

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

М. С. Харитонов

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ АППАРАТЫ

Учебно-методическое пособие – локальный электронный методический
материал по изучению дисциплины для студентов бакалавриата
по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Калининград
Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ»
2023

УДК 621.316

Рецензент

кандидат технических наук, доцент кафедры энергетики
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»
И.Е. Кажекин

Харитонов, М. С.

Электрические и электронные аппараты: учеб.-методич. пособие по изучению дисциплины для студ. бакалавриата по направлению подгот. 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника / **М. С. Харитонов**. – Калининград: ФГБОУ ВО «КГТУ», 2023. – 69 с.

В учебно-методическом пособии по изучению дисциплины содержится рекомендации по изучению теоретического материала и самостоятельной подготовке, дано описание видов текущего контроля, критерии оценок и условия допуска к текущей и промежуточной аттестации.

Табл. – 12, рис. – 31, список литературы – 6 наименований

Локальный электронный методический материал. Учебно-методическое пособие. Рекомендовано к использованию в учебном процессе методической комиссией института морских технологий, энергетики и строительства 28.06.2023 г., протокол № 10

УДК 621.316

© Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Калининградский
государственный технический университет», 2023 г.
© Харитонов М. С., 2023 г.

Оглавление

Введение	4
1. Тематический план дисциплины	7
2. Содержание дисциплины.....	7
Тема 1. Назначение и классификация электрических аппаратов.....	7
Тема 2. Теория электрических контактов	12
Тема 3. Защитные аппараты до 1 кВ	25
Тема 4. Коммутационные аппараты свыше 1 кВ	31
Тема 5. Измерительные аппараты	45
Тема 6. Критерии выбора и проверки электрических аппаратов.....	52
Тема 7. Электронные аппараты.....	60
3. Методические указания по самостоятельной работе студентов	66
Заключение.....	67
Библиографический список.....	68

Введение

Дисциплина «Электрические и электронные аппараты» формирует у обучающихся способность и готовность применять знания функций и основных характеристик электрических и электронных аппаратов.

Целью освоения дисциплины является формирование у обучающихся знаний об электрических аппаратах управления и автоматики как средства управления режимами работы, защиты и регулирования параметров электротехнических и электроэнергетических систем.

Задачи изучения дисциплины:

- изучение классификации, назначения и особенностей применения электрических и электронных аппаратов;
- изучение конструкции и принципа действия электрических и электронных аппаратов;
- освоение методов расчета основных параметров электрических цепей, определяющих выбор аппаратов на объектах профессиональной деятельности;
- приобретения навыков эксплуатации и обслуживания электрических и электронных аппаратов;
- изучение принципов контроля и управления аппаратами в целях обеспечения заданных параметров технологического процесса;
- формирование умения обосновывать выбор и применять аппараты для защиты и контроля параметров электрических цепей на объектах профессиональной деятельности.

По завершении изучения дисциплины «Электрические и электронные аппараты» у обучающегося должны быть сформированы следующие компетенции:

знать: электрические аппараты, как средства управления режимами работы, защиты и регулирования параметров электротехнических и электроэнергетических систем; физические явления в электрических аппаратах и основы теории электрических аппаратов; существо задач анализа и синтеза узлов типовых электрических и электронных аппаратов;

уметь: выбирать состав оборудования в схемах электротехнических объектов и применять аппараты управления и автоматики в них;

владеть: методами расчета и выбора аппаратов управления и автоматики в схемах электротехнических объектов.

Текущая и промежуточная аттестация студентов

Для оценки результатов освоения дисциплины используются:

- оценочные средства текущего контроля успеваемости;
- оценочные средства для промежуточной аттестации по дисциплине.

К оценочным средствам текущего контроля успеваемости для студентов всех форм обучения относятся:

- тестовые задания;
- задания и контрольные вопросы по темам лабораторных работ;
- задания по расчетно-графической работе.

Тестовые задания используются для оценки уровня освоения тем дисциплины студентами. Тестирование обучающихся может проводиться аудиторно или дистанционно с использованием ЭИОС университета. По итогам выполнения тестовых заданий оценка выставляется по пятибалльной шкале в соответствии с критериями, представленными в таблице 1.

Задания и контрольные вопросы по лабораторным работам приведены в соответствующем учебно-методическом пособии.

Задания и методические указания по выполнению расчетно-графической работы приведены в соответствующем учебно-методическом пособии.

Промежуточная аттестация по дисциплине проводится в форме экзамена. Экзамен проходит в форме ответа на экзаменационные вопросы, содержащиеся в экзаменационном билете. Перечень вопросов к экзамену приведен в фонде оценочных средств дисциплины. Оценка за экзамен выставляется по пятибалльной шкале в соответствии с критериями, представленными в таблице 1. Допуск студентов к экзамену осуществляется при условии выполнения и защиты всех лабораторных работ и расчетно-графической работы с учетом результатов текущего контроля успеваемости.

Критерии оценивания результатов освоения дисциплины

Таблица 1 – Система оценок и критерии выставления оценки

Система оценок	2	3	4	5
	0-40 %	41-60 %	61-80 %	81-100 %
	«неудовлетворительно»	«удовлетворительно»	«хорошо»	«отлично»
	«не зачтено»	«зачтено»		
1 Системность и полнота знаний в отношении изучаемых объектов	Обладает частичными и разрозненными знаниями, которые не может научно корректно связывать между	Обладает минимальным набором знаний, необходимым для системного взгляда на изучаемый объект	Обладает набором знаний, достаточным для системного	Обладает полной знаний и системным взглядом на изучаемый объект

	собой (только некоторые из которых может связывать между собой)		взгляда на изучаемый объект	
2 Работа с информацией	Не в состоянии находить необходимую информацию, либо в состоянии находить отдельные фрагменты информации в рамках поставленной задачи	Может найти необходимую информацию в рамках поставленной задачи	Может найти, интерпретировать и систематизировать необходимую информацию в рамках поставленной задачи	Может найти, систематизировать необходимую информацию, а также выявить новые, дополнительные источники информации в рамках поставленной задачи
3. Научное осмысление изучаемого явления, процесса, объекта	Не может делать научно корректных выводов из имеющихся у него сведений, в состоянии проанализировать только некоторые из имеющихся у него сведений	В состоянии осуществлять научно корректный анализ предоставленной информации	В состоянии осуществлять систематический и научно корректный анализ предоставленной информации, вовлекает в исследование новые релевантные задачи данные	В состоянии осуществлять систематический и научно корректный анализ предоставленной информации, вовлекает в исследование новые релевантные поставленной задаче данные, предлагает новые ракурсы поставленной задачи
4. Освоение стандартных алгоритмов решения профессиональных задач	В состоянии решать только фрагменты поставленной задачи в соответствии с заданным алгоритмом, не освоил предложенный алгоритм, допускает ошибки	В состоянии решать поставленные задачи в соответствии с заданным алгоритмом	В состоянии решать поставленные задачи в соответствии с заданным алгоритмом, понимает основы предложенного алгоритма	Не только владеет алгоритмом и понимает его основы, но и предлагает новые решения в рамках поставленной задачи

Структура учебно-методического пособия

Структура учебно-методического пособия включает тематический план дисциплины, содержание каждой темы дисциплины, указания для самостоятельной работы студентов, библиографический список. По каждой теме дисциплины в учебно-методическом пособии приводятся: методические указания по проведению занятия, список рекомендуемой литературы и методические материалы к занятию.

1. Тематический план дисциплины

Темы занятий приведены в таблице 2. На изучение каждой темы дисциплины выделяется не менее 2 академических часов лекционных занятий. Общее количество лекционных занятий по дисциплине составляет 14 академических часов для очной формы и 2 академических часа для заочной формы обучения.

Таблица 2 – Разделы и темы занятий по дисциплине

№ п/п	Темы занятий по дисциплине
1	Тема 1. Назначение и классификация электрических аппаратов
2	Тема 2. Теория электрических контактов
3	Тема 3. Защитные аппараты до 1 кВ
4	Тема 4. Коммутационные аппараты свыше 1 кВ
5	Тема 5. Измерительные аппараты
6	Тема 6. Критерии выбора и проверки электрических аппаратов
7	Тема 7. Электронные аппараты

Примечание: Чтение лекций осуществляется традиционным способом с использованием технических средств обучения.

2. Содержание дисциплины

Тема 1. Назначение и классификация электрических аппаратов

Методические указания по проведению занятия:

Лекционное занятие предполагает связанное, последовательное представление материала в соответствии с новейшими данными науки и актуальными инженерно-техническими сведениями с целью изложения студентам основного содержания темы дисциплины в целостном, систематизированном виде. Форма проведения занятий и методы изложения материала, в том числе с использованием мультимедийных средств, определяются преподавателем из соображений обеспечения удобства и качества усвоения учебного материала.

В рамках лекционных занятий по данной теме дисциплины рассматриваются следующие ключевые вопросы:

1. Понятие электрических аппаратов
2. Основные требования к электрическим аппаратам
3. Режимы работы электрических аппаратов
4. Классификация электрических аппаратов

Рекомендуемая литература:

1. Попов, Е.В. Устройство и эксплуатация электрических аппаратов. Часть первая. Коммутационные электрические аппараты [Электронный ресурс]: конспект лекций / Е.В. Попов. - Электрон. текстовые данные. - Москва: Московская государственная академия водного транспорта, 2015. - 49 с.

Методические материалы к занятию:

Электрические аппараты – это электротехнические устройства для управления потоками энергии и информации, выполняющие следующие функции:

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

Требования к электрическим аппаратам разнообразны и зависят от назначения и условий эксплуатации, однако к общим требованиям относятся:

- поддержание температуры элементов в пределах класса изоляции;
- термическая и электродинамическая стойкость при аномальных кратковременных воздействиях тока;
- устойчивость электрической изоляции к перенапряжениям;
- способность контактов коммутировать токи рабочих режимов и кратковременно выдерживать токи аварийных режимов;
- обеспечение требуемой надежности, точности работы и быстродействия;
- минимизация массогабаритных показателей;
- минимизация стоимости;
- простота конструкции;
- удобство обслуживания;
- технологичность в производстве.

При производстве электрических аппаратов в зависимости от назначения отдельных частей аппаратов применяются различные материалы:

- проводниковые материалы – медь, алюминий, сталь, латунь и др.;
- ферромагнитные материалы – различного рода стали и сплавы для магнитопроводов;

- изоляционные материалы – для электрической изоляции токоведущих частей друг от друга и от заземленных частей (пвх, резина, пластмассы);
- дугостойкие изоляционные материалы – асбест, керамика, пластмассы для дугогасительных камер;
- сплавы высокого сопротивления – для изготовления различных сопротивлений;
- контактные материалы - серебро, медь, металлокерамика для обеспечения высокой износостойчивости контактов;
- биметаллы – применяются в автоматических аппаратах, использующих линейное удлинение тел при нагревании электрическим током;
- конструкционные материалы – металлы, пластмассы, изоляционные материалы для придания аппаратам и его деталям тех или иных форм и для изготовления деталей, преимущественное значение которых является передача и восприятие механических усилий.

Характерные режимы работы электрических аппаратов:

- восьмичасовой режим – главные контакты аппарата остаются замкнутыми, проводя установившийся ток достаточно долго, чтобы аппарат достиг теплового равновесия, но не более 8 ч без перерыва;
- продолжительный режим – главные контакты аппарата остаются замкнутыми, проводя установившийся ток без перерыва более 8 ч (в течение недель, месяцев);
- повторно-кратковременный режим – главные контакты аппарата остаются замкнутыми или разомкнутыми с определенной периодичностью, но аппарат при этом не достигает теплового равновесия (характеризуется значением тока и длительностью его прохождения, продолжительностью включения, представляющей собой отношение периода прохождения тока ко всему времени).
- кратковременный режим – главные контакты аппарата остаются замкнутыми в интервалы времени, недостаточные для достижения аппаратом теплового равновесия, которые чередуются с периодами нулевой нагрузки достаточной длительности, чтобы восстановить равенство температур с охлаждающей средой.
- периодический режим – регулярное повторение срабатывания происходит либо при постоянной, либо при переменной нагрузке.

Электрические аппараты представлены широким спектром технических средств, что обуславливает их многофакторную классификацию. Далее будут рассмотрены наиболее общие подходы к классификации электрических и электронных аппаратов.

Классификация по назначению:

- коммутационные - рубильники, переключатели, пакетные выключатели;
- защитные и ограничивающие (от перегрузок по току, перенапряжений, токов короткого замыкания) – автоматические выключатели, плавкие предохранители, разрядники, реакторы;
- пускорегулирующие (для пуска, регулирования скорости, напряжения и тока электрических машин) - реостаты, контакторы, магнитные пускатели;
- контролирующие (контроль заданных параметров электрической цепи, и подача сигнала или команды в случае их отклонения) - реле, датчики;
- регулирующие (автоматическая непрерывная стабилизация или регулирование заданного параметра электрической цепи, системы);
- аппараты для измерений (изолируют цепи измерительных и защитных приборов от силовой цепи, а также преобразуют измеряемую величину до стандартного значения, удобного для измерения) – измерительные трансформаторы тока и напряжения.

Классификация по принципу действия:

- электромеханические – содержат подвижные элементы, в результате перемещения которых осуществляется функционирование аппарата;
- статические (бесконтактные) или силовые электронные – не имеют подвижных частей и выполняют свою функцию путем изменения параметров и характеристик входящих в их состав элементов и блоков.

Классификация по напряжению:

- аппараты низкого напряжения (до 1000 В);
- аппараты высокого напряжения (свыше 1000 В)

Классификация по типу дугогасящей среды:

- воздушные;
- масляные;
- элегазовые;
- вакуумные.

Классификация по климатическому исполнению:

Климатическое исполнение согласно ГОСТ 15150-69 определяет климатическую зону и категорию размещения для нормальной работы электрического аппарата. Климатическое исполнение, как правило, указывается в последней группе знаков обозначений технических устройств.

Буквенная часть обозначает климатическую зону:

У – умеренный климат (-45...+40 °С);

ХЛ – холодный климат (-60...+40 °С);

УХЛ – умеренный и холодный климат (-60...+40 °С);

Т – тропический климат (+1...+40 °С);

М – морской умеренно-холодный климат (-40...+40 °С);

О – общеклиматическое исполнение (кроме морского) (-60...+50 °С);

ОМ – общеклиматическое морское исполнение (-40...+45 °С);

В – всеклиматическое исполнение (-60...+50 °С).

Следующая за буквенной цифровая часть означает категорию размещения:

1 – на открытом воздухе;

2 – под навесом или в помещении, где условия такие же, как на открытом воздухе, за исключением солнечной радиации, атмосферных осадков;

3 – в закрытом помещении без искусственного регулирования климатических условий;

4 – в закрытом помещении с искусственным регулированием климатических условий (вентиляция, отопление);

5 – в помещениях с повышенной влажностью, без искусственного регулирования климатических условий.

Классификация по степени защиты оболочки:

Степень защиты согласно ГОСТ 14254-2015 характеризует уровень безопасности, обеспечиваемый устойчивостью аппаратов к проникновению твердых предметов и воды при эксплуатации. Маркировка степени защиты оболочки аппаратов осуществляется при помощи международного знака защиты и двух цифр (IPXX), первая из которых означает защиту от попадания твёрдых предметов (таблица 1.1), вторая – от проникновения воды (таблица 1.2).

Таблица 1.1 – Степени защиты от проникновения твердых предметов

Цифра	Описание	Характеристика
0	Защита отсутствует	Специальная защита отсутствует
1	Защита от твердых тел размером более 50 мм	Защита от проникновения внутрь оболочки большого участка человеческого тела, например руки, и твердых тел размером свыше 50 мм
2	Защита от твердых тел размером более 12 мм	Защита от прохождения внутрь оболочки пальцев или предметов длиной не более 30 мм и твердых тел размером свыше 12 мм
3	Защита от твердых тел размером не более 25 мм	Защита от проникновения внутрь оболочки инструментов, проволоки и т.п. предметов толщиной более 2,5 мм и твердых тел, размером более 2,5 мм
4	Защита от твердых тел размером более 1x1 мм	Защита от проникновения внутрь оболочки проволоки и твердых тел размером более 1 мм
5	Защита от пыли	Проникновение внутрь оболочки пыли не предотвращено полностью, однако проникающая пыль не нарушает нормальную работу аппарата
6	Пыленепроницаемость	Проникновение пыли предотвращено полностью

Таблица 1.2 – Степени защиты от проникновения воды

Цифра	Краткое описание	Определение
0	Защита отсутствует	Специальная защита отсутствует
1	Защита от капель воды	Капли воды, вертикально падающие на оболочку, не должны оказывать вредного влияния на аппарат
2	Защита от капель воды при наклоне 15°	Капли воды, вертикально падающие на оболочку, не должны оказывать вредного влияния на аппарат при наклоне его оболочки на любой угол до 15° относительно нормального положения
3	Защита от дождя	Дождь, падающий на оболочку под углом 60°, не должен оказывать вредного действия на аппарат
4	Защита от брызг	Вода, разбрызгиваемая на оболочку в любом направлении, не должна оказывать вредного действия на аппарат
5	Защита от водяной струи	Струя, выбрасываемая на оболочку в любом направлении, не должна оказывать вредного действия на аппарат
6	Защита от волн	При волнении вода не должна проникнуть в оболочку в количестве, достаточном для повреждения аппарата
7	Защита при погружении в воду	Вода не должна проникать в оболочку, погруженную в воду, при определенных значениях давления и времени в количестве, достаточном для повреждения аппарата

Тема 2. Теория электрических контактов

Методические указания по проведению занятия:

Лекционное занятие предполагает связанное, последовательное представление материала в соответствии с новейшими данными науки и актуальными инженерно-техническими сведениями с целью изложения студентам основного содержания темы дисциплины в целостном, систематизированном виде. Форма проведения занятий и методы изложения материала, в том числе с использованием мультимедийных средств, определяются преподавателем из соображений обеспечения удобства и качества усвоения учебного материала.

В рамках лекционных занятий по данной теме дисциплины рассматриваются следующие ключевые вопросы:

1. Классификация электрических контактов
2. Сопротивление электрических контактов
3. Массоперенос в электрических контактах
4. Материалы электрических контактов
5. Неразмыкаемые контактные соединения

Рекомендуемая литература:

1. Попов, Е.В. Устройство и эксплуатация электрических аппаратов. Ч. 1. Коммутационные электрические аппараты [Электронный ресурс]: конспект лекций / Е.В. Попов. - Электрон. текстовые данные. - Москва: Московская государственная академия водного транспорта, 2015. - 49 с.

Методические материалы к занятию:

Классификация электрических контактов.

Электрический контакт – место перехода тока из одной токоведущей детали в другую. Электрические контакты являются неотъемлемой частью аппаратов и используются как для непосредственной коммутации электрических цепей, так и для подключения аппаратов к электрическим цепям.

По способу взаимодействия различают контакты:

- неразмыкаемые (болтовое соединение двух шин);
- скользящие (реостат, ЛАТР, щётки);
- коммутирующие (выключатели, контакторы).

По форме контакты разделяются на три группы (рисунок 2.1):

- точечные – контакт происходит в одной точке, при нажатии допускаются небольшие усилия, а для уменьшения сопротивления контактов применяют драгоценные металлы, не образующие окислы;
- линейные – условное контактирование происходит по линии, допускается большая степень нажатия, а контакты зачастую выполняются скользящими – цилиндр во время контактирования перемещается по плоскости, разрушая окислы и иные загрязнения.
- поверхностные – контактирование между двумя поверхностями, допускается высокая степень нажатия, благодаря чему в некоторых местах поверхность очищается от окислов.

