражению (2) с помощью табл. 3.1

$$K_T = 10K_1[1 + K_2 \cdot 10^{-2}(\theta_n - \theta_0)],$$

где $K_1 \cong 1,17$ Вт/м²·°С; $K_2 \cong 1,0$ 1/°С.

Подставляя числовые значения в исходное уравнение и произведя расчеты на длине шины в 1 м, получим

$$1000^2 \cdot 1,62 \cdot 10^{-8} (1 + 0,0043\theta) \frac{1 \cdot 4}{(3,14 \cdot 25^2 \cdot 10^{-6})} = 10 \cdot 1,17 [1 + 10^{-2}(\theta - 35)] (\theta - 35) 3,14 \cdot 25 \cdot 10^{-3}.$$

Решая последнее квадратное уравнение, находим $\theta = 70^\circ\text{С}$.

Ответ: $\theta = 70^\circ\text{С}$.

Задача 3.2.

Написать уравнение кривой нагрева круглого медного проводника диаметром $d = 10$ мм, по которому протекает постоянный ток $I = 400$ А. Известно, что коэффициент теплоотдачи с поверхности проводника $K_T = 10$ Вт/(м²·°С), температура окружающей среды, которой является

спокойный воздух, $\theta_0 = 35^\circ\text{C}$, а значение удельного сопротивления меди за время нарастания температуры $\rho = 1,75 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.

Решение. Уравнение кривой нагрева в простейшем случае при $\theta_n - \theta_0$ получаем из формулы (4.11)

$$\tau = \tau_{уст} (1 - e^{-t/T}),$$

где $\tau_{уст} = P/K_T F$ – установившееся превышение температуры. Расчет $\tau_{уст}$ и T произведем на единице длины проводника 1 м по формуле, т. е.

$$\tau_{уст} = \frac{I^2 \rho l}{K_T F S_{сеч}} = \frac{400^2 \times 1,75 \times 10^{-8} \times 4 \times 1}{10 \times 3,14 \times 10^2 \times 10^{-6} \times 3,14 \times 10 \times 10^{-3}} = 114 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Постоянная времени нагрева

$$T = \frac{cG}{K_T F} = \frac{0,39 \cdot 10^3 \cdot 8700 \cdot 3,14 \cdot 10^2 \cdot 10^{-6}}{10 \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 10^{-3} \cdot 4} = 850 \text{ с},$$

где c – удельная теплоемкость меди; $\gamma V = G$ – масса стержня длиной в 1 м;
 γ – плотность меди; V – объем проводника; F – охлаждающая поверхность;
 $S_{сеч}$ – сечение проводника.

Таким образом, уравнение кривой нагрева $\tau_n = 114(e^{-t/850})$.

Ответ: $\tau_n = 114(e^{-t/850})$.

Раздел 5. Электрическая дуга

Задача 5.1.

Определить скорость движения открытой (свободной) дуги с током $I_D = 400$ А, находящейся в поперечном магнитном поле с индукцией $B = 0,05$ Тл.

Решение. Скорость перемещения дуги в результате действия тока в шинах при $B \leq 0,1$ Тл определяется по формуле Г. А. Кукекова

$$v_D = 73 I_D^{1/3} B_{CP}^{2/3}, \quad (6)$$

где I – ток в дуге, А; B_{CP} – магнитная индукция между шинами, Тл.

Скорость движения дуги в результате действия тока в шинах, по данным О. Б. Брона, определяется по формуле

$$v_D = 41,2 \sqrt[3]{\frac{I_D H^2}{(1 + 0,4H^{0,3})^2}}, \quad (7)$$

где H – напряженность магнитного поля, А/см.

Скорость дуги, находящейся в узкой щели, по данным Г. А. Кукекова, определяется по формуле

$$v_D = 370 \sqrt{\delta I_D B}, \quad (8)$$

где δ – ширина щели, м; I – ток в дуге, А; B – величина индукции, Тл.

Для индукций в пределах $0 < B < 0,1$ Тл

$$v_D = 73(400)^{1/3} 0,5^{2/3} = 73 \text{ м/с.}$$

По формуле О. Б. Брона, скорость движения дуги

$$v_D = 41,2 \sqrt{\frac{I_D H^2}{(1 + 0,4H^{0,3})^2}} = 41,2 \sqrt{\frac{400 \cdot 394^2}{(1 + 0,4 \cdot 398^{0,3})^2}} = 7255 \text{ см/м} = 72,6 \text{ м/с,}$$

где $H = B/\mu = 0,05/(4\pi \cdot 10^{-7}) = 39800 \text{ А/м} = 398 \text{ А/см.}$

Сопоставив полученные результаты, получим среднее значение

$$v_{CP} = 0,5(73 + 72,6) = 72,8 \text{ м/с.}$$

Ответ: $v_{CP} = 72,8 \text{ м/с.}$

Задача 5.2.

Определить возможное перенапряжение U_{\max} в цепи постоянного тока, если происходит ее размыкание без дуги, при условии что к зажимам индуктивности подключена емкость $C = 0,1$ мкФ. Индуктивность в цепи $L = 1,5$ Гн, ток $I = 20$ А.

Решение. Если пренебречь активным сопротивлением индуктивной катушки, то наиболее ожидаемое напряжение может быть определено из того условия, что вся электромагнитная энергия переходит в электростатическую

$$\frac{LI^2}{2} = \frac{CU_M^2}{2}, \quad \text{откуда} \quad U_{\max} = I \sqrt{\frac{L}{C}} = 20 \sqrt{\frac{1,5}{0,1 \cdot 10^{-6}}} = 77500 \text{ В.}$$

Ответ: $U_{\max} = 77500 \text{ В.}$

Раздел 6. Электромагнитные механизмы

Задача 6.1. Для поляризованного электромагнита (рис. 2) определить удерживающий момент M_y при потоках в рабочих зазорах $\Phi_1 = 0,192 \cdot 10^{-4}$ Вб и $\Phi_2 = 0,016 \cdot 10^{-4}$ Вб, считая плечо $l_p = 0,5 l_u$. Диаметр шляпки сердечника $d_{шл} = 1,1 \cdot 10^{-2}$ м; расстояние между центрами сердечников $l_u = 3 \cdot 10^{-2}$ м.

Упрощенный эскиз поляризованного электромагнита показан на рис. 2, где 1 – якорь; 2 – упор для регулировки величины зазоров; 3 – сердечник; 4 – постоянный магнит.