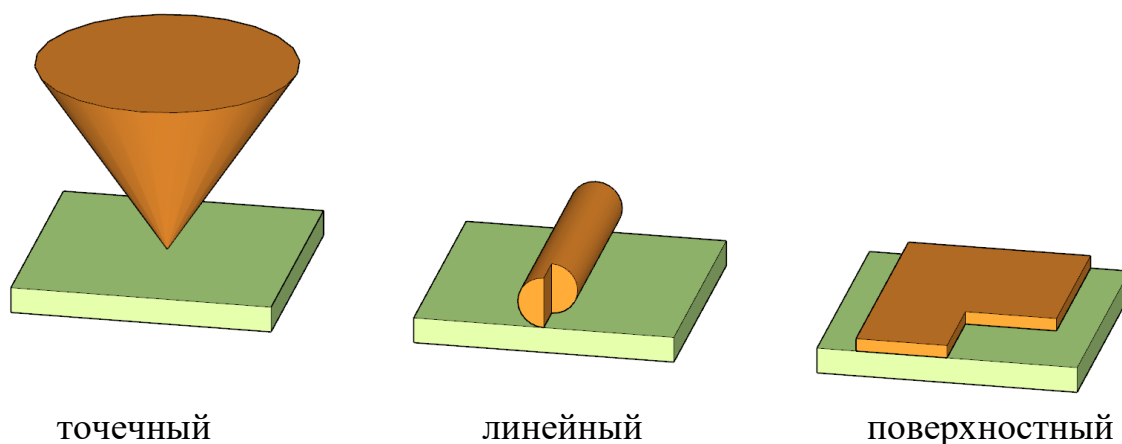


Рисунок 2.1 – Основные типы контактов

Точечные контакты применяются преимущественно при малых токовых нагрузках. В случае средних и больших токов применяются различные вариации линейных и поверхностных контактов, среди которых можно выделить типовые группы:

- Рычажные – применяется проскальзывание подвижного контакта по неподвижному для стирания окислов.

- Мостиковые – применяются для прямоходовых магнитных систем, контакт осуществляется в точке сфера-сфера.
- Консольно-пружинные – применяются в слаботочной аппаратуре, контакт осуществляется в точке сфера-сфера.
- Врубные – применяются в низковольтной аппаратуре (рубильники).
- Роликовые – используются в подвижных системах токосъёма.
- Торцевые – контактирование осуществляется по плоскости.
- Двухступенчатые – содержат главные контакты и дугогасящие контакты (замыкаются первыми и размыкаются последними, воспринимая воздействия дуги).

К основным измеряемым параметрам контактных соединений относятся:

- раствор – наименьшее расстояние между полностью разомкнутыми контактами, которое определяется условиями гашения дуги, родом и величиной электрического тока (рисунок 2.2);
- провал – расстояние, которое проходит до полной остановки подвижный контакт после первого соприкосновения с неподвижным, если неподвижный контакт убрать (прижатие и компенсация износа контактов);
- контактное нажатие – сила, сжимающая контакты деталей в месте их соприкосновения (момент первого соприкосновения контактов при нулевом провале характеризуется начальным прижатием, конечное прижатие соответствует полностью выбранному провалу).

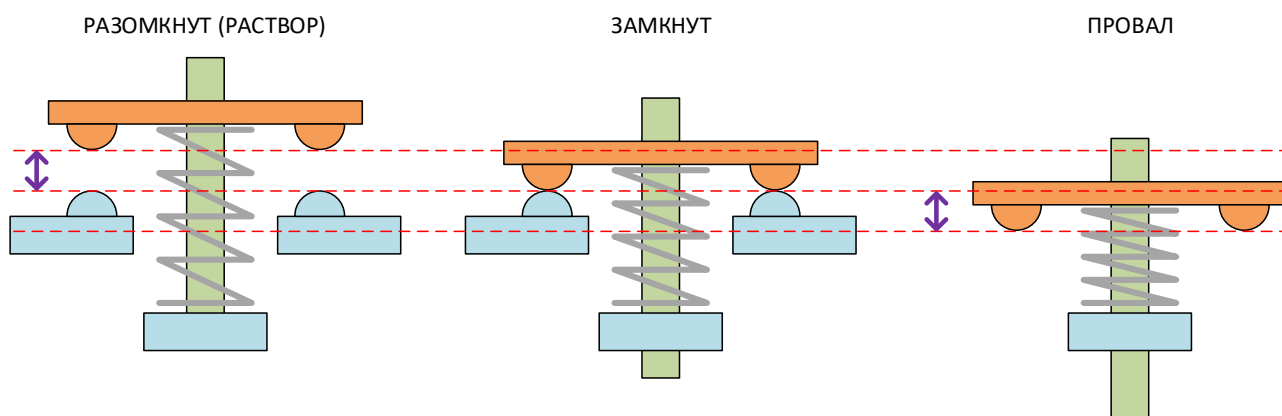


Рисунок 2.2 – Величина раствора и провала при работе мостикового контакта

Сопротивление электрических контактов.

Существование переходного сопротивления контактов обусловлено:

- наличием окисных плёнок на поверхности контактов;
- неполным соприкосновением всей площади контактных поверхностей при замыкании контактов (рисунок 2.3).

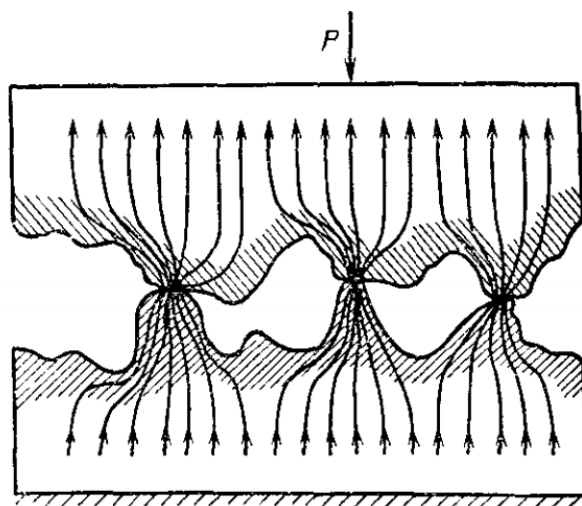


Рисунок 2.3 – Упрощенное изображение площади соприкосновения контактов

Вне зависимости от качества обработки рабочей поверхности контактов, электрический ток проходит между ними только в отдельных точках, где обеспечивается соприкосновение металлов двух контактов (рисунок 2.3). Под действием внешней силы контакты сжимаются, вершины выступов деформируются и образуются площадки действительного касания контактов. В результате стягивания линий тока к площадке касания их длина увеличивается, а сечение проводника, через которое фактически проходит ток, уменьшается, что вызывает увеличение сопротивления.

Сопротивление в области площади касания, обусловленное явлениями стягивания линий тока, называется переходным сопротивлением стягивания контакта. Суммарное сопротивление контактов состоит из сопротивления поверхностных плёнок и сопротивления стягивания. Для слаботочных контактов наибольшее влияние оказывает первая составляющая – $R_{пл}$, а для сильноточных вторая – $R_{ст}$.

$$R_k = R_{пл} + R_{ст} \quad (2.1)$$

Переходное сопротивление зависит от величины контактного нажатия:

$$R_k = \frac{K_0}{(0,102P_k)^m} \quad (2.2)$$

где P_k - величина контактного нажатия; m - показатель степени, зависящий от формы контактов (5,0 - для точечных, 5,0...8,0 - для линейных, 1 - для поверхностных); K_0 - коэффициент, зависящий от материала контактов (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Значение коэффициента K_0

Материал контакта	$K_0, \text{мкОм} \times \text{Н}^m$	Материал контакта	$K_0, \text{мкОм} \times \text{Н}^m$
Al–Al	3000-6000	Латунь–Сталь	3000
Al–Латунь	1900	Латунь–Латунь	670
Al–Cu	980	Cu–Cu	400
Al–Сталь	4400	Cu–Cu точечный	140–170
Сталь–Сталь	7600	Ag–Ag	60

С ростом контактного нажатия P_K уменьшается контактное переходное сопротивление R_K , т.к. увеличиваются контактные площадки (рисунок 2.4). При ослаблении контактного нажатия кривая пойдет в обратном направлении, сместившись ниже кривой возрастания R_K , что связано с деформацией материала контакта.

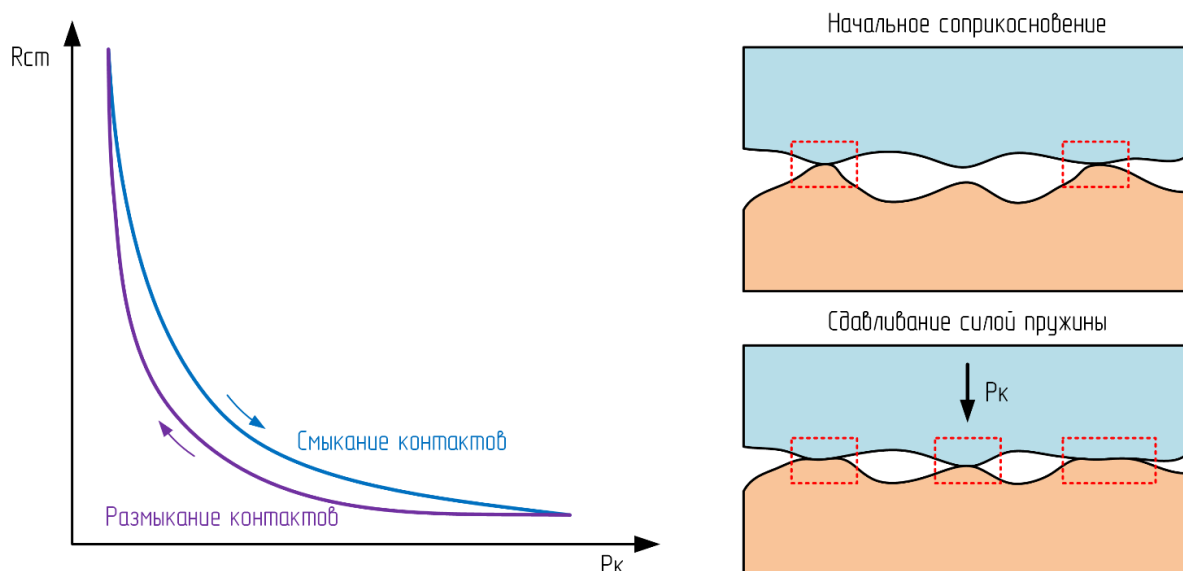


Рисунок 2.4 – Зависимость переходного сопротивления от силы прижатия

Переходное сопротивление контактов зависит от температуры:

$$R_K = R_{K0} \left(1 + \frac{2}{3} \alpha t \right) \quad (2.3)$$

где R_K – переходное сопротивление при температуре t ; R_{K0} – переходное при температуре $t = t_0$; α – температурный коэффициент переходного сопротивления.

График зависимости $R_K(t)$ состоит из следующих участков (рисунок 2.5):

- ① нарастание сопротивления при увеличении температуры $t_{кр}$, выше которой материал начинает размягчаться
- ② уменьшение сопротивления при температуре размягчения контактов и их смятия с увеличением площади контактов;

- ③ при дальнейшем повышении температуры (от температуры рекристаллизации t_p до температуры плавления $t_{пл}$ материала контактов) R_K будет возрастать;
- ④ при температуре плавления $t_{пл}$ контакты свариваются, и R_K падает до нуля

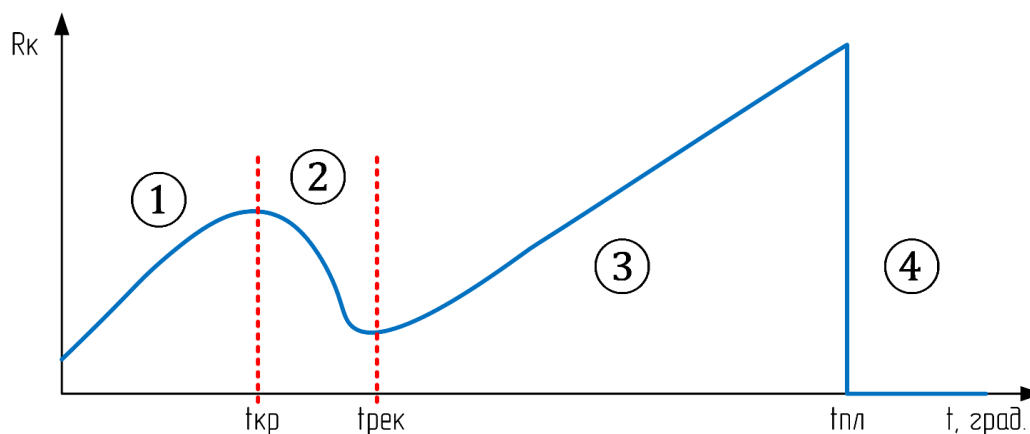


Рисунок 2.5 – Зависимость переходного сопротивления контакта от температуры в месте соприкосновения контактов

Переходное сопротивление зависит от состояния поверхности контактов. Шлифовка контактной поверхности увеличивает сопротивление. Контакты сильноточных аппаратов должны зачищаться только крупнозернистыми напильниками, но не наждачной бумагой, поскольку при тонкой шлифовке неровности на поверхности становятся более пологими и их смятие затрудняется.

Под воздействием кислорода воздуха, азота и иных химических соединений на поверхности контактов образуются различные пленки, из которых наиболее часто встречаются оксидные и сульфидные. При соответствующем нажатии на контакты пленки трескаются, продавливаются, и возникают очаги металлического контакта, число и площадь которых зависят от усилия нажатия.

Пленки имеют как отрицательное, так и положительное значение. В местах чисто металлического соприкосновения контактов развиваются большие силы межмолекулярного сцепления. При большой площади соприкосновения, которая могла образоваться при отсутствии пленок, контакты было бы невозможно оторвать друг от друга теми силами, которые характерны для контактных устройств электрических аппаратов.

При прохождении тока через контакт могут проявляться термоэлектрические эффекты, обусловленные взаимосвязью электрических и тепловых явлений в контакте. Они заключаются в переносе тепла носителями электрического тока и возникновении при прохождении тока через место контактирования проводников из разных материалов контактной разности потенциалов. Если электриче-

ское поле в контакте, создаваемое этой разностью потенциалов, ускоряет электроны, то в контакте выделяется тепло Пельтье, если же поле задерживает движение электронов, то это тепло поглощается. Термоэлектрические эффекты могут вызывать температурную асимметрию в контакте, они приобретают значение главным образом в слаботочных контактах.

Массоперенос в электрических контактах.

В замкнутом положении контакты находятся под некоторым давлением, поэтому при размыкании сила, сжимающая контакты, должна уменьшиться до нуля, после чего возникает перемещение подвижного контакта вплоть до разомкнутого состояния. При уменьшении силы сжатия площадка касания контакта уменьшается, сопротивление стягивания растет, увеличивается падение напряжения на контакте, температура площадки касания повышается в результате увеличения джоулевых потерь. Практически температура всегда достигает точки плавления, и некоторые участки расплавляются.

Перемещение подвижного контакта приводит к появлению жидкого металлического мостика. При движении контактов под действием механических усилий растягивания и процессов взрывного характера, обусловленных чрезвычайно интенсивным разогревом мостика до температуры кипения, мостик разрывается. Помимо указанных факторов, разрыву мостика способствуют и электродинамические силы, которые появляются при взаимодействии тока, проходящего через мостик с магнитным полем дугогасящей системы (специальных катушек), и всего контура тока.

После разрыва мостика при соответствующих условиях в промежутке между контактами могут возникать различные формы электрического разряда. Если и ток, и напряжение превышают минимально необходимые значения, то между контактами зажигается дуговой разряд.

Разрыв жидкометаллических мостиков, проскакивание искры и горение дуги являются причинами дугового износа контактов – их электрической эрозии. При электрической эрозии контактов наблюдаются перенос металла с одного электрода на другой и распыление металла в окружающее пространство.

Мерой износа контактов могут служить различные показатели. Для ряда конструкций контактных систем износ наиболее показательно характеризуется уменьшением остаточного хода контактов (провала). С уменьшением провала уменьшается сила контактного нажатия в замкнутом состоянии, увеличивается падение напряжения на контактах, растет температура пятна касания, поэтому контакты могут выйти из строя.

Для оценки стойкости материала контактов износ измеряют потерей количества (объема или массы) вещества на единицу количества электричества, про-

шедшего через межконтактный промежуток, или на одну выполненную операцию «включение-отключение». В последнем случае износ характеризует еще и условия коммутации, существующие в данной цепи.

Эрозия контактов под действием малых токов определяется мостиковой стадией и стадией искрового разряда. Мостиковая эрозия контактов обусловлена тем, что разрушение жидкого мостика происходит в результате распыления металла и разрыва мостика, но не в середине, а ближе к одному из электродов. Чаще всего мостики разрываются в зоне, расположенной вблизи анода (можно считать, что сам мостик состоит из металла анода и катода поровну). Вследствие несимметрии разрыва большая часть металла из мостика переходит на катод, т.е. износу подвергается только анод.

Как показывает опыт, одним из важнейших факторов, влияющих на износ контактов коммутационных аппаратов, является дуга, возникающая при размыкании контактов. Дуговой разряд вызывает оплавление и испарение материала контактов. Степень износа контактов за одну операцию отключения зависит от:

- величины тока дуги;
- длительности ее горения;
- скорости перемещения дуги по поверхности контактов;
- материала контактов;
- конструктивных особенностей аппарата.

При больших отключаемых токах и сравнительно редких операциях общий износ находится в прямой зависимости от числа отключений. При относительно малых токах и частых включениях износ за одну операцию может в сильной степени зависеть от частоты операций, поскольку с ней связана температура контактов, а следовательно, и активность окислительных процессов на поверхности.

Таким образом, механизм дугового износа может быть различным при различных значениях тока и частотах срабатывания. Следует иметь в виду, что в аппаратах высокого напряжения в процессе износа контактов значительную роль может играть и дуга включения, возникающая на контактах при их сближении под действием напряжения цепи. Определенное влияние на износ контактов оказывают дуги, возникающие при вибрации контактов при их замыкании (соударении). Такой износ контактов может иметь место в аппаратах как высокого, так и низкого напряжений, что обуславливает определённые требования к дугостойкости контактов (рисунок 2.6). На оси ординат отображены значения отношения объема износа к электрическому заряду, перемещенному между электродами за время существования электрической дуги.

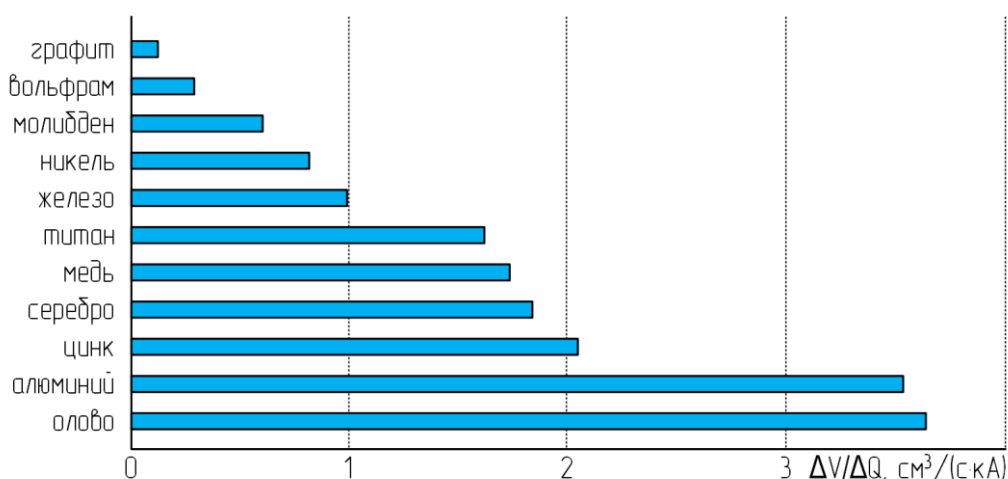


Рисунок 2.6 – Показатели дуговой стойкости контактов из различных материалов

Материалы электрических контактов.

В зависимости от условий функционирования на контакты оказываются различные по природе и интенсивности воздействия, что обуславливает широкий диапазон достаточно противоречивых требований к материалам электрических контактов. При этом каждый материал характеризуется совокупностью качеств, которая не может отвечать установленным критериям для всех возможных областей применения.

Основные показатели контактных материалов:

- электрические (электропроводность);
- тепловые (теплопроводность, теплоемкость, теплота испарения, теплота плавления, температуры плавления, кипения и рекристаллизации);
- химические (окисляемость, способность к образованию сульфидов);
- механические (плотность, прочность при растяжении и смятии, твердость);
- молекулярные (упругость паров, летучесть оксидов, растворимость газов);
- атомные (потенциал ионизации);
- электротехнические (стойкость к механическому износу, мостиковой, дуговой эрозиям, свариваемость, контактное сопротивление).

Электротехнические показатели определяются перечисленными выше физическими свойствами материалов, их структурой, конструктивным исполнением контактного узла, свойствами дугогасительной или искрогасительной системы, окружающей средой и, наконец, режимом работы контактов.

В качестве контактных материалов используются

- чистые металлы (медь, алюминий, серебро, золото, платина, палладий, родий, олово, вольфрам, молибден, кадмий и др.);
- сплавы (латунь, бронза, силумин, бериллиевая и кадмиевая бронза и др.);
- неметаллы (углерод);

- композиции взаимно не сплавляемых металлов (вольфрам–медь);
- композиции металлов с оксидами металлов (серебро–оксид кадмия, серебро–оксид меди, медь–оксид меди);
- композиции металлов с карбидами (вольфрам–карбид вольфрама);
- композиции металлов с углеродом (серебро–графит, медь–графит);

В конструктивном отношении удобнее всего изготавливать контакт-детали из того же материала, что и токопровод. Поэтому часто контакты изготавливают из меди. Если токопровод алюминиевый, то контакты изготавливают из алюминия. Соединительные контакты алюминиевых проводников всегда требуют периодического контроля в эксплуатации из-за возможного мало предсказуемого роста толщины окисной пленки. Из-за малой износостойкости и легкой окисляемости алюминий применяется только для соединительных контактов, в то время как медь также применяется и в коммутационных контактах.

Необходимость снижения температуры контактов, уменьшения требуемых усилий нажатия обуславливает применение в качестве контактных материалов металлов, обладающих высокой электропроводностью, в частности серебра.

Для исключения окисления и образования плохо проводящих оксидных, сульфидных и других пленок потускнения, в особенности для контактов различных аппаратов автоматики, приходится использовать благородные металлы: золото, платину, палладий. В контактах, рассчитанных на протекание больших токов, для снижения влияния пленок оксидов часто поверхности контакт-деталей покрывают слоем олова, которое менее подвержено окислению, чем медь, и мягче меди, что позволяет уменьшить необходимую силу сжатия деталей.

Наиболее сложным является выбор контактного материала при условии, что контакты подвержены механическому и электрическому износу. Поэтому часто в качестве контактных материалов используют различные сплавы металлов и композиции, получаемые на основе металлов и их оксидов. Металлооксидные и металлографитные композиции используются, когда к контактам предъявляются повышенные требования в отношении сваривания.

В некоторых случаях какое-то требование к контактам является столь важным, что приходится выбирать материал, обладающий заведомо плохими свойствами в отношении других требований. Примером может служить выбор контактного материала для вакуумных выключателей, где требуется, возможно, меньшая скорость испарения металла, возможно меньшее содержание газов, способность выдерживать высокие температуры отжига, являющегося необходимой технологической операцией для снятия внутренних механических напряжений. Такими свойствами обладает только вольфрам, который, однако, имеет высокую твердость и малую электропроводность, что вызывает необходимость создания большого контактного нажатия.

Неразмыкаемые контактные соединения

Чаще всего неразмыкаемые контактные соединения выполняются в виде двух плоских полос (шин), стянутых болтами (рисунок 2.7). Однако возможен ряд других конструкций: соединения двух цилиндрических проводников, расположенных в одну линию, соединение круглого проводника с плоским в одну линию или во взаимно перпендикулярном положении и т. д.

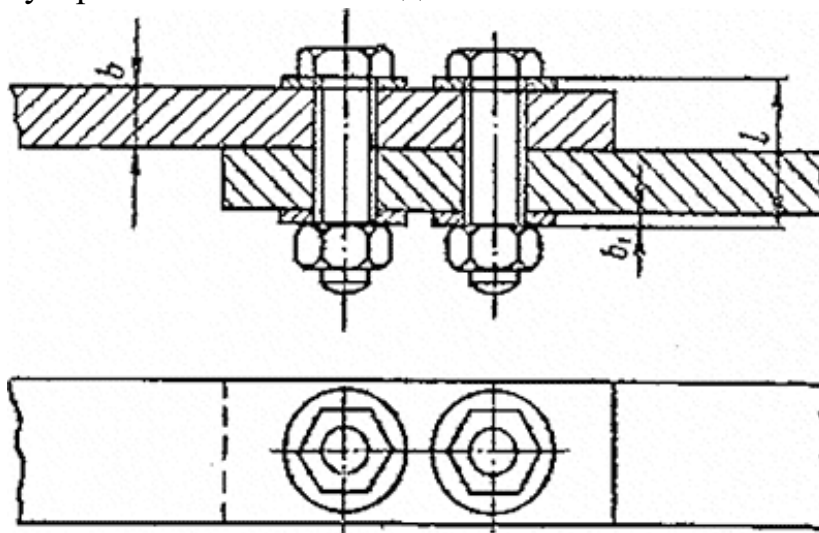


Рисунок 2.7 – Конструкция болтового контактного соединения

Особенностью неразмыкаемых контактов являются большие контактные давления, достигающие в некоторых случаях нескольких тонн. Главным образом неразмыкаемые контакты изготавливаются на основе контактных элементов из одинаковых металлов (медь-медь, алюминий-алюминий и т. д.), однако нередко встречаются и контактные соединения из разнородных металлов, например, медь-алюминий.

Величина полного переходного сопротивления неразмыкаемого контакта определяет интенсивность тепловыделений под действием электрического тока и формируется из непосредственного переходного сопротивления контакта R_{K1} и добавочного изменения сопротивления контакта R_{K2} за счет искривления линий тока при переходе тока из одной шины в другую (рисунок 2.8):

$$R_{K\Sigma} = R_{K1} + R_{K2} \quad (2.4)$$

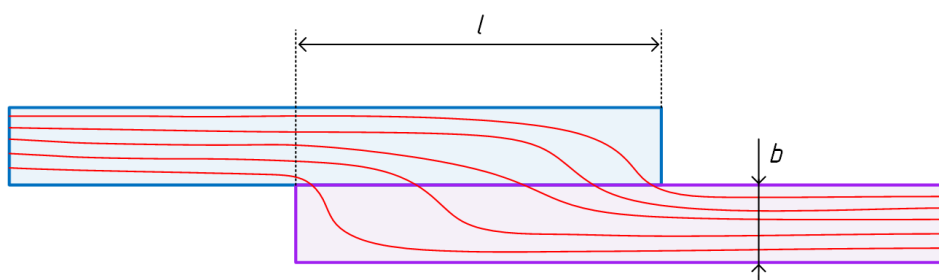


Рисунок 2.8 – Ход линий тока в неразмыкаемом контактном соединении

Сопоставление полного сопротивления контакта $R_{K\Sigma}$ и переходного сопротивления R_{K1} представлено на рисунке 2.9а. Сопротивление R_{K2} за счет искривления линий тока определяется с учетом типа контактного соединения (учитывается коэффициентом k_1 – рисунок 2.9б):

$$R_{K2} = k_1 \rho \frac{l}{q} \quad (2.5)$$

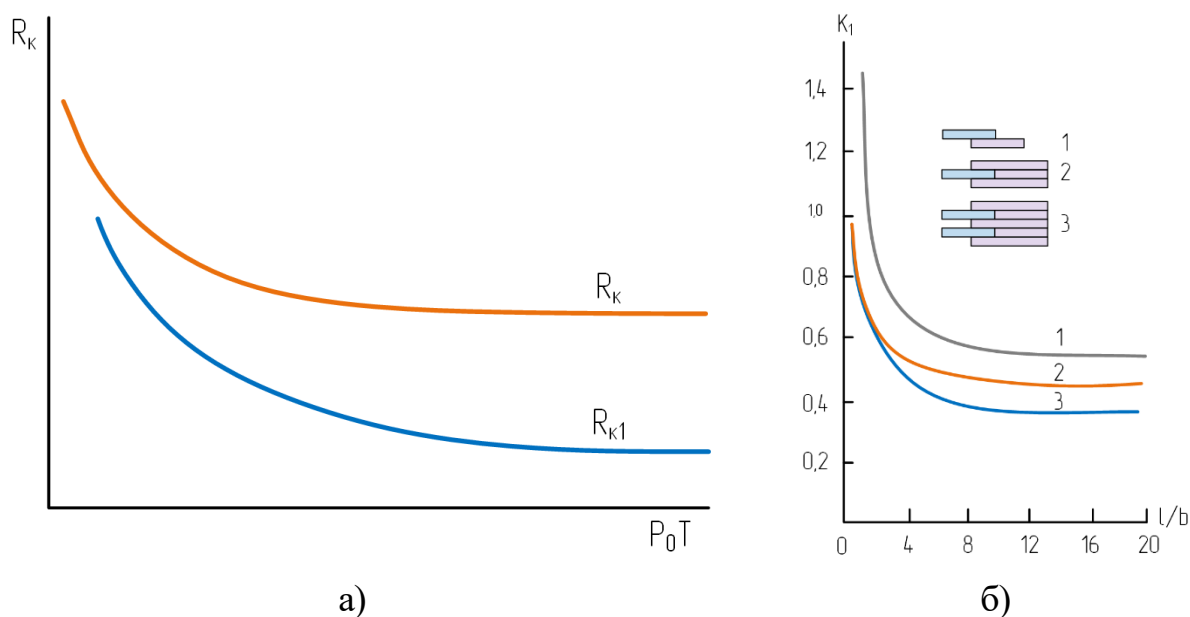


Рисунок 2.9 – Зависимость сопротивления контактного соединения от давления (а), зависимость коэффициента k_1 от типа контактного соединения (б)

Существенное влияние на величину переходного сопротивления оказывает состояние поверхности соединяемых шин. Если при размыкаемых контактных соединениях переходное сопротивление контактов изменяется главным образом за счет окисления контактных поверхностей, которые при необходимости можно удалить зачисткой контактов, то в случае неразмыкаемых контактных соединений это невозможно. Для предупреждения окисления контактных поверхностей приходится принимать специальные меры.

Чтобы обеспечить возможно большую неизменность переходного сопротивления неразмыкаемых контактных соединений, поверхность соединяемых элементов должна быть соответственным образом подготовлена. Обычно применяется обработка напильником или наждачной бумагой. Не рекомендуется шлифовка контактных поверхностей. Шлифовка сглаживает выступы на контактных поверхностях, и они труднее деформируются под влиянием контактного давления, значит медленнее падает переходное сопротивление контакта.

На величину переходного сопротивления контактов может влиять величина протекающего через него тока, что связано с повышением пластичности материала контактов при увеличении нагревания их током. В случае контактных соединений, где давления могут достигать нескольких тонн, токи, при которых R_K начинает падать, достигают очень больших величин.

Для поддержания устойчивости переходного сопротивления во времени контактные поверхности защищаются от окисления. В противном случае переходное сопротивление контакта со временем возрастет. Существенное возрастание R_K объясняется окислением поверхности контактов воздухом, проникающим через швы соединения. Для защиты контакта применяется заделка швов, препятствующая проникновению воздуха. При этом материалы должны обладать эластичностью для предотвращения растрескивания при переменах температуры контактного соединения.

Поверхность алюминия на воздухе быстро покрывается пленкой окиси (Al_2O_3), имеющей высокое удельное сопротивление. Несмотря на малую толщину (доли микрона), пленка заметно повышает переходное сопротивление контакта, а при дальнейшем увеличении толщины становится оксидной изоляцией. Во избежание этого алюминиевые контактные поверхности должны быть хорошо защищены от окисления. Зачистка под смазкой дает возможность удалить первоначальную слабую пленку окиси и предотвратить доступ воздуха к поверхности алюминия, препятствуя образованию новой пленки окиси.

Поскольку при производстве аппаратов применяются различные проводниковые материалы, то в конечном счете в электроустановках появляются контактные соединения из разных металлов. Наиболее часто встречается соединение меди с алюминием. Токоведущие части аппаратов в подавляющем большинстве случаев выполняются из меди, а шины распределительных устройств, к которым должны присоединяться аппараты, выполняются из алюминия. Коррозия контактов, составленных из разных металлов, идет быстрее, чем контактов из одинаковых металлов. В этом случае между ними возникает гальваническая пара. Если в зазор между контактами проникает влага, то один из контактных элементов, состоящий из менее благородного металла, будет разрушаться вследствие электрохимической коррозии. Электрохимический потенциал меди равен +0,52 В, а алюминия равен -1,34 В. Поэтому в паре медь-алюминий возникает разность потенциалов 1,86 В и алюминий будет разрушаться.

Борьба с коррозией в этом случае должна заключаться в защите контактного соединения от проникновения в него влаги. Покрытие поверхности алюминия гидрофобным материалом предохраняет контактное соединение, особенно при закраске швов влагостойким лаком. Иногда рекомендуют лужение как меди, так и алюминия, что ликвидирует образование опасной гальванической пары.

Тема 3. Защитные аппараты до 1 кВ

Методические указания по проведению занятия:

Лекционное занятие предполагает связанное, последовательное представление материала в соответствии с новейшими данными науки и актуальными инженерно-техническими сведениями с целью изложения студентам основного содержания темы дисциплины в целостном, систематизированном виде. Форма проведения занятий и методы изложения материала, в том числе с использованием мультимедийных средств, определяются преподавателем из соображений обеспечения удобства и качества усвоения учебного материала.

В рамках лекционных занятий по данной теме дисциплины рассматриваются следующие ключевые вопросы:

1. Автоматические выключатели
2. Дифференциальные защитные аппараты
3. Электромагнитные контакторы

Рекомендуемая литература:

1. Выбор и применение низковольтных электрических аппаратов распределения, управления и автоматики [Электронный ресурс]: справочное пособие / Е.Г. Акимов [и др.].- Электрон. текстовые данные. - Москва: Издательский дом МЭИ, 2016. – 344 с.

Методические материалы к занятию:

Автоматические выключатели.

Автоматический выключатель (автомат) – механический коммутационный аппарат, способный включать, проводить и отключать токи в нормальном состоянии цепи, а также включать, проводить в течение заданного времени и автоматически отключать токи в указанном аномальном состоянии цепи, например токи короткого замыкания. В автоматах не применяется специальная среда для гашения дуги.

Автоматический выключатели модульного исполнения (рисунок 3.1) состоит из следующих элементов: корпус автоматического выключателя; рычаг управления; верхняя и нижняя клеммы для подключения проводника; силовые контакты – неподвижные и подвижные; механизм взвода и расцепления; электромагнитный расцепитель для защиты от токов КЗ; тепловой расцепитель для защиты от токов перегрузки; дугогасительная камера, благодаря которой происходит быстрое гашение дугового разряда, образовывавшегося при размыкании контактов.

Электромагнитный расцепитель представляет собой электромагнит с подвижным сердечником, который работает как толкатель при превышении тока в защищаемой цепи заданного порогового значения. Тепловой расцепитель представляет собой биметаллическую пластину, скорость изгибания которой от теплового действия электрического тока зависит от величины тока в защищаемой цепи.



Рисунок 3.1 – Внешний вид воздушного автоматического выключателя при числе полюсов от одного до трех

Принцип работы автоматического выключателя (рисунок 3.2) состоит в следующем: во время взвода рычага управления автоматическим выключателем происходит движение механизма взвода и расцепления, а также коммутация подвижного контакта с неподвижным контактом. В нормальном режиме ток протекает в автоматическом выключателе от питающего провода или кабеля, подключенного к винтовому зажиму, через винтовой зажим по неподвижному, а затем и подвижному контактам. Далее ток проходит через гибкую связь, катушку электромагнита, гибкую связь, биметаллическую пластину и в конце через нижний винтовой зажим к отходящей линии на нагрузку. В случае возникновения короткого замыкания за выключение нагрузки отвечает электромагнитный расцепитель. При относительно большом превышении номинального тока, протекающего через обмотку, в катушке возникает сильное магнитное поле, которое приводит в движение якорь, а тот в свою очередь надавливает на рычажок спускового механизма, что приводит к его срабатыванию и отключению нагрузки. Необходимо отметить, что магнитное поле возникает мгновенно, поэтому автомат успевает отключиться до появления нежелательных последствий. Однако во время размыкания возможно возникновение дугового разряда между подвижным и неподвижным контактами. Дуга движется в сторону дугогасительной камеры. При попадании на пластины дуга разделяется, увлекается внутрь дугогасительной камеры и затухает. Продукты горения дуги и избыточное давление сбрасываются наружу через специальный канал в корпусе автомата. За защиту от перегрузки отвечает тепловой расцепитель. При превышении номинального тока происходит нагрев биметаллической пластины, которая постепенно изгибается и, достигнув определенного угла изгиба, надавливает своим кончиком на рычажок спускового механизма. Так происходит отключение автомата. В отличие от электромагнитного расцепителя, тепловой расцепитель более медлителен и не способен срабатывать за доли секунды. Однако он более точен и поддается тонкой настройке.

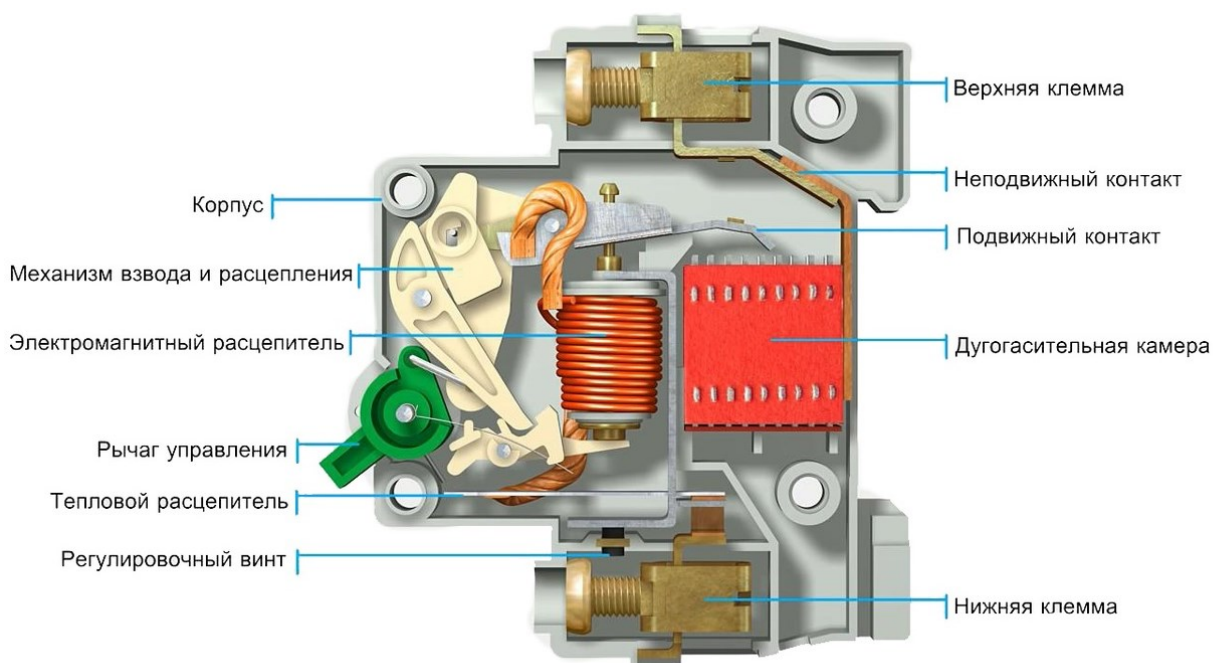


Рисунок 3.2 – Автоматический выключатели модульного исполнения

В зависимости от предельных значений токов срабатывания теплового (зависимого) и электромагнитного (мгновенного) расцепителей автоматы имеют разные времятоковые характеристики (рисунок 3.3), кратность токов срабатывания для которых установлена ГОСТ Р 50345-2010:

- Характеристика В применяется в таких сетях, где не предполагается существенных скачков тока – сети освещения и домовые сети общего назначения. Параметр срабатывания лежит в диапазоне $I_{срб} = (3...5) I_{ном}$;
- Характеристика С используется в общепромышленных сетях при наличии потребителей с умеренным значением пусковых токов. Параметр срабатывания лежит в диапазоне $I_{срб} = (5...10) I_{ном}$;
- Характеристика D предназначен для защиты сетей с потребителями, имеющими существенные пусковые токи, например, электродвигателей. Параметр срабатывания лежит в диапазоне $I_{срб} = (10...20) I_{ном}$.
- Характеристика А (для сетей большой протяжённости и для защиты полупроводниковых приборов $I_{срб} = (2...3) I_{ном}$.
- Характеристика К (для индуктивных нагрузок $I_{срб} = (10...14) I_{ном}$.
- Характеристика Z (для электронных устройств $I_{срб} = (2,4...3,5) I_{ном}$.