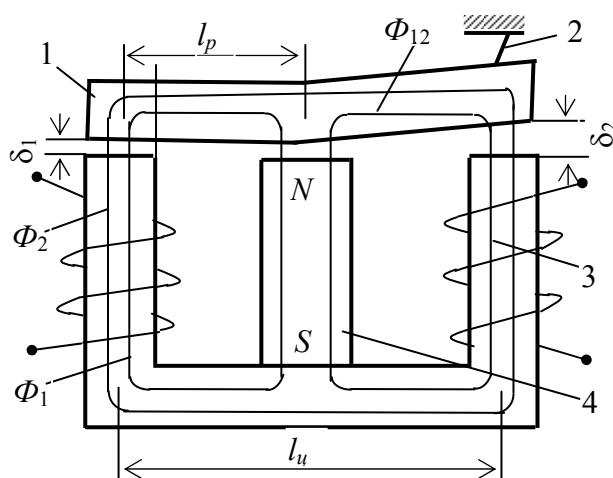


Рис. 2

Решение. Определим плечо $l_p = 0,5 l_u = 0,5 \cdot 3 \cdot 10^{-2} = 1,5 \cdot 10^{-2}$ м и площадь рабочего зазора $S_p = \pi d_{шл}^2 / 4 = \pi (1,1 \cdot 10^{-2})^2 / 4 = 0,95 \cdot 10^{-4}$ м².

В поляризованных электромагнитах с параллельной (дифференциальной) магнитной цепью удерживающий момент, действующий на якорь в его крайнем положении при обесточенной рабочей обмотке, определяется по формуле

$$M_y = \frac{l_p}{\mu_0 S_p} (\Phi_1^2 - \Phi_2^2), \quad (9)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; l_p – расстояние от центра рабочего зазора до оси вращения якоря, м; S_p – площадь рабочего зазора, м²; Φ_1 – магнитный поток в меньшем (δ_1) и Φ_2 – магнитный поток в большем (δ_2) рабочем зазоре, Вб.

Тогда по формуле (9) получим

$$M_y = \frac{1,5 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,95 \cdot 10^{-4}} \left[(0,192 \cdot 10^{-4})^2 - (0,016 \cdot 10^{-4})^2 \right] = 23 \cdot 10^{-3} \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Ответ: $M_y = 23 \cdot 10^{-3}$ Н·м.

Задача 6.2.

Определить коэффициент возврата k_B броневого электромагнита и по его тяговой характеристике $P_э = f(\delta)$, и характеристике противодействующих сил $P_{пр} = f(\delta)$.

Решение. При конечном зазоре в соответствии с рис. 3 электромагнитная и противодействующая силы равны: $P_{э\kappa} = 480$ Н, $P_{пр} = 23$ Н; тогда их разность $\Delta P = P_{э\kappa} - P_{пр} = 480 - 23 = 457$ Н.

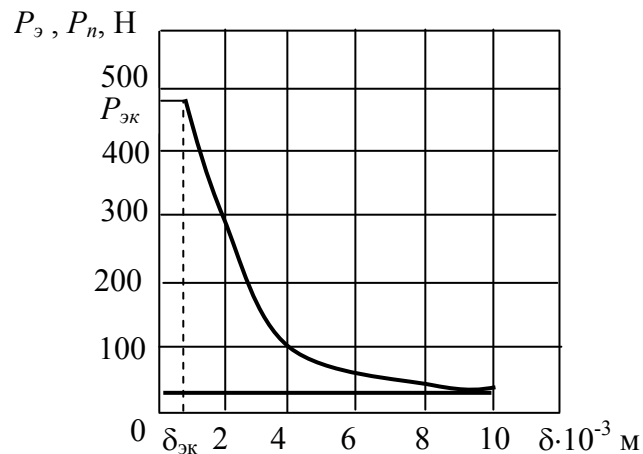


Рис. 3

Коэффициент возврата электромагнитов равен

$$k_B = \sqrt{1 - \Delta P / P_{э\kappa}}, \quad (10)$$

где ΔP — разность электромагнитной и противодействующей сил при конечном зазоре, Н; $P_{э\kappa}$ — электромагнитная сила при конечном зазоре, Н.

Коэффициент возврата находим по формуле (10)

$$k_B = \sqrt{1 - (457 / 480)} = 0,22.$$

Ответ: $k_B = 0,22$.

Раздел 7. Электрические аппараты управления

Задача 7.1.

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

Решение. Найдем радиус площадки касания при условии, что имеет место упругая деформация по формуле

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

где $E = 10,8 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$ – модуль упругости меди.

Тогда сопротивление стягивание из формулы (4.6) будет равно

$$R_{cm} = \rho / (2a) = 1,62 \cdot 10^{-8} / (2 \cdot 2,89 \cdot 10^{-4}) = 0,280 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.}$$

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

Ответ: $R_{cm} = 0,280 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.}$

Задача 7.2

Определить минимальный сваривающий ток розеточного контакта из меди, если сила нажатия на одну ламель составляет 50 Н, всего ламелей 6 шт.

Решение. Величина амплитуды сваривающего тока может быть определена по эмпирической формуле Буткевича для определения минимального тока сваривания

$$I_{св\text{мин}} = k\sqrt{P},$$

где k – коэффициент, зависящий от материала и типа контактов; P – усилие контактного нажатия.

Для случаев, когда наибольший пик симметричного тока получается в начале процесса

$$I_{св\text{мин}} = k\sqrt{P} = 5000\sqrt{50/9,81} = 11300 \text{ А,}$$

где P – сила сжатия контактов; $k = 5000$ – числовой коэффициент для одной ламели.

Для шести ламелей сваривающий ток можно получить по крайней мере в 6 раз большим

$$I_{св} = 6 \cdot 11300 = 67700 \text{ А.}$$

В действительности сваривающий ток может оказаться более высоким, если учитывать силу взаимодействия между ламелями.

Ответ: $I_{св} = 67,7 \text{ кА.}$

Практические задания 5, 6, 7, 9, 10, 11 тем ДОТ освещены в контрольной работе.

4. Блок контроля освоения дисциплины

4.1. Задание на контрольную работу и методические указания к выполнению контрольных работ

В данной методической работе приведены задания на одну контрольную работу, которая состоит из пяти задач с методическими указаниями к их выполнению. Контрольная работа выполняется во 2 семестре 4 курса.

Текст контрольной работы можно выполнять либо шариковой ручкой (или чернилами), либо с помощью компьютера, оставляя поля для пометок преподавателя. Все графические работы могут быть выполнены в карандаше на миллиметровой бумаге, либо с помощью компьютера. Расчетные формулы сначала следует писать в общем виде, а затем подставлять в них цифровые значения, указывая размерность полученного результата. Выбранные величины необходимо кратко обосновать.