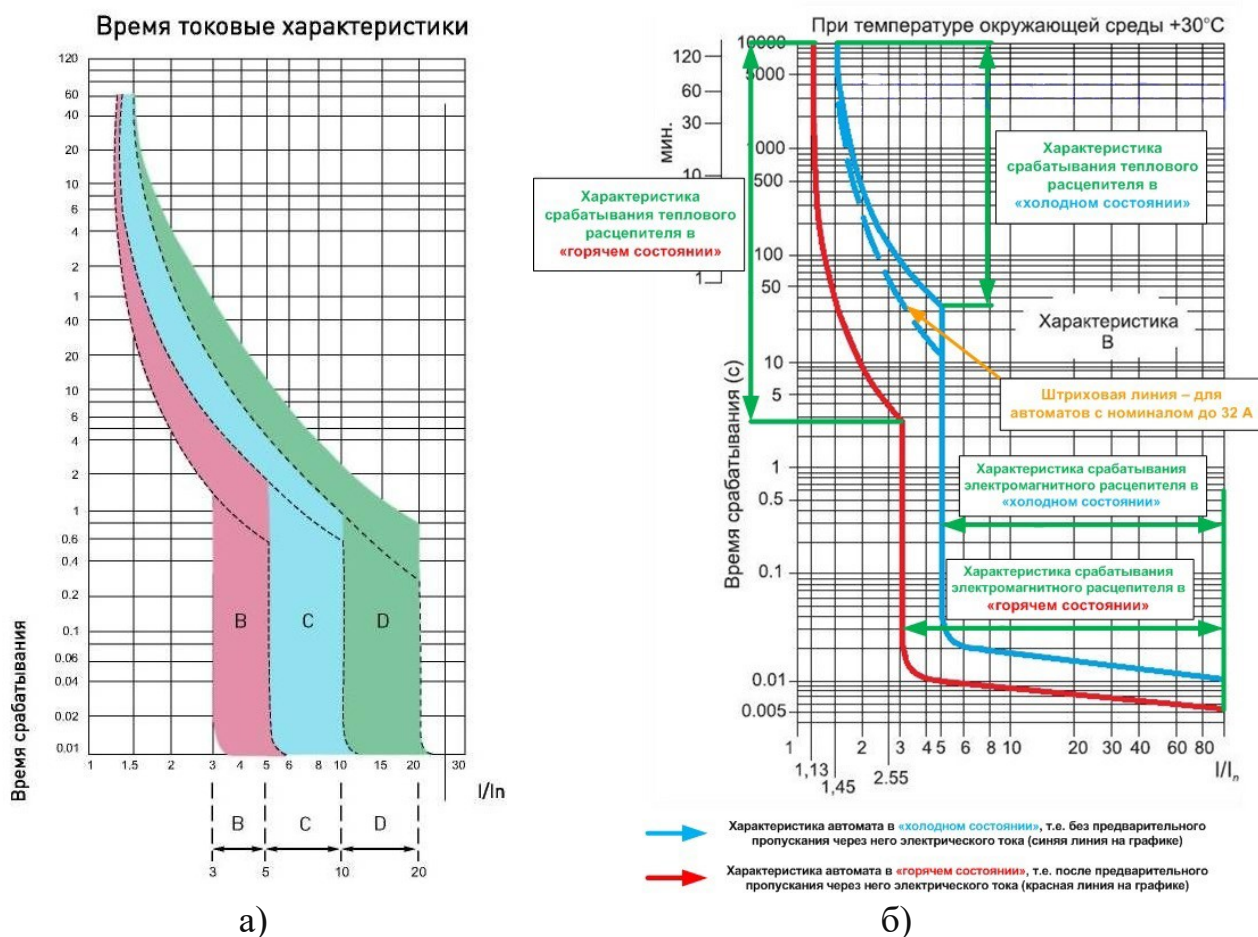


Рисунок 3.3 – Внешний вид (а) и анализ зон работы расцепителей (б) для время-токовых характеристик автоматических выключателей

Дифференциальные защитные аппараты.

К дифференциальным аппаратам относятся УЗО и дифавтоматы – устройства, срабатывающие при появлении в защищаемой цепи тока утечки (рисунок 3.4). Ток утечки может возникнуть вследствие повреждения изоляции на защищаемом участке и создания электрической связи между поврежденным проводником и землей, в частности в случае прикосновения человека к поврежденному оборудованию.

Устройство защитного отключения (УЗО) – механический коммутационный аппарат, предназначенный для включения, проведения и отключения токов при нормальных условиях эксплуатации, а также размыкания контактов в случае, когда значение дифференциального тока достигает заданной величины в определенных условиях. УЗО не защищает цепь от короткого замыкания или токов перегрузки.

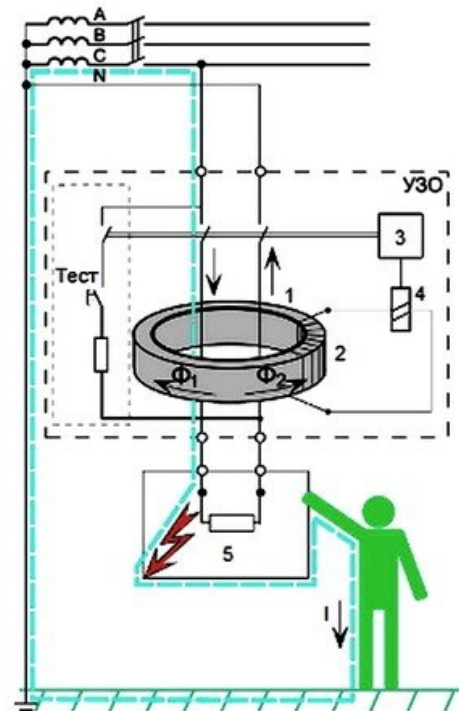
Дифференциальный автомат (дифавтомат) – коммутационный аппарат, сочетающий в себе функции автоматического выключателя и устройства защитного отключения. Дифавтомат обеспечивает защиту человека от поражения электрическим током, отключает токи короткого замыкания и защищает электрическое оборудование и проводники от токов перегрузки.



а)



б)



в)

Рисунок 3.4 – Внешний вид УЗО (а), дифавтомата (б) и принцип защитного действия дифференциальных аппаратов (в)

Работа дифференциальных аппаратов основана на сравнении тока на входе и выходе электрической цепи (фаза-ноли либо три фазы-ноль). Для этих целей может использоваться дифференциальный трансформатор тока (рисунок 3.4в), охватывающий все проводники. В нормальном состоянии электропроводки (без утечек) рабочий ток протекает по фазному и нулевому проводнику встречно-параллельно и наводит во вторичной обмотке трансформатора тока магнитные потоки ($\Phi_1 = \Phi_2$) одинаковой величины, которые компенсируют друг друга. В этот момент реле не срабатывает, т.к. ток вторичной обмотки трансформатора тока близок к нулю.

В случае прикосновения человека к токоведущим частям электроустановки появляется ток утечки. В этот момент нарушается величина токов, проходящих через трансформатор тока, поэтому во вторичной цепи трансформатора тока появится ток, которого будет достаточно для срабатывания реле. Реле приводит в работу пружинный механизм и происходит отключение аппарата.

Электромагнитные контакторы.

Контактор – двухпозиционный электромагнитный аппарат, предназначенный для частых дистанционных включений и выключений силовых электрических цепей в нормальном режиме работы.

В зависимости от области применения, рода тока, количества полюсов и величины коммутируемых токов встречаются различные конструкции контакторов. Однако в общем случае конструктивно контактор представляет собой основу, на которой смонтированы неподвижные контакты и электромагнитная катушка с подвижным якорем, который приводит в движение подвижные контакты (рисунок 3.5). При подаче напряжения на катушку контактор срабатывает и замыкает разомкнутые цепи. При снятии напряжения под действием возвратной пружины контактор возвращается в исходное состояние.

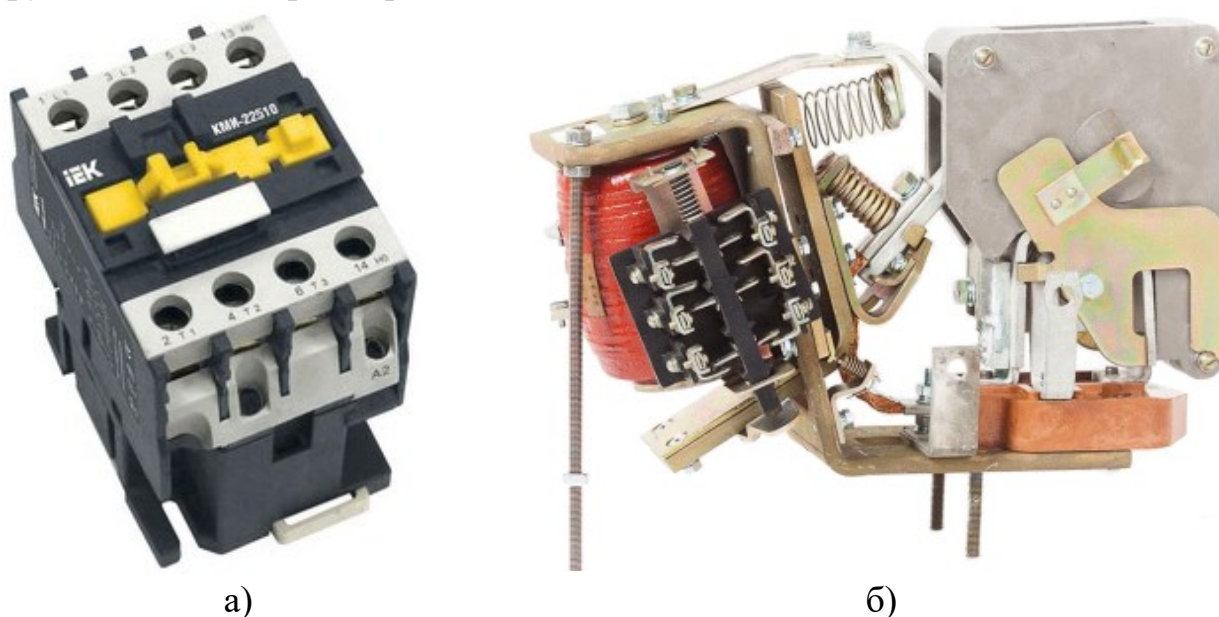


Рисунок 3.5 – Внешний контактора КМИ-22510 (а) и КПВ-604 (б)

Наиболее широко применяются одно- и двухполюсные контакторы постоянного тока и трёхполюсные контакторы переменного тока. К контакторам из-за частых коммутаций предъявляются повышенные требования по механической и электрической износостойкости. Контакторы как постоянного, так и переменного тока содержат: электромагнитную систему, контактную систему, состоящую из подвижных и неподвижных контактов, дугогасящую систему, систему блок-контактов (вспомогательные контакты, переключающие цепи сигнализации и управления при работе контакторов). В отличие от автоматических выключателей контакторы могут коммутировать только рабочие токи и не предназначены для отключения токов короткого замыкания.

Зачастую в литературе и разговорной речи по отношению к контакторам используется термин «пускатель», что является неправильным. Контакторы могут использоваться как элемент магнитного пускателя – комплексной системы, представляющей собой комбинацию всех коммутационных устройств, необходимых для пуска и остановки двигателя с защитой от перегрузок.

Тема 4. Коммутационные аппараты свыше 1 кВ

Методические указания по проведению занятия:

Лекционное занятие предполагает связанное, последовательное представление материала в соответствии с новейшими данными науки и актуальными инженерно-техническими сведениями с целью изложения студентам основного содержания темы дисциплины в целостном, систематизированном виде. Форма проведения занятий и методы изложения материала, в том числе с использованием мультимедийных средств, определяются преподавателем из соображений обеспечения удобства и качества усвоения учебного материала.

В рамках лекционных занятий по данной теме дисциплины рассматриваются следующие ключевые вопросы:

1. Классификация высоковольтных выключателей
2. Элегазовые выключатели
3. Вакуумные выключатели
4. Высоковольтные разъединители

Рекомендуемая литература:

1. Попов, Е.В. Устройство и эксплуатация электрических аппаратов. Ч. 1. Коммутационные электрические аппараты [Электронный ресурс]: конспект лекций / Е.В. Попов. - Электрон. текстовые данные. - Москва: Московская государственная академия водного транспорта, 2015. - 49 с.

Методические материалы к занятию:

Классификация высоковольтных выключателей.

Высоковольтный выключатель – коммутационный аппарат, предназначенный для оперативных включений и отключений отдельных цепей или электрооборудования в энергосистеме в нормальных или аварийных режимах при ручном, дистанционном или автоматическом управлении.

Высоковольтные выключатели классифицируются по ряду признаков:

По типу дугогасительной среды:

- газовые;
- вакуумные;
- воздушные;
- масляные;

- электромагнитные.

По способу размещения дугогасительного устройства:

- с дугогасительными устройствами, расположенными в заземленном корпусе (баковые выключатели)
- с дугогасительными устройствами, расположенными в корпусе (баке), находящемся под напряжением (колонковые выключатели).

По конструктивной связи между полюсами:

- трехполюсное исполнение с тремя полюсами в общем кожухе;
- трехполюсное исполнение с тремя полюсами на общем основании;
- однополюсное исполнение - с полюсами на отдельных основаниях.

По функциональной связи между полюсами:

- с функционально независимыми полюсами (на каждый полюс отдельный привод, отдельный дутьевой клапан и др.);
- с функционально зависимыми полюсами (на три полюса общий привод, общий дутьевой клапан и др.).

По виду привода в зависимости от рода используемой энергии:

- с приводом зависимого действия - электромагнитным, электродвигательным, непосредственно использующим электрическую энергию постоянного, переменного или выпрямленного тока;
- с приводом независимого действия - пневматическим, пружинным или гидравлическим, использующим предварительно запасенную потенциальную энергию сжатого газа или пружины.

По характеру конструктивной связи выключателя с приводом:

- с отдельным приводом, связанным с выключателем (или полюсом выключателя) механической передачей
- со встроенным приводом, являющимся неотъемлемой, конструктивно не выделенной, частью выключателя или полюса выключателя.

Высоковольтные выключатели характеризуются различными параметрами, из которых определяющее влияние на выбор изделия для заданных условий функционирования, как правило, имеют электротехнические характеристики:

- номинальное напряжение $U_{ном}$ определяется напряжением сети, в которой работает выключатель;
- номинальный ток $I_{ном}$ — ток через включённый выключатель, при котором он может работать длительное время;

- номинальный ток отключения $I_{откл.ном}$ – наибольший ток короткого замыкания (действующее значение), который выключатель способен отключить при напряжении, равном наибольшему рабочему напряжению;
- номинальный ток включения $I_{вкл.ном}$ – ток КЗ, который выключатель способен включить без приваривания контактов и других повреждений;
- устойчивость при сквозных токах КЗ характеризуется токами термической стойкости $I_{терм}$ и сквозным током электродинамической стойкости $I_{пр.скв}$.
- собственное время отключения – промежуток времени от момента подачи команды на отключение до момента начала расхождения дугогасительных контактов.

В настоящее время на объектах энергетики в эксплуатации находится широкая номенклатура высоковольтных выключателей 6-750 кВ. Однако при реконструкции и сооружении новых объектов применяются наиболее современные решения, к которым относятся вакуумные и элегазовые выключатели. Как правило, выбор делается в пользу вакуумных выключателей. Элегазовые выключатели применяются, если: в определённом классе напряжения отсутствуют вакуумные выключатели; коммутационной способности и стойкости вакуумных выключателей недостаточно для заданных условий; применение вакуумных выключателей экономически нецелесообразно. Распространение вакуумных выключателей обусловлено высокими эксплуатационными характеристиками вакуумных дугогасительных камер: высокой пробивной прочностью (рисунок 4.1) и малой энергией дуги (рисунок 4.2) в вакууме.

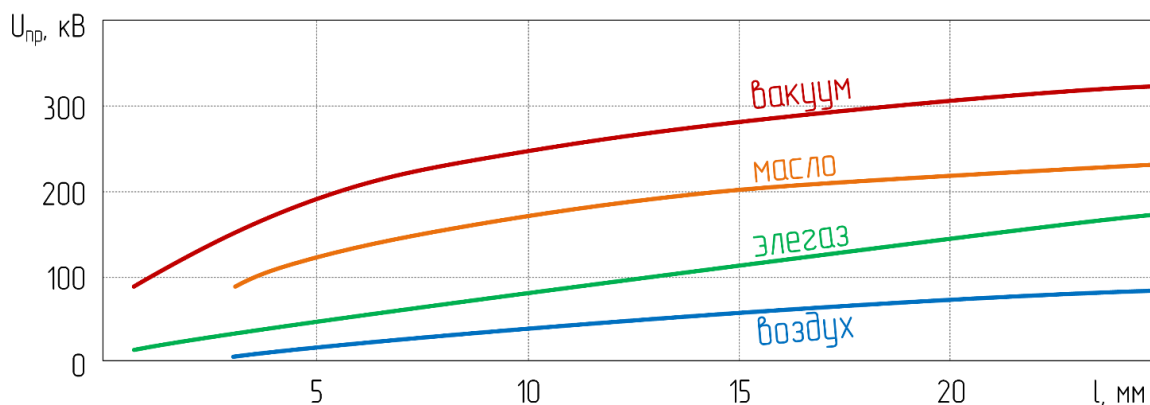


Рисунок 4.1 – Величина пробивного напряжения для различных сред

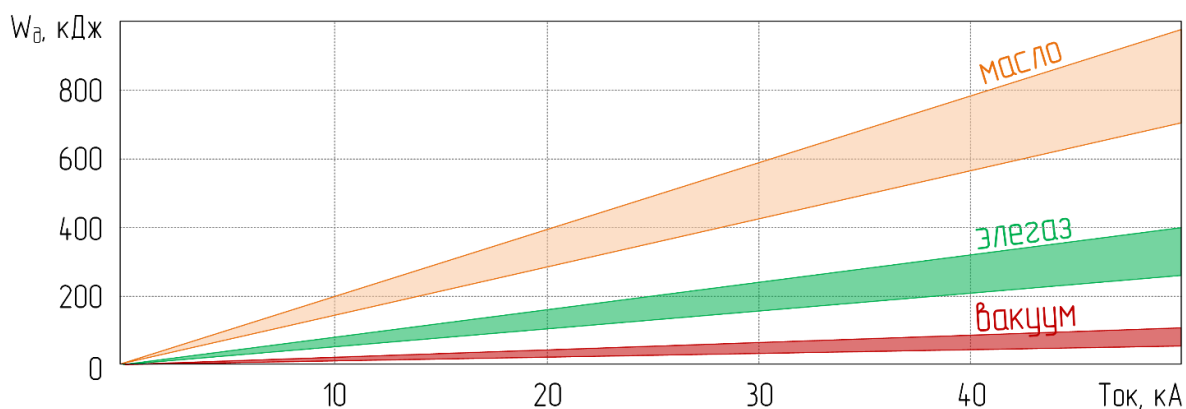


Рисунок 4.2 – Зависимость энергии дуги от тока отключения

В то же время на многих объектах продолжают эксплуатироваться (до вынужденной замены) масляные, маломасляные и воздушные выключатели. Данная тенденция справедлива как для закрытых распределительных устройств (РУ) среднего напряжения, так и для открытых РУ высокого напряжения.

Элегазовые выключатели.

В элегазовых выключателях в качестве газообразной изолирующей и дугогасящей среды применяется гексафторид серы (шестифтористая сера SF_6). Название «элегаз» (электротехнический газ) обусловлено высокими электроизолирующими свойствами. Элегаз является «электроотрицательным» газом, поскольку молекулы обладают способностью захватывать электроны, при этом образуются малоподвижные, тяжелые отрицательные ионы, которые медленно разгоняются электрическим полем. Благодаря этому элегаз обладает высокой электрической прочностью. Элегаз в шесть раз тяжелее воздуха, не имеет цвета, не горюч и обладает высокой химической инертностью – не взаимодействует с щелочами, кислотами, окислителями, восстановителями. За счет химической инертности допустимая температура медных контактов может быть увеличена с $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ (для воздуха) до $90\text{ }^{\circ}\text{C}$, что позволяет повысить токовую нагрузку аппарата.

Элегаз не токсичен и относится к малоопасным веществам, однако при разложении под действием электрической дуги способен формировать высокотоксичные соединения. Элегаз не пригоден для дыхания и при утечках в закрытых помещениях способен вызывать у персонала кислородную недостаточность. В связи с этим в закрытых распределительных устройствах с элегазовой изоляцией устанавливаются датчики превышения концентрации элегаза (по причине утечек из оборудования) с действием на сигнал и включение приточной вентиляции.

К недостаткам элегаза относится сравнительно высокая стоимость производства и сильное негативное воздействие на экологию. Элегаз является сильнейшим парниковым газом и регламентируется Киотским протоколом, что обуславливает особые требования к утилизации газонаполненного оборудования. В

результате по совокупности экологических и технических преимуществ происходит замещение элегазовых выключателей вакуумными.

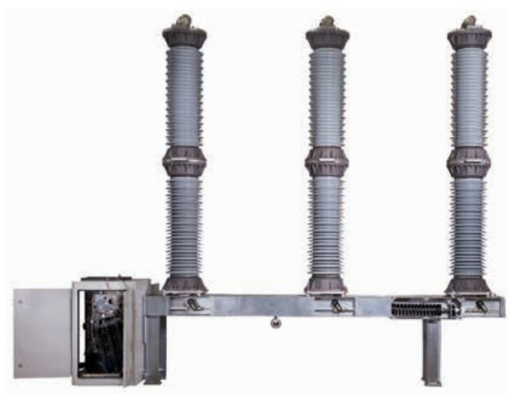
В настоящее время элегазовые выключатели применяются в РУ 35 кВ и выше. К основным достоинствам элегазовых выключателей относятся: возможность применения на любое из напряжений; небольшие масса и габаритные размеры; бесшумная работа привода; высокая коммутационная способность; пожаробезопасность. Применение элегаза вместо масла и сжатого воздуха позволяет в 2-2,5 раза повысить параметры дугогасящих устройств и в 2 раза сократить их количество в выключателях 220-1150 кВ, уменьшить габариты и массу аппаратов, значительно повысить надежность их работы и снизить эксплуатационные расходы за счет увеличения межремонтного периода до 15 лет.

К недостаткам элегазовых выключателей относится: большая стоимость, высокие требования к качеству элегаза; работоспособность выключателя зависит от температуры окружающей среды и при понижении выключатель может отказать из-за перехода элегаза в жидкую фазу.

Наиболее эффективно используется дугогасящая способность элегаза в том случае, когда струя газа с большой скоростью омывает горящую дугу. В настоящее время применяются следующие конструктивные исполнения выключателей:

- с автопневматическим дутьем – принудительное дутье создается за счет энергии отключающих пружин;
- с движением дуги в газе за счет взаимодействия дуги с магнитным полем;
- с гашением дуги за счет интенсивного дутья, создаваемого при переходе газа из резервуара с высоким давлением в резервуар с низким давлением.

По конструкции различают колонковые и баковые выключатели (рисунок 4.3). Колонковые визуально и по размерам принципиально не отличаются от маломасляных. Баковые элегазовые выключатели имеют гораздо меньшие габариты по сравнению с масляными, имеют один общий привод на три полюса, встроенные трансформаторы тока.



Колонковый ВГП-110



Баковый ВБ-110

Рисунок 4.3 – Элегазовые выключатели колонкового и бакового исполнения

У элегазовых колонковых выключателей дугогасительная камера расположена в изоляторе, который может быть изготовлен из фарфора или из комбинированного материала и находится под высоким напряжением, уровень которого определяет длина изолятора, требуемая для камеры (рисунок 4.4). Для изоляционной конструкции высокого уровня напряжения (330 кВ и выше) несколько дугогасительных камер соединяются последовательно в элегазовом колонковом выключателе и монтируются на изоляционной конструкции. Трансформаторы тока устанавливаются отдельно, перед или за элегазовым колонковым выключателем. Отличительной особенностью колонковых выключателей является наличие сравнительно маленькой газовой камеры. Преимущество малого объема газа приводит к сокращению объема работ по техническому обслуживанию.

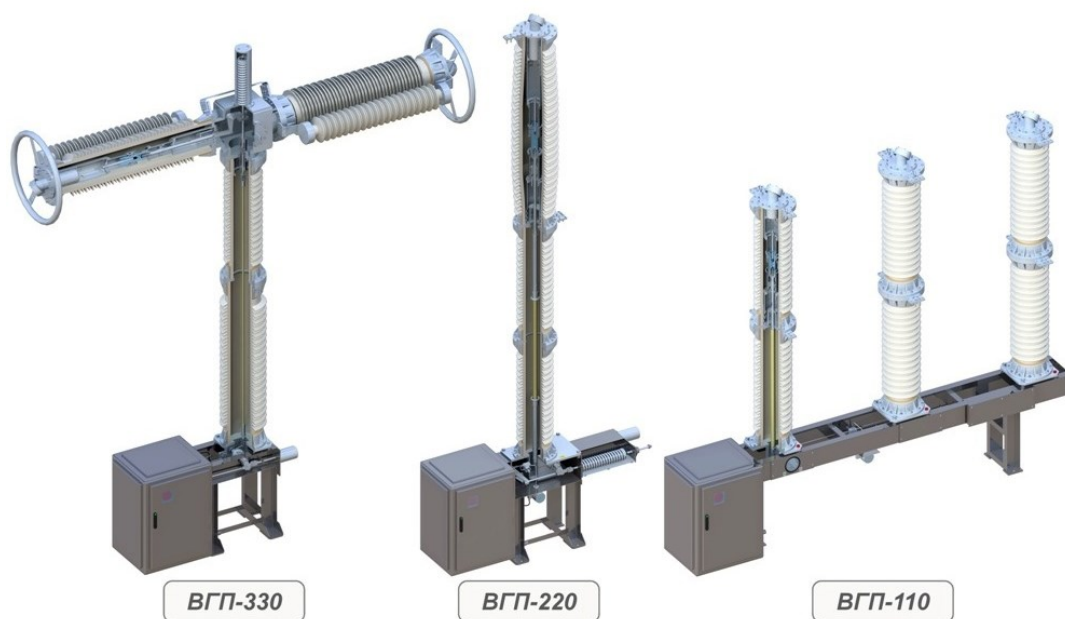


Рисунок 4.4 – Колонковые элегазовые выключатели на различное напряжение

Характерным признаком элегазовых баковых выключателей является расположение дугогасительной камеры в заземленном металлическом корпусе (рисунок 4.5). Благодаря такой конструкции, имеющийся внутри элегаз, изолирует все токоведущие части контактной группы от корпуса. Подключение к высокому напряжению происходит через ввод, также наполненный элегазом. Трансформаторы тока укрепляются непосредственно на вводном изоляторе, благодаря чему отпадает необходимость их отдельной установки. Элегазовый баковый выключатель имеет преимущества в том случае, если для защиты конструкции требуется применение нескольких трансформаторов тока на один полюс выключателя.



Рисунок 4.5 – Разрез полюса элегазового бакового выключателя ВБ-110

Принцип работы дугогасительных камер колонкового и бакового выключателей идентичен. Камера наполнена элегазом под давлением и состоит из неподвижного контакта, сопла, подвижного контакта, компрессионного цилиндра и закрепленного плунжера (рисунок 4.6). Во время операции «Отключение» подвижный контакт вместе с компрессионным цилиндром опускается вниз. Сначала размыкается главный контакт и ток течет через остающийся закрытым дугогасительный контакт. Затем неподвижный и подвижный дугогасительные контакты расходятся и между ними возникает электрическая дуга.

Движение компрессионного цилиндра сжимает элегаз к закрепленному плунжеру, создавая таким образом мощный поток элегаза над дугой. После достижения некоторого расстояния между контактами за счет потока элегаза существенно увеличивается диэлектрическая прочность разрыва, вследствие чего гасится дуга. Надежность системы еще более увеличивается с использованием однократного разрыва дуги и противоположного движения элегаза с его распылением, которые уменьшают количество подвижных элементов и вспомогательных систем в выключателе.

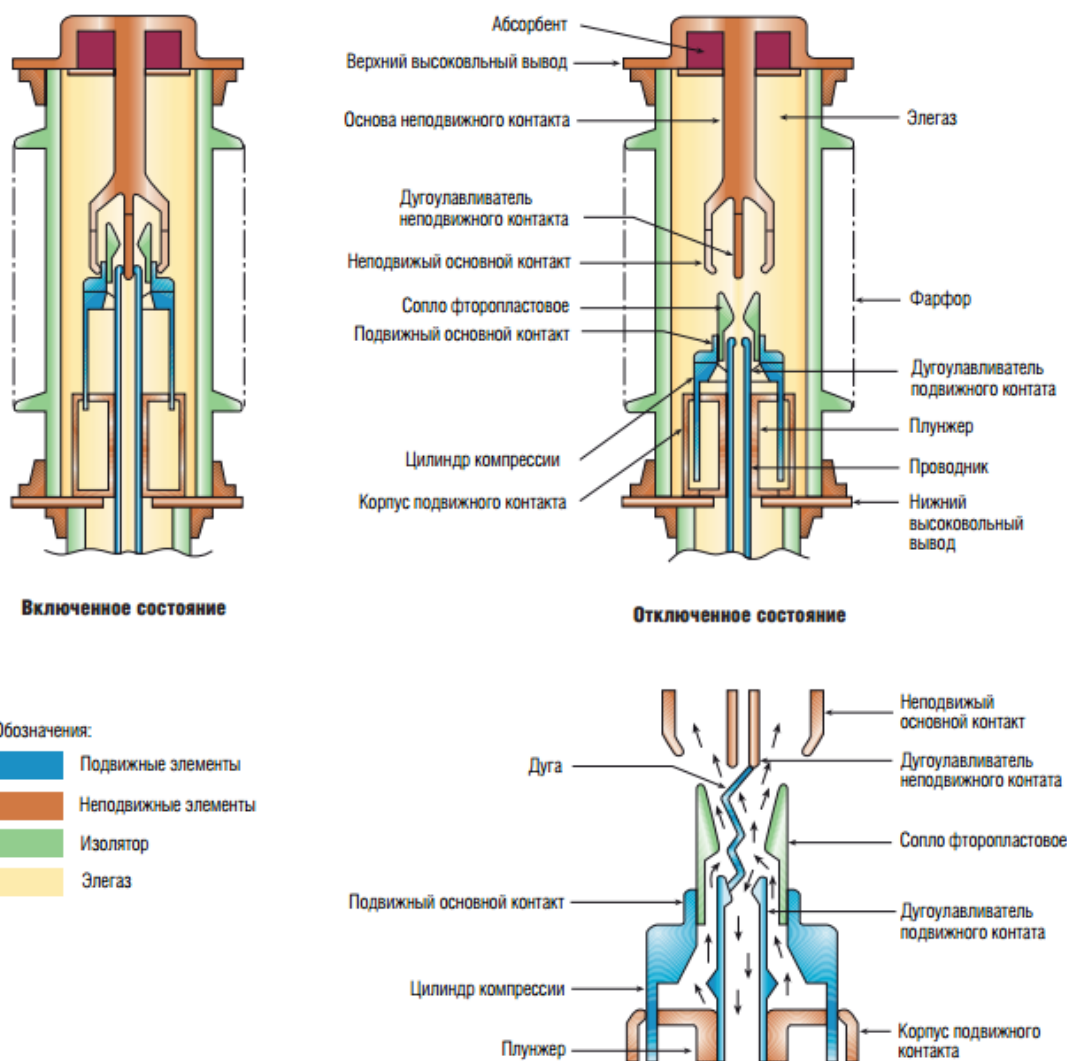


Рисунок 4.6 – Дугогасительная камера элегазового выключателя

Приведение в действие высоковольтного выключателя, в частности, может, осуществляется на принципе пружины, используемой в качестве источника механической энергии при срабатывании. Преимущества пружинного привода:

- наивысшая степень эксплуатационной надежности, простота конструкции с небольшим количеством подвижных частей;
- благодаря автокомпрессионному принципу дугогасительной камеры требуется небольшое приводящее усилие;
- пружинные механизмы постоянно находятся в состоянии рабочей готовности и характеризуются длительным сроком эксплуатации: минимальные нагрузки на пружину и подшипники качения обеспечивают надежную и неразрушающую передачу усилий;
- пружинный механизм не требует технического обслуживания: привод для завода пружины содержит износостойкие шестерни, детали привода не испытывают нагрузки в течение времени между операциями.

Вакуумные выключатели.

В настоящее время вакуумные выключатели стали доминирующими аппаратами для электрических сетей напряжением 6-35 кВ, постепенно внедряются в сети 110 кВ, также имеются первые разработки для сетей 220 кВ (рисунок 4.7). Недостатками вакуумных выключателей является небольшие токи отключения и возможность коммутационных перенапряжения при отключении малых индуктивных токов, когда погасание дуги в камере происходит до естественного перехода тока через нуль.

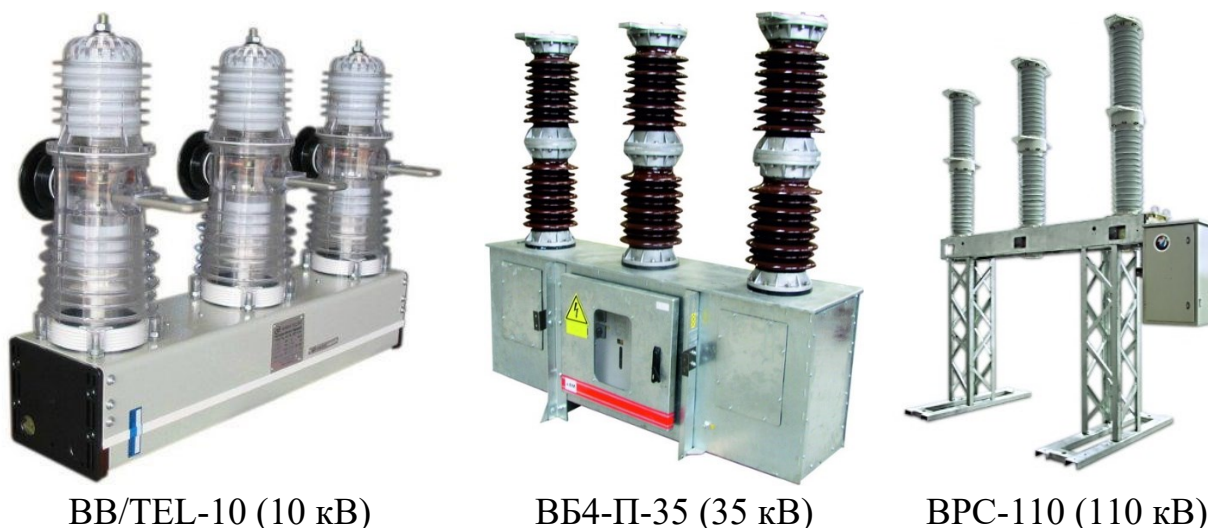


Рисунок 4.7 – Вакуумные выключатели на различные номинальные напряжения

В основе вакуумных выключателей лежит вакуумная дугогасительная камера (ВДК). Электрическая прочность вакуума значительно выше прочности других сред, применяемых в выключателях. Объясняется это увеличением длины среднего свободного пробега электронов, атомов, ионов и молекул по мере уменьшения давления. В вакууме длина свободного пробега частиц превышает размеры вакуумной камеры.

Во время отключения выключателя при расхождении контактов площадь их соприкосновения быстро уменьшается, поэтому температура в точке соприкосновения за счет проходящего тока резко повышается, образуется мостик из расплавленного металла. За очень короткое время этот мостик нагревается и испаряется. В среде паров металла загорается дуга. Вследствие глубокого вакуума происходит быстрая диффузия заряженных частиц в окружающее пространство. При переходе тока через нуль дуга гаснет. Примерно через 10 мкс между контактами восстанавливается электрическая прочность вакуума. Пары металла осаждаются на стальных экранах, предохраняющих стеклянный корпус камеры от загрязнения. Для уменьшения испарения контактов применяются контактные наконечники из тугоплавких металлов.

Путем откачки воздуха через специальный ниппель в камере достигается давление около 10 Па. Все соединения частей камеры выполняются вакуумно-плотными швами. За счет испарения контактов при отключении происходит ухудшение вакуума, но если контакты выполнены из тугоплавкого металла, то камера может выдержать большое число отключений.

Корпус ВДК (рисунок 4.8) состоит из двух керамических изоляторов 2 и 6 и медного экрана 4, припаиваемого к изоляторам. Конструктивными особенностями ВДК являются чашеобразная форма керамических изоляторов и сварной сиффон 7, значительно снизившие вес и габариты ВДК. Сиффон припаивается к изолятору 6 и выводу 8, обеспечивая возможность перемещения подвижного контакта 5 без нарушения герметичности ВДК. На торцевые части неподвижного 3 и подвижного 5 контактов припаяны пластины из металлокерамики, обеспечивающие им высокую износостойкость. Выводы 1 и 8 служат для соединения с выводами выключателя.



Рисунок 4.8 – Конструкция вакуумной дугогасительной камеры

Вакуумный выключатель состоит из трех полюсов, установленных на металлическом основании, в котором размещены пофазные электромагнитные приводы с магнитной защелкой, удерживающей выключатель неограниченно долго во включенном положении после прерывания тока в катушке электромагнита привода. Остальные узлы полюсов размещаются в изоляционном корпусе из прозрачного механически прочного и дугостойкого полимерного материала, который предохраняет их от возможных в эксплуатации механических повреждений и воздействий электрической дуги тока короткого замыкания (рисунок 4.9).