При заимствовании расчетных формул, методов расчета и т. п. следует сделать ссылку на использованную литературу с указанием страницы и номера формулы. В конце работы нужно привести перечень использованной литературы, указав автора книги, название, место издательства и год издания.

Если контрольная работа оказывается не зачтенной и требуется ее повторное рецензирование, то необходимо представлять вместе с исправленной или переделанной работой первоначально выполненную работу со всеми замечаниями рецензента. Стирать или заклеивать замечания не разрешается.

Так как задачи в контрольной работе содержит несколько вариантов, то исходные данные для расчетов надлежит выбрать в соответствии с начальной буквой фамилии студента (табл. 1).

Таблица 1

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Начальная буква фамилии	АБВ	ГДЕ	ЖЗИ	КЛМ	НОП	РСТ	УФ	ХЦЧ	ШЩ	ЭЮЯ

ЗАДАЧА 1. Токоподвод к автоматическому выключателю постоянного тока выполнен медными прямоугольными шинами сечением $b \times h$, расположенными параллельно широкой стороне друг к другу на расстоянии a и закрепленными на опорных изоляторах на расстоянии ℓ между соседними изоляторами. Выбрать размеры сечения b и h токоподводящих шин, исходя из

длительного режима работы выключателя при $I_{ном}$ и его электродинамической стойкости при сквозном токе короткого замыкания $I_{кз}$ (максимальное значение пропускаемого тока). Данные для расчета представлены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры	ВАРИАНТЫ									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
a , мм	60	60	65	70	75	80	90	100	110	120
ℓ , мм	150	160	170	170	180	180	200	200	210	210
$I_{ном}$, А	160	200	250	400	600	800	1000	1600	2000	2500
$I_{кз}$, кА	55	60	75	80	100	120	160	200	250	300

Методические указания

1. Определение размеров сечения шин, исходя из длительного режима работы

$$S_{\text{дл}} = \frac{I_{\text{ном}}}{j_{\text{доп}}},$$

где $j_{\text{доп}} = 2 \text{ А/мм}^2$ – допустимая из условий нагрева шинпровода плотность тока.

Отношение узкой стороны сечения шинпровода к его широкой стороне b/h обычно принимается в пределах от 0,1 до 0,25. При этом размеры сечения выбираются из стандартных рядов для медного проката. Для размера b : ... 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12...мм, для размера h : ... 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 120 ... мм.

Выбранные размеры b и h должны обеспечивать сечение не менее $S_{\text{дл}}$ и максимально близкое к нему.

2. Определение размеров сечения шин, исходя из электродинамической стойкости при токе короткого замыкания.

Электродинамическая сила, действующая на участок шинпровода длиной ℓ ,

$$P_{\text{эд}} = 10^{-7} K K_{\phi} I_{\text{кз}}^2,$$

где $K = \frac{2\ell}{a} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{a}{\ell}\right)^2} - \frac{a}{\ell} \right]$ – коэффициент контура;

K_{ϕ} – коэффициент формы, определяется по кривым Двайта.

Максимальное изгибающее механическое напряжение в шине

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{P_{\text{эд}} \ell}{12W_{\text{из}}} = \frac{P_{\text{эд}} \ell}{2hb^2},$$

где $W_{из} = \frac{hb^2}{6}$ – момент сопротивления изгибу шины, мм³.

Если $\sigma_{max} \leq \sigma_{дон} = 13,7 \cdot 10^5 \text{ Н/мм}^2$, то сечение медных токоподводящих шин, выбранное исходя из длительного режима работы, принимается окончательным. Если же $\sigma_{max} > \sigma_{дон}$, то необходимо увеличить толщину шинпровода, исходя из соотношения

$$b = \sqrt{\frac{P_{эд} \ell}{2h\sigma_{дон}}}$$

Это значение ℓ также должно выбираться из стандартного ряда.

Литература: [1], с. 35...38, с. 56.

ЗАДАЧА 2. Для прямого пуска короткозамкнутого асинхронного электродвигателя серии 4 А мощностью P , питающегося от сети с номинальным напряжением $U_{ном} = 380 \text{ В}$, используется магнитный пускатель, схема включения которого представлена на рис. 1. В состав пускателя входят контактор КМ и тепловые реле КК1 и КК2. Определить необходимые параметры двигателя и выбрать тип пускателя и параметры его тепловых реле.

Данные для расчета приведены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры	В а р и а н т ы									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P , кВт	15	18,5	22	15	18,5	22	11	15	11	15
$\cos \varphi_{дв}$	1	0,92	0,91	0,88	0,88	0,90	0,86	0,87	0,75	0,82
η	8	0,885	0,885	0,885	0,895	0,90	0,86	0,875	0,87	0,87

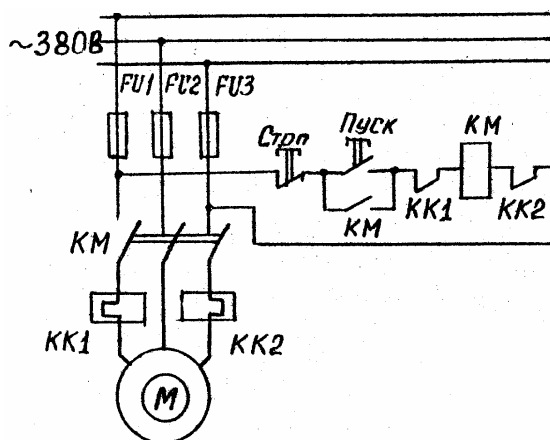


Рис. 1

Технические данные некоторых типов пускателей и тепловых реле приведены в табл. 4 и 5.

Методические указания

1. Определение номинального тока двигателя

$$I_{ном.дв} = \frac{P}{\sqrt{3}U_{ном} \cos \varphi_{дв} \eta},$$

где $\cos \varphi_{дв}$ – коэффициент мощности двигателя ; η – КПД (табл. 3).

По величине этого тока из табл. 4 производится выбор пускателя таким образом, чтобы максимальный рабочий ток пускателя в категории применения АС-3 (пуск электродвигателей с короткозамкнутым ротором, отключение вращающихся двигателей при номинальной нагрузке) был не менее номинального тока двигателя и максимально близким к нему .

2. Определение номинального тока уставки теплового реле.