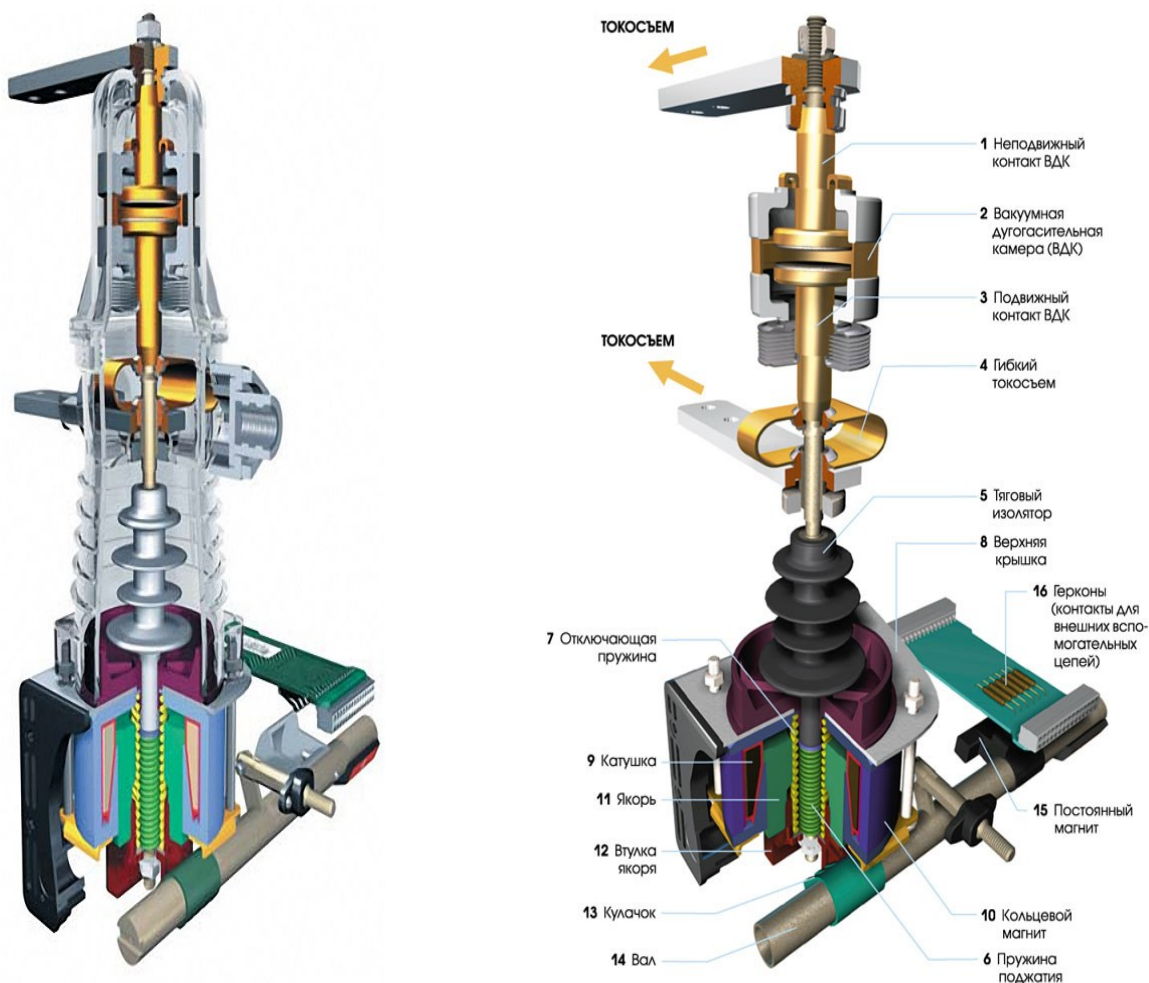


Рисунок 4.9 – конструкция полюса вакуумного выключателя ВВ/TEL-10

Для включения выключателя командой от блока управления подается постоянное напряжение на катушку электромагнита 9. Под действием электромагнитных сил якорь 11 начинает двигаться вверх и через пружину поджатия 6 заставляет двигаться тяговый изолятор 5 и подвижный контакт 3, сжимая при этом пружину отключения 7. После замыкания контактов 1 и 3 якорь продолжает двигаться еще 2 мм до упора, сжимая пружину 6 и создавая необходимое поджатие между контактами выключателя в вакуумной дугогасительной камере. Общий ход якоря составляет 8 мм, а ход подвижного контакта 6 мм. После снятия напряжения якорь остается во включенном положении благодаря остаточной индукции в электромагните.

При отключении выключателя командой от блока управления на катушку 9 подается напряжение противоположной полярности, чем при включении. Магнит 10 при этом частично размагничивается, якорь 11 снимается с магнитной защелки и под действием пружин 6 и 7 перемещается совместно с подвижными частями выключателя в отключенное положение. В этом положении они удерживаются силой отключающей пружины 7. Ручное отключение осуществляется

воздействием на кнопку ручного отключения, которая через толкатель, шарнирно связанный с валом 14, и через кулачок 13 с якорем 11, срывает якорь с магнитной защелки и отключает выключатель.

Высоковольтные разъединители.

Разъединитель – контактный коммутационный аппарат, предназначенный для размыкания и замыкания электрической цепи без тока (предварительно отключенной выключателем) или с незначительным током с целью создания видимого разрыва между токоведущими частями, остающимися под напряжением, и аппаратами, выведенными в ремонт. Разъединители не предназначены для отключения токов нагрузки, поскольку их контактная система не имеет дугогасительных камер и в случае ошибочного отключения токов нагрузки возникнет устойчивая дуга, которая приводит к междуфазному замыканию.

Помимо основного назначения конструкция разъединителей позволяет использовать их для ряда коммутационных операций:

- отключение и включение ненагруженных силовых трансформаторов и линий ограниченной длины при строго установленных условиях;
- переключение присоединений распределительных устройств с одной системы сборных шин на другую без прерывания тока;
- заземление отключенных и изолированных участков системы с помощью вспомогательных ножей, предусматриваемых для этой цели.

Разъединители имеют относительно простую конструкцию. Обязательным является наличие в положении «отключено» видимого разрыва в воздухе, создающего уверенность в том, что рассматриваемый участок действительно отключен, изолирован от смежных частей. Отечественные и зарубежные аппаратостроительные заводы изготавливают разъединители самых разнообразных конструкций, которые можно классифицировать по различным признакам. Однако наибольшее конструктивное различие между отдельными типами разъединителей состоит, прежде всего, в характере движения подвижного контакта (ножа).

По конструкции и характеру движения ножей различают разъединители:

- вертикально-рубящего типа с вращением ножа в плоскости, параллельной осям поддерживающих изоляторов данного полюса (рисунок 4.10);
- горизонтально-поворотного (поворотного) типа, с вращением ножа в плоскости, перпендикулярной осям поддерживающих изоляторов данного полюса (рисунок 4.11);
- качающегося типа с вращением ножа совместно с поддерживающим его изолятором в плоскости, параллельной осям поддерживающих изоляторов данного полюса (рисунок 4.12);

- полупантографного типа с горизонтальным разрывом;
- пантографного типа с вертикальным разрывом;

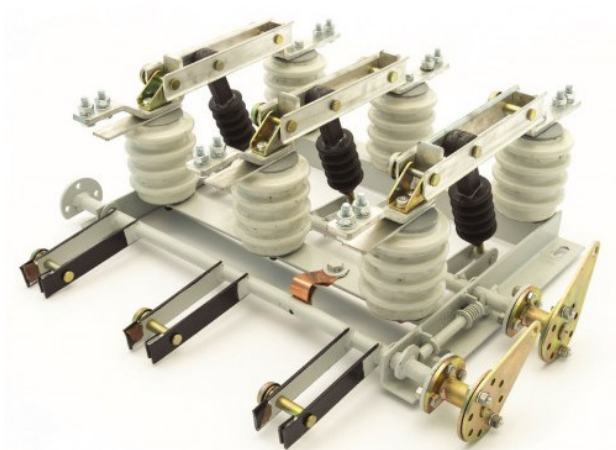


Рисунок 4.10 – Разъединитель вертикально-рубящего типа RV3-10/1000

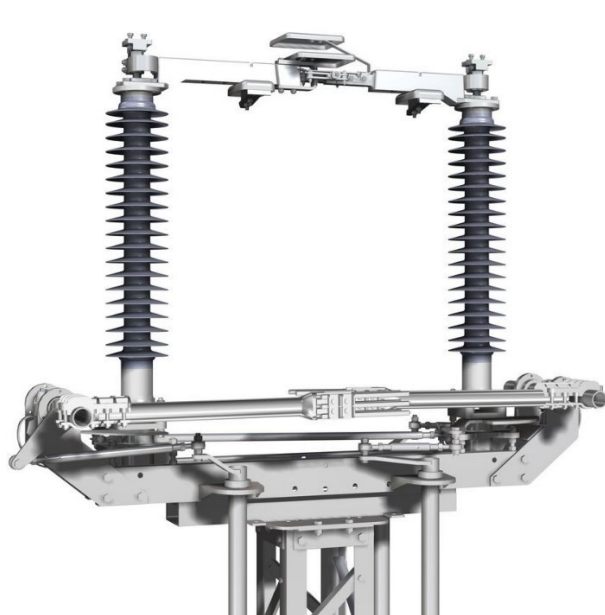


Рисунок 4.11 – Разъединитель горизонтально-поворотного типа РГ-110/1000

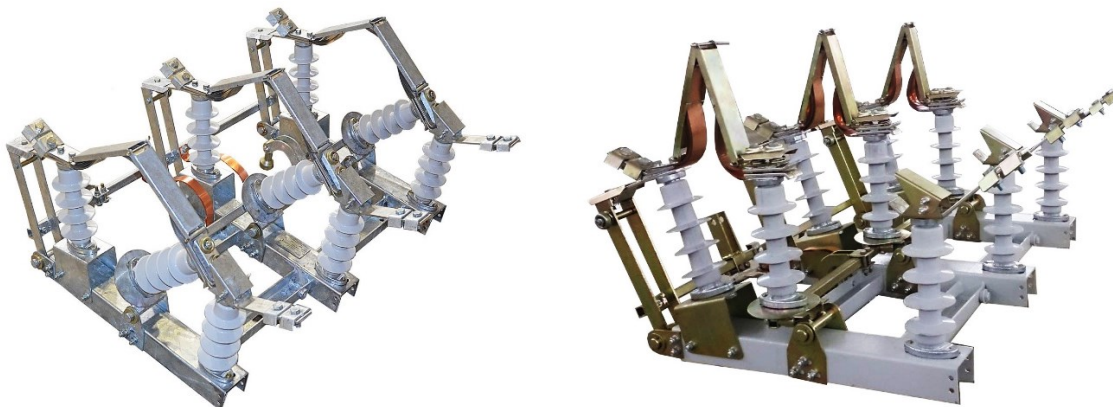


Рисунок 4.12 – Разъединитель качающегося типа РЛК-16-10/400

Помимо характера движения подвижного контакта разъединители классифицируются по ряду конструктивных и электротехнических характеристик:

- по номинальному напряжению: 3-10, 15, 35, 110, 220, 330, 500, 750 кВ;
- по номинальному току: 400, 630, 1000, 1600, 2000, 2500, 3150, 3200 А;
- по роду установки: наружной или внутренней;
- по числу полюсов и способу их размещения: однополюсные, трехполюсные с полюсами на отдельных опорах, трехполюсные с полюсами на одной опоре;
- по способу установки: на горизонтальной плоскости, на вертикальной плоскости, на горизонтальной и вертикальной плоскостях;
- по способу управления: с ручным приводом (оперативной штангой, рычажным или штурвальным); с двигателем приводом (электрическим, пневматическим или гидравлическим).

Разъединители снабжают дополнительными ножами для заземления (одним или двумя на полюс). Для заземляющих ножей имеются отдельные приводы, обычно рычажные, которые блокируют с приводами главных ножей, чтобы исключить возможность включения заземляющих ножей при включенных главных ножах, а также возможность включения главных ножей при включенных ножах для заземления.

Разъединители играют важную роль в схемах электроустановок. От надёжности их работы зависит надёжность работы всей электроустановки, поэтому к ним предъявляются следующие требования:

- создание видимого разрыва цепи в воздухе, электрическая прочность которого соответствует максимальному импульсному напряжению;
- электродинамическая и термическая стойкость при протекании токов КЗ;
- исключение самопроизвольных отключений и включений;
- чёткое включение и отключение при наихудших условиях работы, которые могут иметь место при эксплуатации.

- расположение изоляторов в конструкции разъединителя должно быть таким, чтобы токи утечки проходили в землю, а не между зажимами одного и того же полюса или между полюсами.

Разъединители являются наиболее распространенными аппаратами РУ высокого напряжения (число разъединителей в 2,5-4 раза больше, чем выключателей). Поэтому важными их характеристиками являются: занимаемая площадь и объём, простота обслуживания, удобство проведения ремонтных и монтажных работ. Разъединители должны обладать высокой надёжностью, поскольку число их операций в течение года эксплуатации может превышать несколько сотен в зависимости от схемы соединения РУ, а их повреждение может привести к серьёзным авариям и нарушению схемы электроснабжения. Отключение разъединителем необесточенного участка цепи недопустимо, так как открытая электрическая дуга между размыкаемыми контактами может достигнуть очень больших размеров и даже при отключении незначительных токов перекинуться на соседние фазы и заземлённые конструкции, что приведёт к возникновению двух- и трёхфазных КЗ.

Тема 5. Измерительные аппараты

Методические указания по проведению занятия:

Лекционное занятие предполагает связанное, последовательное представление материала в соответствии с новейшими данными науки и актуальными инженерно-техническими сведениями с целью изложения студентам основного содержания темы дисциплины в целостном, систематизированном виде. Форма проведения занятий и методы изложения материала, в том числе с использованием мультимедийных средств, определяются преподавателем из соображений обеспечения удобства и качества усвоения учебного материала.

В рамках лекционных занятий по данной теме дисциплины рассматриваются следующие ключевые вопросы:

1. Измерительные трансформаторы напряжения
2. Измерительные трансформаторы тока

Рекомендуемая литература:

1. Попов, Е.В. Устройство и эксплуатация электрических аппаратов. Часть первая. Коммутационные электрические аппараты [Электронный ресурс]: конспект лекций/ Е.В. Попов - Электрон. текстовые данные. - Москва: Московская государственная академия водного транспорта, 2015. - 49 с.

Методические материалы к занятию:

Измерительные трансформаторы напряжения (ИТН) и тока (ИТТ) применяются в цепях переменного тока электроустановок при высоких напряжениях и больших токах, когда непосредственное включение контрольно-измерительных приборов, реле и приборов автоматики в первичные цепи технически невозможно, нерационально или недопустимо по условиям безопасности. Измерительные трансформаторы предназначены для уменьшения первичных токов и напряжений до значений, наиболее удобных для подключения измерительных приборов, реле защиты, устройств автоматики. Применение измерительных трансформаторов обеспечивает безопасность персонала гальванической развязкой цепей высшего и низшего напряжений, а также позволяет унифицировать конструкцию приборов и реле.

Измерительные трансформаторы напряжения.

Измерительный трансформатор напряжения предназначен для преобразования напряжения до значения, удобного для измерения, и выполненный так, что вторичное напряжение трансформатора, увеличенное в $K_{ном}$ раз, соответствует с требуемой точностью первичному напряжению (при изменении последнего в определенных пределах) как по модулю, так и по фазе. В настоящее время ИТН на напряжения до 35 кВ включительно изготавливаются с литой и полимерной изоляцией, а на напряжения 110 кВ и выше – с элегазовой изоляцией (рисунок 5.1). В то же время в эксплуатации находится большое количество устаревших ИТН с масляной изоляцией.



ЗНОЛ-6

литая изоляция



НОЛ-35

литая изоляция



ЗНОГ-110

элегазовая изоляция

Рисунок 5.1 – Измерительные трансформаторы напряжения

Конструктивные особенности ИТН главным образом определяются классом напряжения и назначением. ИТН во многом похож на силовой трансформатор небольшой мощности для той же ступени напряжения. Однако имеются и

отличия, вытекающие из назначения и условий работы. В частности, в ИТН количество выделяющейся энергии ничтожно мало. Поэтому требование отвода тепла не определяет конструкцию трансформатора напряжения. Основные задачи, которые должны быть решены при конструировании трансформатора напряжения, помимо точности измерения заключаются в создании надежной изоляции, способной противостоять перенапряжениям, обеспечении минимальных размеров и массы, безаварийной работы с минимальным объёмом работ по обслуживанию.

Согласно ГОСТ 1983-2015 ИТН классифицируются по ряду признаков:

- по способу установки (категория размещения и климатическая зона)
- по числу фаз
- по наличию или отсутствию заземления вывода первичной обмотки
- по принципу действия
- по числу ступеней трансформации
- по виду изоляции
- по особенностям конструктивного исполнения

В зависимости от класса напряжения и технологического уровня аппарата в ИТН может применяться изоляция из следующего перечня:

- газовая (Г)
- полимерная (П)
- литая (Л)
- воздушно-бумажная (С)
- масляная (М)
- залитая битумным компаундом (К)

Номинальный коэффициент трансформации ИТН равен отношению номинальных первичного и вторичного напряжений:

$$K_{\text{ном}} = \frac{U_{1\text{н}}}{U_{2\text{н}}} \quad (5.1)$$

Номинальные первичные напряжения трансформаторов стандартизованы в соответствии со шкалой номинальных линейных напряжений сетей. Номинальные вторичные напряжения основных вторичных обмоток трансформаторов напряжения установлено равными 100 В. Фактическое напряжение, измеряемое с помощью трансформатора напряжения, определяют умножением вторичного напряжения U_2 на номинальный коэффициент трансформации:

$$U_1 = U_2 K_{\text{ном}} \quad (5.2)$$

Вторичное напряжение трансформатора, увеличенное в $K_{\text{ном}}$ раз, несколько отличается от первичного напряжения как по модулю, так и по фазе вследствие потерь мощности в трансформаторе. Разность этих напряжений, отнесенная к первичному напряжению, представляет собой погрешность по напряжению:

$$f = \frac{U_2 K_{\text{ном}} - U_1}{U_1} \quad (5.3)$$

Угол δ между векторами первичного и вторичного напряжений представляет собой угловую погрешность трансформатора. Угловая погрешность выражается в минутах и считается положительной, если вектор вторичного напряжения опережает вектор первичного напряжения.

Под вторичной нагрузкой трансформатора напряжения понимается полная мощность внешней вторичной цепи S_2 , найденная в предположении, что напряжение у вторичных зажимов равно номинальному. Вторичная нагрузка может быть определена по заданным S_2 и $\cos\varphi_2$. По мере увеличения числа приборов, присоединенных к трансформатору напряжения, сопротивление вторичной цепи уменьшается (поскольку приборы включены параллельно), однако нагрузка трансформатора увеличивается.

Под номинальной нагрузкой трансформатора напряжения понимают наибольшую нагрузку, при которой погрешности не выходят за допустимые пределы, установленные ГОСТ 7746-2015 (таблица 5.1).

Таблица 1 - Предельные значения допускаемых погрешностей ИТН

Класс точности	Предел допускаемой погрешности	
	напряжения, %	угловой
0,1	$\pm 0,1$	$\pm 5'$
0,2	$\pm 0,2$	$\pm 10'$
0,5	$\pm 0,5$	$\pm 20'$
1,0	$\pm 1,0$	$\pm 40'$
3,0	$\pm 3,0$	не нормируется

ИТН класса 0,1 и 0,2 применяются для точных измерений, проверок и исследований при наладочных работах, приемных испытаниях оборудования, для подключения вычислительных машин, приборов автоматического регулирования частоты, градуировки эксплуатационных приборов. ИТН классов 0,5 и 1 устанавливаются в распределительных устройствах и служат для подключения щитовых приборов, расчётных и контрольных счетчиков и прочих измерительных устройств. ИТН класса 3 используется в релейных защитах, устройствах автоматики, для питания сигнальных ламп, где допустима погрешность измерения больше 3 %.

Погрешности трансформатора напряжения зависят от размеров магнитопровода, магнитных свойств стали, конструкции обмотки, сечения проводов, а также от присоединенной нагрузки и первичного напряжения. Чтобы уменьшить погрешности трансформаторов напряжения, выбирают меньшую плотность тока в обмотках и меньшую магнитную индукцию в магнитопроводе по сравнению с соответствующими значениями для силовых трансформаторов.

Погрешность ИТН зависит от нагрузки вторичной цепи и от напряжения в первичной цепи. Изменение напряжения первичной цепи в широких пределах ниже номинального мало отражается на полной погрешности ИТН. Однако увеличение напряжения выше номинального может привести к существенному увеличению погрешности при больших значениях индукции.

Измерительные трансформаторы тока.

Измерительный трансформатор тока предназначен для преобразования тока до значения, удобного для измерения, и выполнен так, что вторичный ток, увеличенный в $K_{ном}$ раз, соответствует с требуемой точностью первичному току как по модулю, так и по фазе. Применение трансформаторов тока обеспечивает безопасность при работе с измерительными приборами и реле, поскольку цепи высшего и низшего напряжений разделены; позволяет унифицировать конструкции измерительных приборов для номинального вторичного тока 5 А (реже 1 или 2,5 А), что упрощает их производство и снижает стоимость.

Следует отметить, что в отличие от ИТН, применяемых на напряжениях свыше 1 кВ, ИТТ находят широкое применение в сетях низкого напряжения, где необходимо обеспечить измерение больших по величине токов. Общие технические требования к ИТТ установлены ГОСТ 7746-2015. В настоящее время ИТТ на напряжения до 35 кВ включительно изготавливаются с литой изоляцией, а на напряжения 110 кВ и выше – с газовой изоляцией (рисунок 5.2).



ТОП-0,66

пластмассовая изоляция



ТОЛ-10

литая изоляция



ТОГФ-110

элегазовая изоляция

Рисунок 5.2 – Измерительные трансформаторы тока различных исполнений

Первичную обмотку трансформатора тока включают последовательно в цепь измеряемого тока. Она имеет небольшое число витков (вплоть до одного витка) и выполняется из проводника относительно большого сечения. Вторичная обмотка рассчитана на значительно меньший ток и соответственно имеет большее число витков. Токовые катушки измерительных приборов или реле подключают ко вторичной обмотке трансформатора тока последовательно. Поскольку сопротивление трансформатора тока вместе с присоединенными к нему приборами ничтожно мало, оно никак не влияет на значение первичного тока.

Под номинальным первичным током понимают ток, для которого предназначен трансформатор. Он принят в качестве базисной величины, к которой отнесены другие характерные параметры. Стандартная шкала номинальных первичных токов содержит значения токов от 1 до 40 000 А. Под номинальным вторичным током трансформатора тока понимают ток, для которого предназначены приборы, подлежащие присоединению к его вторичной обмотке. Номинальный коэффициент трансформации трансформатора тока равен отношению номинального первичного тока к номинальному вторичному току:

$$K_{\text{ном}} = \frac{I_{1\text{н}}}{I_{2\text{н}}} \quad (5.4)$$

Согласно ГОСТ 7746-2015 ИТТ классифицируются по ряду признаков:

- по способу установки (категория размещения и климатическая зона)
- по принципу конструкции
- по виду изоляции
- по числу ступеней трансформации: одноступенчатые, каскадные.
- по числу вторичных обмоток: с одной или несколькими обмотками
- по назначению вторичных обмоток: для измерения, для учета, для защиты, для измерения и защиты, для работы с нормированной точностью в переходных режимах
- по числу коэффициентов трансформации: с одним коэффициентом трансформации, с несколькими коэффициентами трансформации

В зависимости от класса напряжения и технологического уровня аппарата в ИТТ может применяться изоляция из следующего перечня:

- с фарфоровой крышкой (Ф)
- с твердой и воздушной изоляцией, с полимерной крышкой
- маслонаполненные (М)
- газонаполненные (Г)
- с литой изоляцией (Л)
- в пластмассовом корпусе (П)

Поскольку параметры первичной обмотки трансформаторов тока определяются токовыми нагрузками силовой цепи, то класс точности трансформаторов тока во многом определяется их конструкцией: геометрическими размерами, формой и материалом магнитопровода, количеством витков и сечением провода обмотки. Из-за свойств магнитных материалов при малых первичных токах (до 5% от номинального) погрешность обмотки становится максимальной. Поэтому для изготовления обмоток, предназначенных для коммерческого учета, используются нанокристаллические (аморфные) сплавы, обладающие высокой магнитной проницаемостью, обеспечивающие высокую точность трансформатора тока при малых первичных токах (классы точности 0,5S и 0,2S).

Класс точности для каждой обмотки трансформатора тока выбирается исходя из ее назначения согласно ГОСТ 7746-2015 из стандартного ряда: 0,1; 0,2S; 0,2; 0,5S; 0,5; 1; 3; 5; 10; 5P; 10P. Наибольшее распространение получили:

- для учета электроэнергии: 0,2S; 0,2; 0,5S; 0,5.
- для измерительных приборов: 1; 3.
- для защитных реле: 5P; 10P.

Зависимость погрешности трансформатора от первичного тока нелинейна, поскольку зависит от нелинейной характеристики намагничивания магнитных электротехнических материалов. В связи с этим требования к классам точности представляют собой диапазон, в который должны укладываться погрешности трансформаторов (рисунок 5.3). С увеличением класса точности диапазон уменьшается. Разница между классами 0,5 и 0,5S состоит в том, что погрешность обмотки класса 0,5 не нормируется ниже 5% номинального тока.

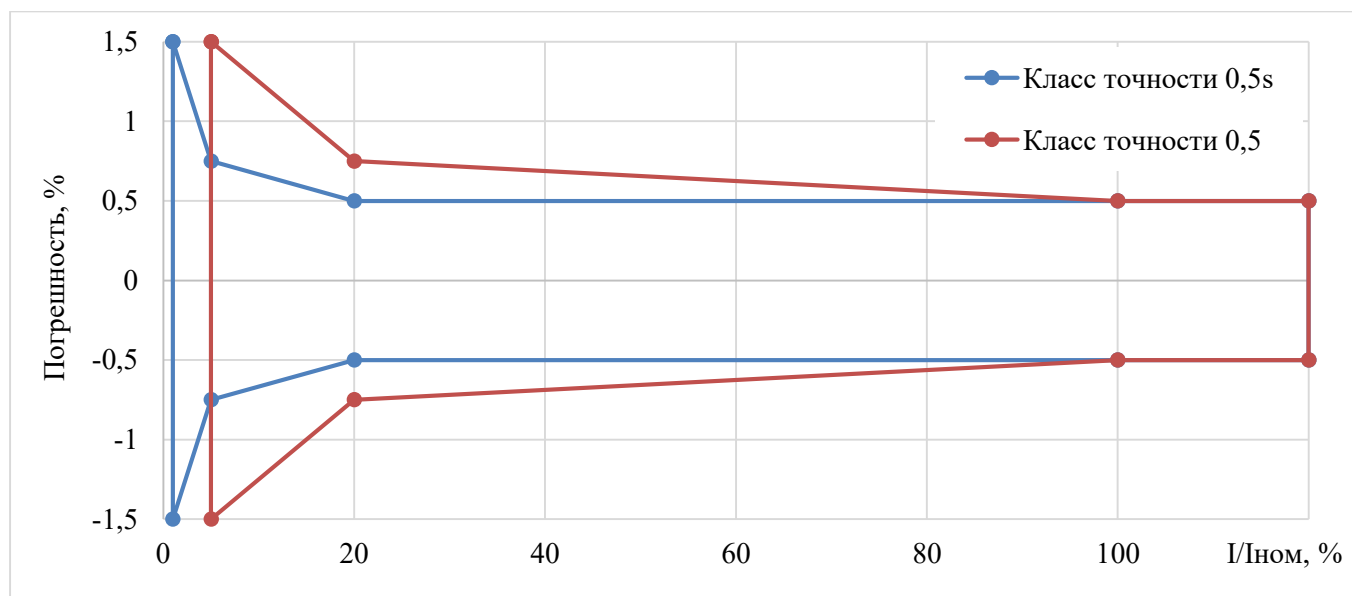


Рисунок 5.3 – Нормируемые погрешности для ТТ классов точности 0,5 и 0,5s

Тема 6. Критерии выбора и проверки электрических аппаратов

Методические указания по проведению занятия:

Лекционное занятие предполагает связанное, последовательное представление материала в соответствии с новейшими данными науки и актуальными инженерно-техническими сведениями с целью изложения студентам основного содержания темы дисциплины в целостном, систематизированном виде. Форма проведения занятий и методы изложения материала, в том числе с использованием мультимедийных средств, определяются преподавателем из соображений обеспечения удобства и качества усвоения учебного материала.

В рамках лекционных занятий по данной теме дисциплины рассматриваются следующие ключевые вопросы:

1. Общие положения выбора электрооборудования
2. Расчет токов продолжительных режимов
3. Расчет токов короткого замыкания
4. Основные методы выбора и проверки электрических аппаратов

Рекомендуемая литература:

1. Попов, Е.В. Устройство и эксплуатация электрических аппаратов. Часть первая. Коммутационные электрические аппараты [Электронный ресурс]: конспект лекций / Е.В. Попов - Электрон. текстовые данные. - Москва: Московская государственная академия водного транспорта, 2015. - 49 с.

Методические материалы к занятию:

Общие положения выбора электрооборудования

Электрооборудование выбирается по условиям продолжительных режимов и проверяется по условиям кратковременных режимов, определяющим из которых, как правило, является режим короткого замыкания. В продолжительных режимах (нормальный, ремонтные, послеаварийные) температура элементов электрооборудования достигает установившегося значения при неизменной температуре охлаждающей среды. Аварийные режимы являются кратковременными, так как по продолжительности они не сопоставимы с рабочими, однако их условия могут оказаться крайне тяжелыми для работы оборудования.

Нормальный режим, как правило, соответствует нормальной схеме электроустановки, когда все её элементы находятся в работе без вынужденных отключений (рисунок 6.1а). Ток нагрузки в этом режиме меняется в зависимости от графика нагрузки.

В ремонтном режиме часть элементов электроустановки отключена для проведения плановых ремонтов. При этом оставшееся в работе оборудование может нести повышенную (по сравнению с нормальным режимом) нагрузку (рисунок 6.1б). Аналогичные условия характерны для послеаварийных режимов, когда

часть электроустановки выведена в аварийно-восстановительный ремонт. В связи с увеличением токовых нагрузок элементов электрической схемы ремонтный и послеаварийный режимы являются утяжеленными.

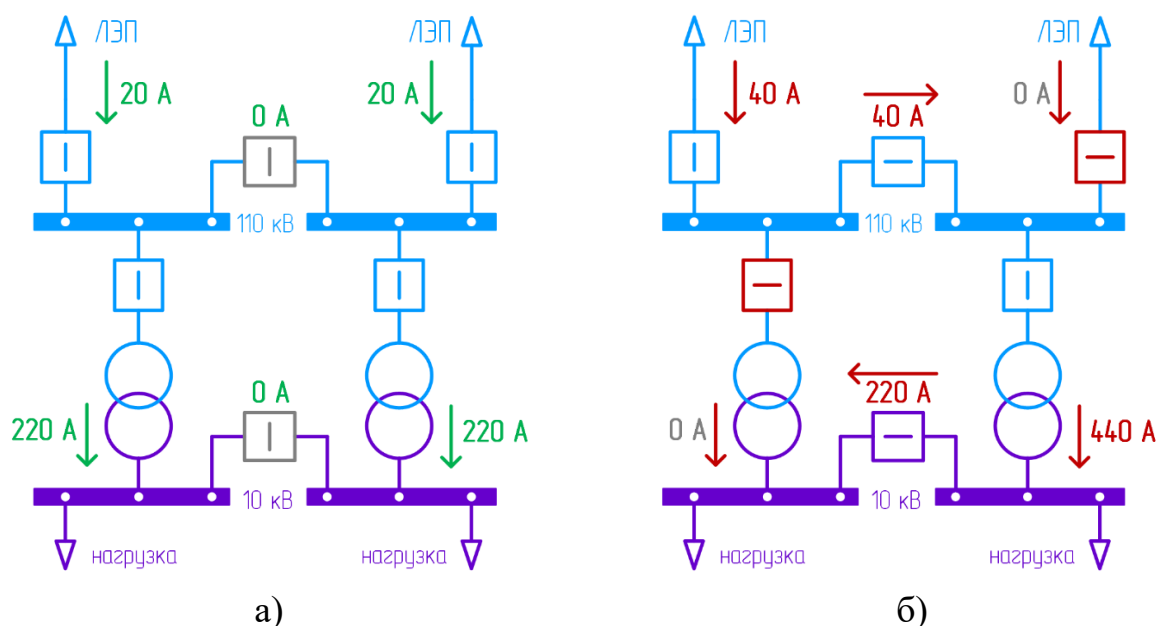


Рисунок 6.1 – Распределение токов в нормальном (а) и утяжеленном (б) режиме

При усложнении структуры электрической схемы увеличивается количество вариантов распределения токов по её ветвям в утяжеленных режимах. Учет отказов элементов, приводящих к отключению нескольких ветвей схемы, увеличивает расчётные значения токов. Нагрузочная способность электрических аппаратов во многом определяет их стоимостные показатели. Поэтому согласно критерию экономичности, при определении расчетных токов для выбора элементов электроустановки во внимание принимаются только наиболее вероятные утяжеленные режимы. Примером такого режима может служить отказ элемента в одной ветви во время ремонта элемента в другой ветви схемы электроустановки. По результатам расчета режимов для выбора электрооборудования используется ток нормального режима и максимальный ток утяжеленного режима.

Расчет токов продолжительных режимов

Цепь генератора. Ток нормального режима (6.1) принимается при загрузке генератора до номинальной мощности ($P_{\text{ном}}$) при номинальном напряжении ($U_{\text{ном}}$) и коэффициенте мощности ($\cos\varphi_{\text{ном}}$). Ток утяжеленного режима соответствует работе генератора при снижении напряжения на его зажимах на 5% (6.2).

$$I_{\text{норм}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot \cos\varphi_{\text{ном}}} \quad (6.1)$$

$$I_{\text{утж}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot 0,95 \cdot U_{\text{ном}} \cdot \cos\varphi_{\text{ном}}} \quad (6.2)$$

Цепь трансформатора. Ток нормального режима (6.3) принимается при загрузке трансформатора до его номинальной мощности ($S_{\text{ном}}$) при номинальном напряжении ($U_{\text{ном}}$). Наибольший ток утяжеленного режима принимается при условии отключения параллельно работающего трансформатора, когда оставшийся в работе трансформатор может быть перегружен по правилам систематических или аварийных перегрузок (6.4).

$$I_{\text{норм}} = \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} \quad (6.3)$$

$$I_{\text{утж}} = I_{\text{перегр.доп.}} \quad (6.4)$$

Цепь линии. Ток нормального режима линии определяется по наибольшей нагрузке линии в данном режиме (с учетом графика нагрузки). В случае одиночной радиальной линии ток нормального режима и утяжеленный ток одинаковы (6.5), поскольку в схеме отсутствуют другие линии, нагрузка которых может быть перераспределена на рассматриваемую. В случае нескольких (n) параллельно работающих линий нормальные условия соответствуют равномерному распределению нагрузки по линиям (6.6), а утяжеленные условия (6.7) рассчитываются для случая отключения одной линии ($n-1$).

$$I_{\text{норм}} = I_{\text{утж}} = \frac{S_{\text{нагр}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} \quad (6.5)$$

$$I_{\text{норм}} = \frac{S_{\text{нагр}}}{n \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} \quad (6.6)$$

$$I_{\text{утж}} = \frac{S_{\text{нагр}}}{(n - 1) \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} \quad (6.7)$$

Цепь междушинного (секционнного) выключателя. Расчетные условия для данных цепей требуют наиболее глубокого анализа различных режимов работы. В идеальном случае нормальный режим характеризуется отсутствием перетока мощности между шинами (секциями), то есть нагрузки распределены равномерно (рисунок 6.1а). Однако в условиях эксплуатации, как правило, через междушинный (секционный) выключатель в нормальном режиме протекает ток небаланса, который зависит от распределения нагрузок по шинам и пропускной способности питающих линий электропередачи. Ток утяжеленного режима цепи междушинного выключателя определяется с учетом перетока мощности при наиболее неблагоприятном эксплуатационном режиме, например, при потере питания на одной из шин, отказе одного трансформатора (рисунок 6.1б).

Расчет токов короткого замыкания

Для проверки электрических аппаратов и проводников по условиям кратковременных режимов производится расчет токов короткого замыкания (КЗ). В общем случае в масштабах энергосистемы расчет токов КЗ является сложной задачей. В настоящее время учет сложных влияющих факторов возможен в случае использования специализированного программного обеспечения (Rastrwin). Однако для оценочных расчетов существуют упрощенные методики.

При расчете токов КЗ (рисунок 6.2), как правило, требуется определить: начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ ($I_{п0}$); начальное значение аperiodической составляющей тока КЗ (i_{a0}); значение ударного тока КЗ ($i_{уд}$).

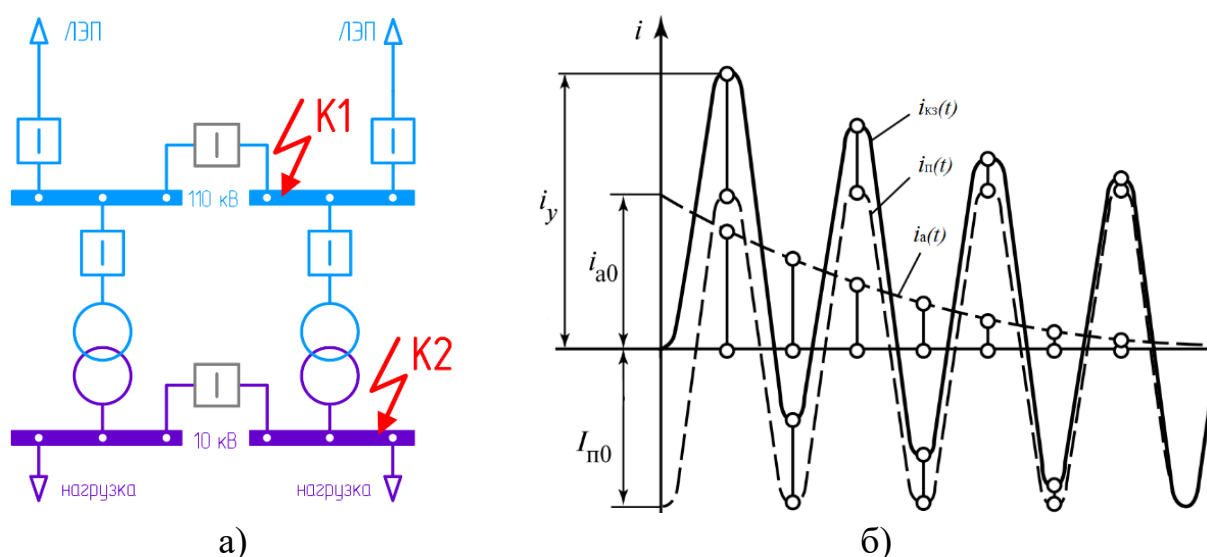


Рисунок 6.2 – Расположение расчетных точек КЗ (а) и взаимосвязь составляющих тока КЗ (б)

В задании на проектирование в качестве исходных данных может быть указана периодическая составляющая тока КЗ на напряжении системы. С использованием упрощенных методик на основе периодической составляющей возможно выполнить расчет аperiodической составляющей и ударного тока. Значения периодической составляющей тока КЗ для подстанций 110-330 кВ приводятся в Схеме и программе перспективного развития электроэнергетики Калининградской области (таблица 6.1).