Для лучшего согласования перегрузочной характеристики двигателя и защитной (время-токовой) характеристики реле номинальный ток уставки выбирается на 15-20 % выше номинального тока двигателя, т. е.

$$I_{уст.ном} = (1,15 + 1,20)I_{ном.дв},$$

так как в тепловое реле выбранного выше пускателя может быть установлен тепловой элемент с различным номинальным током (током срабатывания при нулевом положении регулятора), то из ряда этих токов для реле пускателя необходимо выбрать значение, ближайшее к $I_{уст.ном}$ и проверить, укладывается ли величина $I_{уст.ном}$ в пределы регулирования номинального тока уставки (± 25 %). Технические данные магнитных пускателей при $U_{ном}=380$ В приведены в табл. 4.

Таблица 4

Тип защищённого исполнения	Номинальный ток, А	Максимальный рабочий ток при категории исполнения АС-3	Тип встроенного теплового реле
ПМЕ-122	10	7,5	ТРН-8
ПМЕ-222	23	18	ТРН-25
ПА-322	40	30	ТРН-32
ПА-422	56	50	ТРП-60
ПА-522	115	100	ТРП-150
ПА-622	140	135	ТРП-150

Технические данные тепловых реле приведены в табл. 5

Таблица 5

Тип защищенного исполнения	Номинальный ток, А	Номинальные токи тепловых элементов реле, А (при нулевом положении регулятора)	Пределы регулирования номинального тока установки
ТРН.-8	10	2; 2,5; 3,2; 4; 5; 6,8; 8; 10	От
ТРН-25	25	5; 6,3; 8; 10; 12,5; 16; 20; 25	$0,75 I_{ном}$
ТРН-32	40	16; 20; 25; 32; 40	До
ТРП-60	60	25; 30; 40; 50; 60	$1,25 I_{ном}$
ТРП-150	150	50; 60; 80; 100; 120; 150	

Выбранные таким образом параметры реле обеспечивают отключение двигателя, например, при токе перегрузки $1,3 I_{ном.дв}$ за время не более 10-20 мин., а при перегрузке током $10 I_{ном.дв}$ за время не более 2-5 с.

Литература: [1], с. 326...336, 355...360, 366.

ЗАДАЧА 3. Для защиты от токов короткого замыкания цепи питания короткозамкнутого асинхронного электродвигателя мощностью P (рис. 1 и табл. 3) используются плавкие предохранители серии ПР-2 (разборные, без наполнителя).

Определить номинальный и пограничный токи, а также сечение медной плавкой вставки и выбрать наиболее близкое по номинальному току плавкой вставки исполнение предохранителя. Технические данные предохранителей серии ПР-2 при напряжении 380 В приведены в табл. 6.

Таблица 6

Номинальный ток предохранителя, А	Номинальные токи плавких вставок, А	Предельный отключаемый ток при $\cos\varphi_A = 0,4$, А
15	6, 10 и 15	4500
60	15, 20, 25, 35, 45 и 60	8000
100	60, 80 и 100	11000
200	100, 125, 160 и 200	11000
350	200, 225, 260, 300 и 350	13000
600	350, 430, 500 и 600	20000

Методические указания

1. Определение номинального тока плавкой вставки.

Плавкая вставка предохранителя не должна отключать двигатель при кратковременных перегрузках его пусковыми токами. Для двигателей серии А02 величина пускового тока

$$I_n = 7I_{ном.дв}.$$

Для защиты одиночных двигателей в большинстве практических случаев номинальный ток плавкой вставки рекомендуется определять из соотношения

$$I_{вст.ном} = \frac{I_n}{2,5}.$$

В соответствии с рассчитанным значением $I_{вст.ном}$ из табл.6 выбирается номинальный ток плавкой вставки – ближайшее большее значение. В соответствии с выбранным значением $I_{вст.ном}$ определяется исполнение предохранителя (по его номинальному току).

2. Определение пограничного тока плавкой вставки.

Под пограничным током понимают номинальный ток, при котором сгорает плавкая вставка, достигнув установившейся температуры.

Расчетный пограничный ток $I_{погр}$ берется несколько больше номинального тока плавкой вставки. Отношение $I_{погр} / I_{вст.ном}$ для медных вставок составляет $1,6 \div 1,8$, т. е. $I_{погр} = (1,6 \div 1,8)I_{вст.ном}$.

3. Определение диаметра медной плавкой вставки. Исходя из баланса подводимого и отводимого от плавкой вставки мощностей, диаметр плавкой вставки определяется из уравнения

$$d = 3 \sqrt{\frac{4I_{погр}^2 (1 + \alpha_c T_{пл}) \rho_0}{\pi^2 K_T (T_{пл} - T_{окр})}},$$

где $\rho_0 = 1,75 \cdot 10^{-6}$ Ом · см – удельное сопротивление меди;

$\alpha_c = 0,004$ 1/град – температурный коэффициент сопротивления для меди;

$T_{пл} = 1083^\circ\text{C}$ – температура плавления меди;

$T_{окр} = 40^\circ\text{C}$ – температура окружающей среды;

$K_T = 11 \cdot 10^{-4}$ Вт/см² град – коэффициент теплопередачи с наружной поверхности вставки.

Литература : [3], с. 229...242.

ЗАДАЧА 4. Определить токи срабатывания и отпускания, а также коэффициент возврата нейтрального экранированного герконового реле,

содержащего обмотку управления с числом витков W и один симметричный замыкающий магнитоуправляемый контакт (рис. 2, обмотка управления не показана).

Исходные данные для расчетов.

Размеры электродов геркона: длина $l = 20$ мм; ширина $b = 2,6$ мм; толщина $h = 0,5$ мм. Жесткость электродов $C = 1,66 \cdot 10^3$ Н/м. Длина перекрытия в рабочем зазоре $l_\delta = 1,2$ мм. Величина конечного рабочего зазора $\delta_{\min} = 0,01$ мм. Коэффициент симметрии геркона $K_{см} = 0,5$. Коэффициент магнитной проводимости путем рассеяния $K_{рас} = 0,1$. Коэффициент магнитной проводимости магнитопровода $K_{см} = 2$. Величина начального рабочего зазора δ_0 , число витков обмотки управления приведены в табл. 7.

Таблица 7

Параметр	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
δ_0 , мм	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,22	0,23	0,24	0,25
W , ЧИСЛО ВИТКОВ	15000	18000	20000	22000	25000	30000	15000	18000	20000	25000

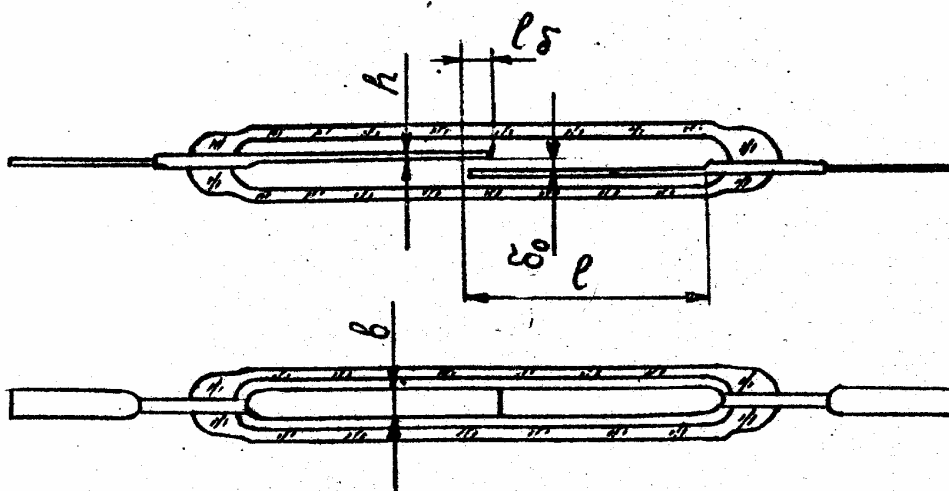


Рис.2

Методические указания

Для расчета следует воспользоваться методикой, приведенной в книге: Харазов К. И. Реле с магнитоуправляемыми контактами. - М.: Энергия, 1971, с. 29...45.

Согласно этой методике МДС, срабатывания такого реле определяется уравнением

$$F_{cp} = (IW)_{cp} = \frac{2\delta_o}{3} \left(\frac{1}{K_{cm}} + 1 + \frac{K_{pac}}{K_{cm}} \right) \cdot \sqrt{\frac{2\delta_o}{3} \left(1 + \frac{1}{K_{cm} + K_{pac}} \right) \frac{cK_{cm}}{\mu_o b l \delta}}$$

Тогда ток срабатывания реле

$$I_{cp} = \frac{F_{cp}}{W}$$

Аналогично, МДС отпущения реле

$$F_{omn} = (IW)_{omn} = \frac{\delta_o / \delta_{мин} + K_{cm} + K_{pac}}{K_{cm}} \delta_{мин} \sqrt{\frac{2C(\delta_o - \delta_{мин})K_{cm}}{\mu_o b l \delta}}$$

Ток отпущения реле
$$I_{omn} = \frac{F_{omn}}{W}$$

Коэффициент возврата реле
$$K_B = \frac{I_{omn}}{I_{cp}}$$

ЗАДАЧА 5. В пускорегулировочном реостате используются резисторы, выполненные из константановой проволоки, намотанной на теплоемкий фарфоровый цилиндр, имеющий желобки для укладки константановой проволоки. Диаметр цилиндров $D = 36$ мм, число желобков n , активная длина цилиндра ℓ , масса цилиндра G_k , диаметр проволоки d .

Определить сопротивление и нагрузочную способность резистора при длительном режиме работы, а также постоянную времени нагрева, коэффициент перегрузки и допустимый ток перегрузки для кратковременного режима работы длительностью $t_{кр}$.

Данные для расчетов приведены в табл.8.

Таблица 8

Параметр	ВАРИАНТ									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d , мм	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2
$t_{кр}$, с	10	12	15	18	20	12	15	18	20	25
n	30					40				
ℓ , мм	100					145				
G_k , г·с ² /см	180					260				

Методические указания

1. Сопротивление резистора

$$R = \rho \frac{l_{np}}{S_{np}} = \rho_0 (1 + \alpha T) \frac{4Dn}{d^2} ,$$

где $\rho_0 = 5 \cdot 10^{-5}$ Ом · см – удельное сопротивление константана при 0°С;
 $\alpha = 3 \cdot 10^{-5}$ 1/°С – температурный коэффициент сопротивления для константана;

$l_{np} = \pi Dn$ - длина проволоки, укладываемой в желобки цилиндра, см;

S_{np} – сечение проволоки, см²;

$T = 500$ °С – допустимая температура нагрева константановой проволоки на фарфоровом каркасе.

2. Нагрузочная способность резистора при длительном режиме работы оценивается допустимой величиной тока

$$I_{\text{дол}} = \sqrt{\frac{K_m F_{np} \tau_{\text{дон}}}{R}} ,$$

где $K_m = 002$ Вт/(см² · град) – коэффициент теплоотдачи с поверхности проволоки;

$F_{np} = \pi d l_{np} = \pi^2 d D n$ - поверхность проволоки, см²;

$\tau_{\text{дон}} = 400$ °С – допустимое превышение температуры константановой проволоки над температурой окружающей среды внутри реостата.

3. Постоянная времени нагрева резистора при кратковременном режиме работы

$$\vartheta = \frac{\beta_k c_k G_k + c_0 G_0}{K_{mk} F_k} ,$$

где $\beta_k = 0,35$ – коэффициент, учитывающий участие фарфорового цилиндра в теплоотводе от проволоки в кратковременном режиме работы;

$c_k = 1,05$ Дж/(г · град) – удельная теплоемкость фарфора;

$c_0 = 0,4$ Дж/(г · град) – удельная теплоемкость константа;

$G_0 = \gamma_0 S_{np} l_{np} = \gamma_0 \pi^2 d^2 D n / 4$ – масса проволоки резистора (здесь $\gamma_0 = 8,9$ г/см³ – плотность константана);

$K_{mk} = 0,0023$ Вт/(см² · град) – коэффициент теплоотдачи с поверхности фарфорового цилиндра;

$F_k = \pi D l$ – наружная боковая поверхность охлаждения цилиндра, см.

4. Коэффициент перегрузки резистора по току в кратковременном режиме работы

$$p = \frac{1}{\sqrt{1 - e^{-t_{кр} / \theta}}} .$$

5. Допустимый ток перегрузки резистора в кратковременном режиме работы

$$I_{кр} = p \cdot I_{\partial} .$$

Литература: [1], с. 78...79; 294...304.

4.2. Текущий контроль

Раздел. 2. Тренировочный тест 1

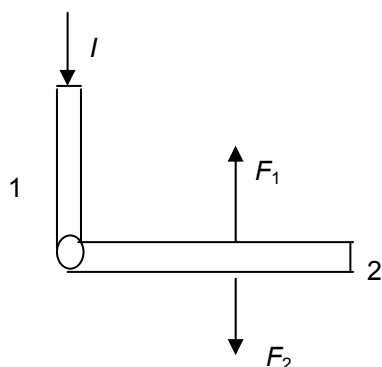
1. Максимальное мгновенное значение тока короткого замыкания называется:

- а) амплитудным значением мгновенного тока;
- б) ударным током короткого замыкания;
- в) действующим значением периодической составляющей тока короткого замыкания.

2. Укажите возникновение механического резонанса между токоведущими частями:

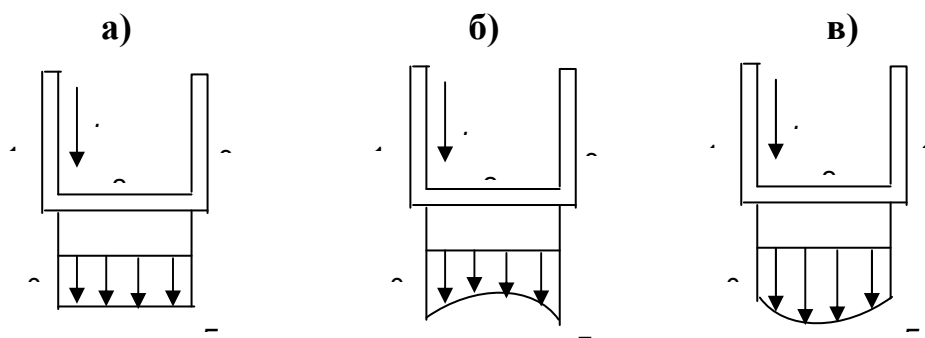
- а) при колебании упругой системы, вызванной одноразовым воздействием внешней силы;
- б) при совпадении частоты собственных колебаний шины с частотой воздействия внешней силы;
- в) в результате действия электродинамических сил.

3. По двум взаимно-перпендикулярным проводникам 1 и 2 протекает ток. Куда будет направлена электродинамическая сила, действующая на проводник 2.

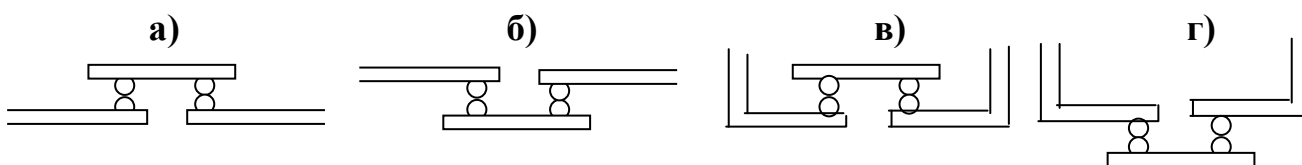


- а) F_1 ; б) F_2 ; в) $F = 0$.

4. Укажите эюру распределения электродинамической силы F , действующей на проводник 2 в П-образном контуре с током.



5. Из представленных конструктивных схем мостиковых контактов укажите наибольшую электродинамическую стойкость.

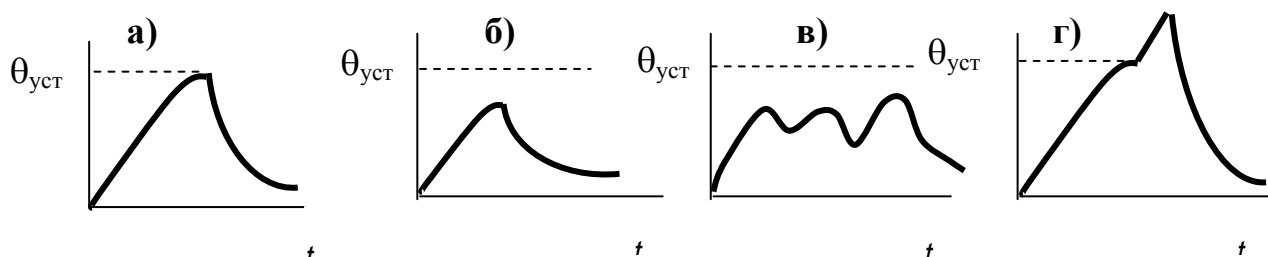


Раздел. 3. Тренировочный тест 2

1. При установившемся режиме, допустимая температура на поверхности изоляции проводника или вблизи проводника определяется:

- а) при рабочем режиме аппарата;
- б) при нормальном длительном режиме;
- в) при токах короткого замыкания.

2. Из представленных кривых нагрева и охлаждения проводника с током укажите повторно-кратковременный режим.



3. Для токоведущих частей, не имеющих вблизи изоляционных деталей, допустимая температура определяется:

- а) наличием окислительной пленки на поверхности токоведущей части;
- б) механической прочностью;
- в) в зависимости от температуры окружающей среды.

4. Под термической стойкостью понимается способность аппарата выдержать:

- а) протекание токов короткого замыкания;
- б) нагрев аппарата при нормальном длительном режиме;
- в) нагрев, возникающий при гашении электрической дуги в условиях нормального напряжения.

5. Укажите, какому режиму работы соответствует параметр

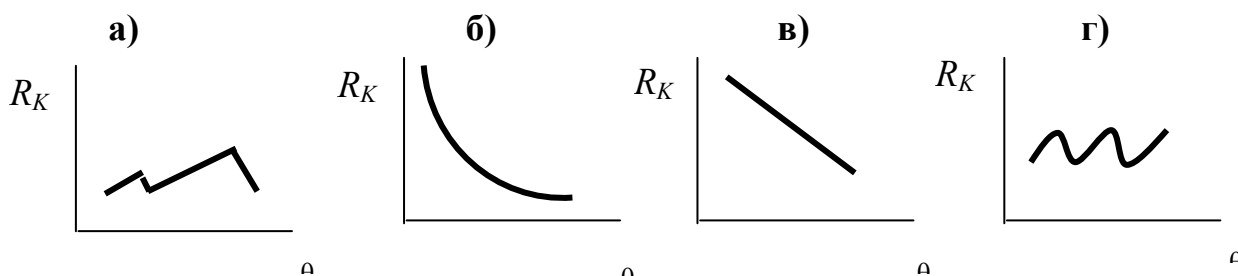
$$ПВ = \frac{t_H}{t_H + t_{II}} 100 \%:$$

- а) длительный; б) повторно-кратковременный; в) кратковременный

Раздел. 4. Тренировочный тест 3

1. Укажите, какой вид имеет зависимость контактного сопротивления

$R_K = f(\theta)$, где θ – температура нагрева контакта (материал контакта – медь):



2. Укажите, какое значение имеет коэффициент m в выражении $R_K = \frac{K}{F^m}$

для односточечного контакта:

- а) $m = 1$; б) $m = 0,7$; в) $m = 0,5$.

3. Раствор контактов выбирают по:

- а) максимальному рабочему току;
- б) току короткого замыкания;
- в) минимальному рабочему току.

4. Конструкция мостикового контакта содержит:

- а) жесткозакрепленный контакт в обойме;
- б) свободный подпружиненный контакт, расположенный в обойме;
- в) контакт с самоустановкой.

5. Укажите, чем объясняется основной износ контактов при включении:

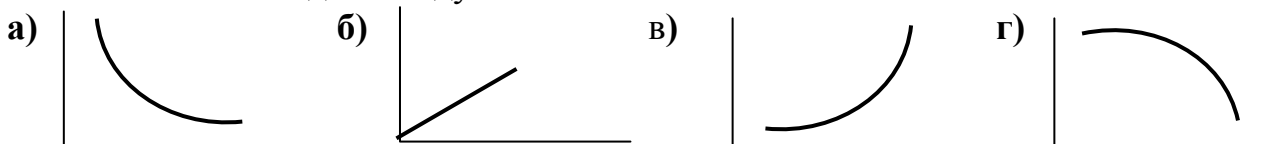
а) дуговым разрядом; б) искровым разрядом; в) механическим воздействием.

Раздел. 5. Тренировочный тест 4

1. Укажите условие устойчивого горения электрической дуги:

а) $L \frac{di}{dt} > 0$; б) $L \frac{di}{dt} < 0$; в) $L \frac{di}{dt} = 0$.

2. Укажите вид ВАХ дуги.



3. Укажите условие гашения электрической дуги:

а) $u_D > u - iR$; б) $u_D < u - iR$; в) $u_D = u - iR$.

4. Гашение дуги в дугогасительной камере с решеткой происходит:

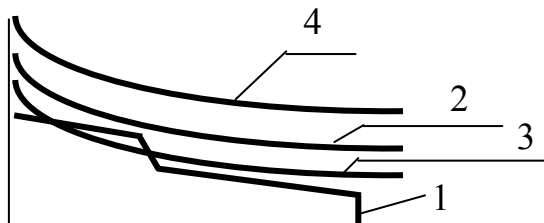
- а) за счет увеличения длины дуги;
- б) за счет увеличения скорости движения дуги;
- в) за счет использования приэлектродных падений напряжения.

5. Укажите, какое выражение соответствует энергии электрической дуги переменного тока:

а) $A_d = \frac{Li^2}{2} + \int_0^t (U - iR)idt$; б) $A_d = \int_0^t (U - iR)idt$; в) $A_d = \frac{Li^2}{2}$.

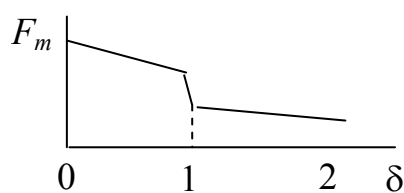
Раздел. 6. Тренировочный тест 5

1. Укажите, при каком соотношении механической (кривая 1) и тяговой (кривые 2,3,4) характеристики аппарата износ контактов будет наименьшим:



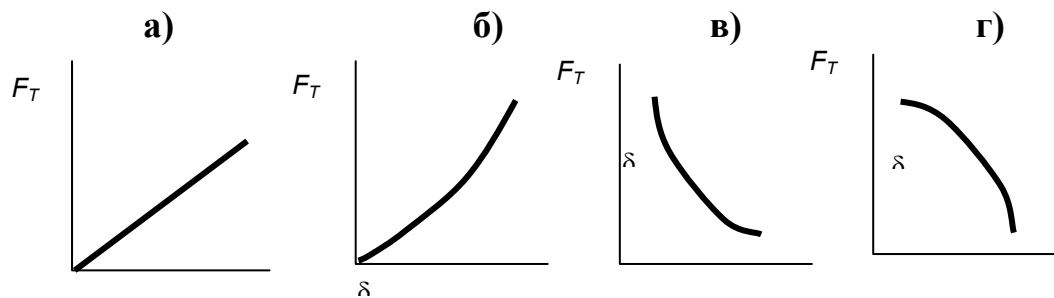
- а) кривые 1 и 2;
- б) кривые 1 и 3;
- в) кривые 1 и 4.

2. Укажите на механической характеристике электромагнитного аппарата участок, соответствующий провалу контактов:



- 1) 0 – 1;
- 2) 1 – 2;
- 3) 0 – 2 .

3. Укажите, какой вид имеет тяговая характеристика электромагнитного аппарата:



4. От чего зависит длина нулевой паузы тока, возникающей при гашении дуги переменного тока, от:

- а) величины активного сопротивления цепи;
- б) величины индуктивности цепи;
- в) величины емкости цепи.

5. Замедление времени срабатывания электромагнита зависит от:

- а) присутствия короткозамкнутого витка на магнитопроводе;
- б) наличия массивной части магнитопровода;
- в) включения активного сопротивления последовательно с катушкой индуктивности.

Раздел. 7. Тренировочный тест 6

1. В сильноточных аппаратах используют:

- а) одноточную контактную систему;
- б) одноступенчатую контактную систему;
- в) многоступенчатую контактную систему.

2. Коммутационная стойкость аппарата, предписанная в технических стандартах, проверяется:

- а) на стендовых испытаниях;
- б) на типовых испытаниях;
- в) на контрольных испытаниях.

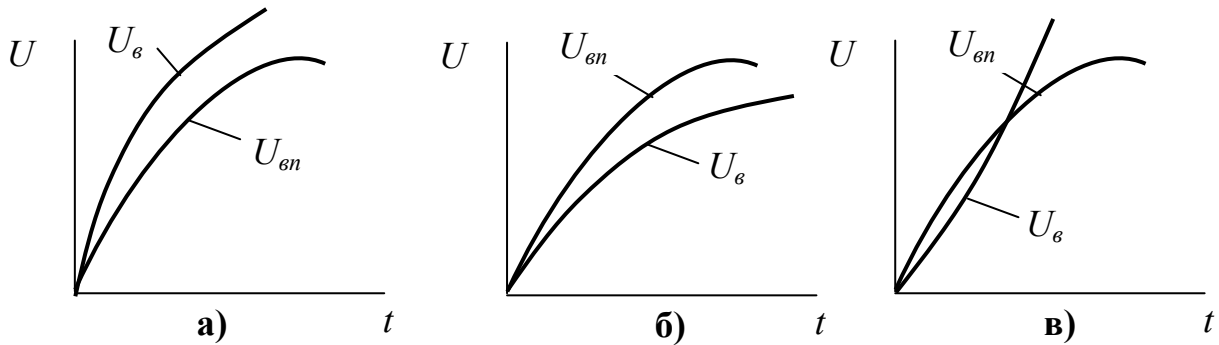
3. Основным способом обеспечения надежности герметизированных контакторов является:

- а) содержание кислорода в составе дугогасящей среды;
- б) наличие содержания влаги внутри оболочки;
- в) вакуум-плотная герметизация.

4. Укажите, на что влияет многоступенчатая контактная система:

- а) уменьшение механического износа главных контактов;
- б) уменьшение электрического износа главных контактов;
- в) уменьшение нагрева аппарата.

5. Укажите, в каком случае в процессе дугогашения будет отсутствовать повторное зажигание дуги:



где U_ϵ – кривая восстановления напряжения сети в межконтактном промежутке ; $U_{\epsilon n}$ – восстанавливающая прочность в межконтактном промежутке.

**ПРАВИЛЬНЫЕ ОТВЕТЫ НА ТРЕНИРОВОЧНЫЕ ТЕСТЫ
ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ**

№ теста	Раздел	№ вопроса	Правильный ответ
1	Раздел 2	1	б
		2	б
		3	б
		4	в
		5	в
2	Раздел 3	1	б
		2	в
		3	б
		4	а
		5	б
3	Раздел 4	1	а
		2	в
		3	в
		4	в
		5	в
4	Раздел 5	1	а
		2	а
		3	а
		4	в
		5	б
5	Раздел 6	1	а
		2	а
		3	4
		4	б
		5	а
6	Раздел 7	1	в
		2	б
		3	в
		4	б
		5	б

4.3. Итоговый контроль

Вопросы для подготовки к экзамену

1. Электрические контакты. Их сопротивление, зависимость его от ряда причин. Типы контактных соединений.

2. Автоматические выключатели Их типы, характеристики и основные элементы конструкции. Требования, предъявляемые к автоматическим выключателям.
3. Способы повышения надежности работы контактных соединений. Эрозия контактов и способы борьбы с нею. Контактные материалы и требования, предъявляемые к ним.
4. Системы дугогашения воздушных низковольтных автоматических выключателей. Термическая и электродинамическая устойчивость их.
5. Основные уравнения нагрева и охлаждения однородных проводников при стационарном режиме.
6. Дугогасительные системы автоматических выключателей.
7. Нагревание однородных проводников в режиме и при коротких замыканиях. Процесс охлаждения проводника.
8. Универсальные, установочные и быстродействующие автоматические выключатели.
9. Нагревание проводников в кратковременном и повторно-кратковременном режимах работы. Тепловая нагрузка. Перегрузка по току.
10. Бесконтактные выключатели с естественной и искусственной коммутацией. Принцип действия и основные характеристики.
11. Схема управления электрическим двигателем постоянного тока.
12. Выключатели и разъединители переменного тока высокого напряжения. Основные требования. Процесс отключения. Циклы работы. Классификация.
13. Закон Био-Савара-Лапласа. Расчет электродинамических сил между параллельными проводниками круглого и прямоугольного сечения.
14. Герконы. Особенности конструкции. Область применения.
15. Электродинамические силы в витке с током. Электродинамические силы между соосными витками. Силы в цилиндрических катушках.
16. Схема управления и защита асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.
17. Электродинамические силы в П-образном и Т-образном контурах.
18. Электромагнитные контакторы. Основные требования. Области применения. Элементы конструкции.
19. Электромагнитные силы при переменном однофазном и трехфазном токе.
20. Дугогасительные системы электромагнитных контакторов.

21. Дугогасительные системы электромагнитных контакторов.
22. Характеристики электрической дуги. Постоянного тока. Устойчивое и неустойчивое горение дуги. Энергия, выделяющаяся в дуге при отключении цепей постоянного тока.
23. Контактные системы контакторов. Главные контакты, блок-контакты. Схемы включения.
24. Характеристики дуги переменного тока. Особенности процесса гашения. Восстанавливающая прочность промежутка и восстанавливающееся напряжение.
25. Причины износа контакторов и способы борьбы с этим явлением.
26. Способы гашения электрической дуги постоянного тока и дугогасительные устройства низковольтных воздушных выключателей.
27. Плавкие предохранители. Основные требования и конструкции плавких предохранителей.
28. Способы гашения электрической дуги.
29. Электрический резонанс и способы его устранения.
30. Применение магнитного поля гашения дуги системы магнитного дугогашения. Виды движения в магнитном поле.
31. Тиристорные контакторы, их схемы, особенности работы, характеристики.
32. Дугогасительные камеры. Их использование для гашения дуги постоянного и переменного тока.
33. Комбинированные контакторы с бездуговой коммутацией. Синхронные выключатели.
34. Перенапряжения, возникающие при гашении дуги и способы их уменьшения. Повторные зажигания дуги.
35. Комбинированные контакторы с бездуговой коммутацией. Схемы включения. Особенности работы.
36. Магнитные цепи аппаратов. Общие характеристики. Классификация и схемы магнитных цепей.
37. Электромагнитные реле напряжения и тока. Назначение, характеристики и схемы.
38. Магнитные цепи электромагнитов постоянного тока.
39. Тепловое реле.
40. Магнитные цепи электромагнитов переменного тока.
41. Поляризованные и быстродействующие реле.

42. Реле времени. Электромагнитные способы ускорения и замедления времени срабатывания реле.
43. Магнитные усилители. Общие сведения. Области использования. Характеристики “вход-выход” в усилительном и релейном режимах.
44. Бесконтактные магнитные реле и логические элементы на магнитных усилителях.
45. Быстродействующие автоматические выключатели.
46. Бесконтактные полупроводниковые реле и логические элементы.
47. Элементы сопротивлений и реостаты. Общие требования. Типы. Пакетные, конечные и путевые выключатели.

Содержание

1. Информация о дисциплине	3
1.1. Предисловие	3
1.2. Содержание дисциплины и виды учебной работы	4
2. Рабочие учебные материалы	5
2.1. Рабочая программа	5
2.2. Тематический план дисциплины	13
2.3. Структурно-логическая схема дисциплины	16
2.4. Временной график изучения дисциплины	16
2.5. Практический блок	17
2.6. Балльно-рейтинговая система	18
3. Информационные ресурсы дисциплины	19
3.1. Библиографический список	19
3.2. Опорный конспект	20
3.3. Методические указания к выполнению лабораторных работ	90
3.4. Методические указания к выполнению практических работ	111
4. Блок контроля освоения дисциплины	119
4.1. Задания на контрольные работы и методические указания к выполнению контрольных работ	119
4.2. Текущий контроль	129
4.3. Итоговый контроль	136