С точки зрения физики процесса полный ток КЗ складывается из двух составляющих: вынужденной, обусловленной действием напряжения источника; свободной, обусловленной изменением запаса энергии магнитного поля в индуктивности сети (рисунок 6.2б). Вынужденная составляющая тока КЗ ($i_n(t)$ - периодическая) имеет периодический характер с частотой напряжения источника. Свободная составляющая тока КЗ ($i_a(t)$ - аperiodическая) имеет аperiodический

характер изменения. Максимальное мгновенное значение полного тока называется ударным током ($i_{уд}$) и наступает, как правило, через 0,01с после начала КЗ.

Таблица 6.1 – Расчетные токи КЗ в энергосистеме Калининградской области

Наименование подстанции	U _{ном} , кВ	2019 год		2024 год	
		Трехфазное I(3), кА	Однофазное 3I(0), кА	Трехфазное I(3), кА	Однофазное 3I(0), кА
ПС 330 кВ Северная 330	330	13,9	13,5	13,9	13,5
	110	28,4	29,7	28,4	29,7
Калининградская ТЭЦ-2	330	15,3	16,9	15,3	16,9
	110	32,1	36,4	32,1	36,4
ПС 110 кВ 0-3 Знаменск	110	7,1	5,2	7,1	5,2
ПС 110 кВ 0-8 Янтарное	110	8,6	7,8	8,6	7,8
ПС 110 кВ 0-12 Южная	110	21,4	18,7	21,4	18,7
ПС 110 кВ 0-13 Енино	110	9,0	7,1	9,0	7,1
ПС 110 кВ 0-14 Мамоново	110	5,1	3,5	5,1	3,5

Расчет апериодической составляющей и ударного тока в упрощенной форме ведется согласно ГОСТ Р 52735-2007 с использованием справочных коэффициентов для характерных точек системы (таблица 6.2), значение которых зависит от места возникновения КЗ. Апериодическая составляющая тока КЗ определяется по выражению (6.8) для момента времени $t = 0,01$ с при соответствующем значении постоянной времени T_a . Ударный ток определяется с учетом ударного коэффициента $K_{уд}$ по выражению (6.9).

$$i_{at} = \sqrt{2} \cdot I_{п0} \cdot e^{\frac{-t}{T_a}} \quad (6.8)$$

$$i_{уд} = K_{уд} \sqrt{2} \cdot I_{п0} \quad (6.9)$$

Таблица 6.2 – Значения расчетных коэффициентов для характерных точек

Место короткого замыкания	$K_{уд}$	T_{ac}
Ветвь генератор — трансформатор	1,9-1,95	0,1-0,2
Ветвь асинхронного двигателя	1,6	0,02
КЗ за линейным реактором на электростанции	1,9	0,1
КЗ за линейным реактором на подстанции	1,85	0,06
КЗ за кабельной линией 6-10 кВ	1,4	0,01
КЗ за трансформатором мощностью 1000 кВА	1,6	0,02
КЗ на присоединении распределительного устройства повышенного напряжения подстанции	1,8	0,05
КЗ на присоединении вторичного напряжения подстанции	1,85	0,06
КЗ на шинах собственных нужд электростанций за трансформаторами 16-80 МВА	1,85-1,9	0,06-0,1

Основные методы выбора и проверки оборудования.

Современное высоковольтное оборудование (выключатели, разъединители, измерительные трансформаторы, ограничители перенапряжений) и токоведущие системы высокой заводской готовности (комплектные токопроводы и жесткая ошиновка) представляют собой готовые решения, которые снабжаются необходимой технической документацией. Для каждого изделия производителем рассчитаны допустимые уровни термических и динамических воздействий для токов кратковременных и продолжительных режимов. Задача выбора и проверки подобного оборудования сводится к сопоставлению допустимых значений типовых критериев с расчетными параметрами режимов электроустановки.

В случае применения нестандартных технических решений или разработки оборудования возникает задача расчета величины допустимых воздействий. В частности, это характерно для проектирования токопроводящих систем, когда выполняется выбор жестких или гибких шин, проводников и кабелей. В данном случае необходимо производить оценку последствий термического и динамического воздействия расчетных токов на материал проводников и изоляции. Основными критериями при этом являются: конечная температура проводника, величина механических напряжений в проводнике и сила, воздействующая на изоляторы в местах крепления проводников.

Выбор выключателей

Выбор и проверка высоковольтных выключателей выполняется по критериям, установленным ГОСТ Р 52565-2006 (таблица 4.3). Основное назначение выключателей – коммутация токов продолжительных и кратковременных режимов. Наиболее тяжелыми операциями является отключение токов КЗ и включение цепей на ток КЗ при работе системы автоматического повторного включения (АПВ). Проверка данных режимов производится соответственно по критериям отключающей и включающей способности выключателя. При возникновении КЗ выключатель должен ограниченное время пропускать через себя ток КЗ без повреждений. Способность аппарата противостоять кратковременному термическому и динамическому действию тока КЗ называется соответственно термической и динамической стойкостью. В таблице 6.3 (столбец «условие») на первом месте указан параметр из технической документации выключателя, а на второй позиции – расчетный параметр электроустановки.

В таблице 6.4 представлен пример технических характеристик элегазового колонкового выключателя ВГТ-110. Соответствие между критериями таблицы 6.3 и данными таблицы 6.4 установлено путем цветовой маркировки.

Таблица 6.3 – Критерии выбора и проверки высоковольтных выключателей

	Условие	Критерий
Выбор	$U_{\text{ном}} \geq U_{\text{с.ном}}$	по уровню изоляции
	$I_{\text{ном}} \geq I_{\text{ном}}$	по номинальному току
	$K_{\text{п}} \cdot I_{\text{ном}} \geq I_{\text{утж}}$	по току утяжеленного режима
Проверка	$I_{\text{откл.ном}} \geq I_{\text{п0}}$	по отключающей способности периодической составляющей
	$i_{\text{откл.ном}} \geq i_{\text{ат}}$	по отключающей способности апериодической составляющей
	$I_{\text{вкл.ном}} \geq I_{\text{п0}}$	по включающей способности периодической составляющей
	$i_{\text{вкл.ном}} \geq i_{\text{уд}}$	по включающей способности апериодической составляющей
	$I_{\text{пр.скв}} \geq I_{\text{п0}}$	по электродинамической стойкости к периодической составляющей
	$i_{\text{пр.скв}} \geq i_{\text{уд}}$	по электродинамической стойкости к апериодической составляющей
	$I_{\text{тер}}^2 \cdot t_{\text{тер}} \geq B_k$	по термической стойкости

Таблица 6.4 – Технические характеристики выключателя ВГТ-110

Наименование параметра	Норма
Номинальное напряжение, кВ	110
Наибольшее рабочее напряжение, кВ	126
Номинальный ток, А	2000
Номинальный ток отключения, кА	40
Нормированное процентное содержание апериодической составляющей, %	45
Нормированные параметры тока включения, кА	
- наибольший пик	102
- начальное действующее значение периодической составляющей	40
Нормированные параметры сквозного тока короткого замыкания, кА:	
- наибольший пик (ток электродинамической стойкости), кА	102
- среднеквадратичное значение тока за время его протекания, кА	40
- время протекания тока короткого замыкания, с	3

Выбор разъединителей

Выбор и проверка высоковольтных разъединителей выполняется по критериям, установленным ГОСТ Р 52726-2007 (таблица 6.5). Разъединители предназначены для обеспечения нормативных изоляционных промежутков в разомкнутых цепях и изменения схемы электрической сети. Поскольку разъединители не предназначены для коммутации цепей под нагрузкой, то критерии включающей и отключающей способности к ним не применяются (таблица 6.6).

Таблица 6.5 – Критерии выбора и проверки высоковольтных разъединителей

	Условие	Критерий
Выбор	$U_{\text{ном}} \geq U_{\text{с.ном}}$	по уровню изоляции
	$I_{\text{ном}} \geq I_{\text{ном}}$	по номинальному току
	$K_{\text{п}} \cdot I_{\text{ном}} \geq I_{\text{утж}}$	по току утяжеленного режима
Проверка	$I_{\text{пр.скв}} \geq I_{\text{п0}}$	по электродинамической стойкости к периодической составляющей
	$i_{\text{пр.скв}} \geq i_{\text{уд}}$	по электродинамической стойкости к апериодической составляющей
	$I_{\text{тер}}^2 \cdot t_{\text{тер}} \geq B_k$	по термической стойкости

Таблица 6.6 – Технические характеристики разъединителя РГ–110/2000УХЛ1

Наименование параметра	Норма
Номинальное напряжение, кВ	110
Наибольшее рабочее напряжение, кВ	126
Номинальный ток, А	2000
Наибольший пик номинального кратковременного выдерживаемого тока (ток электродинамической стойкости), кА	100
Номинальный кратковременный выдерживаемый ток (ток термической стойкости), кА	40
Время протекания номинального кратковременного выдерживаемого тока, с:	
- для контактных ножей	3
- для заземлителей	1

Выбор измерительных трансформаторов

Измерительные трансформаторы предназначены для понижения реальных значений токов и напряжений до уровня, позволяющего выполнить измерения с помощью стандартных приборов. Измерительные трансформаторы тока и напряжения имеют различный способ включения. Поскольку первичная обмотка трансформаторов тока включена в силовую цепь, то через неё протекают токи продолжительных и кратковременных режимов. Поэтому согласно ГОСТ 7746-2015 трансформаторы тока выбираются и проверяются по стандартным критериям для токопроводящего статического оборудования (таблица 6.5), а также по критериям точности измерений: конструкции, классу точности, нагрузке вторичных цепей.

Трансформаторы напряжения подключаются к сети параллельно и не пропускают через себя токов силовых цепей вне зависимости от режима: нормального, утяжеленного или режима короткого замыкания. Поэтому согласно ГОСТ 1983-2015 трансформаторы напряжения выбираются и проверяются только по напряжению электроустановки, конструкции и схеме соединения обмоток, классу точности и нагрузке вторичных цепей.

Тема 7. Электронные аппараты

Методические указания по проведению занятия:

Лекционное занятие предполагает связанное, последовательное представление материала в соответствии с новейшими данными науки и актуальными инженерно-техническими сведениями с целью изложения студентам основного содержания темы дисциплины в целостном, систематизированном виде. Форма проведения занятий и методы изложения материала, в том числе с использованием мультимедийных средств, определяются преподавателем из соображений обеспечения удобства и качества усвоения учебного материала.

В рамках лекционных занятий по данной теме дисциплины рассматриваются следующие ключевые вопросы:

1. Общие сведения о электронных аппаратах
2. Преимущества и недостатки электронных аппаратов
3. Классификация электронных аппаратов
4. Требования, предъявляемые к электронным аппаратам

Рекомендуемая литература:

1. Попов, Е.В. Устройство и эксплуатация электрических аппаратов. Часть первая. Коммутационные электрические аппараты [Электронный ресурс]: конспект лекций / Е.В. Попов - Электрон. текстовые данные. - Москва: Московская государственная академия водного транспорта, 2015. - 49 с.

Методические материалы к занятию:

Общие сведения о электронных аппаратах.

Электронные аппараты являются бесконтактными статическими аппаратами, выполненными на базе полупроводниковых приборов. В электронных аппаратах основным элементом, управляющим потоком электрической энергии, являются коммутирующие статические (бесконтактные) ключи. Функции бесконтактных ключей в настоящее время преимущественно выполняют силовые полупроводниковые приборы (СПП). К силовым полупроводниковым приборам относятся приборы с максимально допустимым средним током свыше 10 А или импульсным током свыше 100 А.

Принцип действия таких аппаратов основан на изменении проводимости входящих в них управляемых нелинейных элементов. При этом диапазон изменения проводимости может быть очень широким. Проводимость может изменяться непрерывно или дискретно. Дискретное (или импульсивное) управление является более предпочтительным, так как позволяет реализовывать более высокие технико-экономические характеристики, в частности получить существенно лучшее значение КПД. Поэтому в современных электронных аппаратах исполнительные органы работают в ключевом режиме.

Силовые полупроводниковые приборы работают в качестве электронных ключей в двух состояниях – включенном, соответствующем высокой проводимости, и выключенном, соответствующем низкой проводимости. В этих режимах их вольтамперные характеристики (ВАХ) подобны характеристикам нелинейных элементов релейного типа. Физической основой большинства таких приборов являются полупроводниковые структуры с различными типами электронной проводимости. Управление электронной проводимостью позволяет осуществлять бездуговую коммутацию электрических цепей.

По принципу действия силовые полупроводниковые приборы разделяются на три основных вида: диоды (вентили), транзисторы и тиристоры. По степени управляемости силовые полупроводниковые приборы разделяются на две группы: не полностью управляемые приборы, которые можно переводить в проводящее состояние, но не наоборот, например, тиристоры (условно к этой группе можно отнести также и диоды, состояние которых определяется полярностью приложенного к ним напряжения); полностью управляемые приборы, которые можно переводить в проводящее состояние и обратно сигналом управления (например, транзисторы или запираемые тиристоры).

Сигнал управления формируется электронным устройством (формирователем), входящим в состав системы управления (СУ) аппарата, преобразователя или другого устройства, содержащего электронный ключ. Такое устройство именуют оконечным каскадом СУ (или формирователем импульсов), а в технической литературе его часто называют драйвером. Основная функция драйвера заключается в формировании сигнала управления, необходимого для включения или выключения ключа при воздействии информационного сигнала малой мощности. Функционально драйвер аналогичен приводу электромеханического коммутационного аппарата.

Элементная база современной силовой электроники расширила диапазон коммутируемых мощностей до единиц мегаватт, позволила поднять верхний уровень частоты коммутации электронных ключей, что сделало возможным создавать аппараты управления, регулирования и защиты постоянного и переменного тока с высокими технико-экономическими показателями.

Преимущества и недостатки электронных аппаратов.

Преимуществами электронных аппаратов являются: отсутствие подвижной механической системы; бездуговая коммутация цепей, отсутствие электрического износа; высокая стойкость к ударным механическим нагрузкам и вибрациям; практически неограниченное число коммутаций силовых ключей; большой ресурс работы; высокое быстродействие; надёжная работа во взрывоопас-

ных и агрессивных средах; отсутствие акустического шума во время работы; широкие возможности по управлению выходными параметрами; широкие функциональные возможности; низкое значение мощности для управления.

Наряду с неоспоримыми преимуществами силовым электронным аппаратам присущи следующие недостатки: зависимость электрических параметров от температуры, приложенного напряжения, наличия источников проникающей радиации и др.; существенные различия в электрических параметрах ключей одного типа и класса; невысокая глубина коммутации (отношение электрического сопротивления ключа в отключенном и включенном состояниях); отсутствие видимого разрыва цепи в выключенном состоянии, наличие остаточного тока, отсутствие гальванической развязки в коммутируемой цепи.

Ключи обладают односторонней проводимостью тока и способны работать при напряжении одной полярности, за исключением отдельных интегральных или гибридных приборов, сочетающих качества различных полупроводниковых элементов. В состоянии высокой проводимости прямое падение напряжения на ключе составляет не менее 0,5–0,7 В (до 3 В), что обусловлено контактной разностью потенциалов на границе полупроводниковых слоёв. Это приводит к существенным потерям мощности, преобразующейся в теплоту, и необходимости применения охладителей.

Для электронных аппаратов характерны невысокая устойчивость к электрическим перегрузкам; требуются специальные схемотехнические решения по защите ключей от перегрузок по напряжению и току, а также по скорости нарастания тока di/dt и напряжения du/dt . В схемах возможны ложные переключения от случайных импульсов с малой продолжительностью, которые могут проникнуть в цепь управления ключом при близких ударах молний, дуговых разрядах в контактных аппаратах, электросварке и т.д.

В связи с этим необходимо отметить, что силовые электронные аппараты не могут заменить большинства видов электромеханических, так как уступают последним в качестве коммутационных ключей. Силовые электронные ключи по принципу действия не обеспечивают такого низкого уровня потерь мощности во включенном состоянии, как металлические контакты и, с другой стороны, не способны создать уровень изоляции, соответствующий разомкнутым контактам электрического аппарата.

Более эффективными являются гибридные электрические аппараты, представляющие собой компромиссное техническое решение, соединяющее положительные качества электромеханических и силовых электронных аппаратов в одном комбинированном устройстве. Существенным преимуществом гибридных аппаратов является практическое исключение дуговых явлений при включении и выключении электрических контактов. Это позволяет продлить срок их

службы и в ряде случаев улучшить массогабаритные показатели аппаратов в целом. Другим существенным достоинством гибридных аппаратов является возможность сочетания в одном аппарате функций регулятора на интервалах включения и выключения с высокими характеристиками коммутационного аппарата.

Использование достижений микропроцессорной техники в электронных аппаратах позволяет существенно расширить их функциональные возможности, обеспечить эффективный контроль и диагностику, а также возможность управления с различных иерархических уровней системы, в которой используется аппарат. На основе СПП могут быть выполнены коммутационные и защитные аппараты постоянного и переменного тока низкого и высокого напряжения в широком диапазоне изменения номинальных токов и напряжений. Поэтому в самом общем виде их можно классифицировать по тем же признакам, что и электромеханические аппараты (по назначению, роду тока, номинальному напряжению, конструктивным особенностям и др.).

Классификация электронных аппаратов.

Универсальность применения в многообразии вариантов исполнения полупроводниковых и комбинированных аппаратов позволяет произвести их классификацию по принципу действия. Аппараты с естественной коммутацией предназначены для работы в сетях переменного тока. Отключение их осуществляется за счет изменения полярности напряжения источника питания, в результате чего к тиристорам прикладывается обратное напряжение. При этом не требуется каких-либо дополнительных схемных или других решений, кроме необходимости блокировать поступление управляющих сигналов на входы тиристоров. Принцип естественной коммутации используется во всех полупроводниковых и комбинированных аппаратах переменного тока: контакторах, пускателях, переключателях, выключателях нагрузки и выключателях при оперативном отключении номинальных токов.

Процесс отключения аппаратов с искусственной коммутацией тоже связан с изменением знака напряжения на СПП и поддержанием сигнала обратного смещения на время, достаточное для их выключения. Но в данном случае это достигается вспомогательными схемными средствами, с помощью которых обеспечивается снижение вводного тока в СПП до нуля. В силовых аппаратах применяется в основном емкостная искусственная коммутация.

Все реализующие этот способ схемы содержат конденсатор, ток разрядки которого протекает в процессе отключения аппарата встречно анодному коммутируемому току в тиристорах. В группу аппаратов, где используется искусственная коммутация, входят все аппараты постоянного тока и защитные полупроводниковые аппараты переменного тока (выключатели низкого и высокого напряжения, аппараты устройств автоматического включения резерва – АВР).

Особенность комбинированных аппаратов состоит в том, что процесс отключения их протекает в два этапа. В течение первого этапа за счет схемных средств или воздействия на электрическую дугу осуществляется принудительный переход тока из контактной цепи в параллельно соединенную с ней полупроводниковую цепь. На втором этапе происходит прерывание тока полупроводниковой частью аппарата с использованием, как правило, принципа естественной коммутации. По аналогии с электромеханическими аппаратами комбинированные аппараты разделяются на синхронные и несинхронные, в зависимости от режима размыкания контактной цепи: в определенном интервале времени перед нулем тока или в любой момент времени.

К группе аппаратов с фазовым регулированием относятся аппараты переменного тока с естественной и искусственной коммутацией, выполняющие дополнительно функцию регулирования выходной мощности. Силовые части аппаратов с фазовым регулированием и без регулирования не имеют различий. Режим регулирования обеспечивается системой управления, с помощью которой осуществляется задержка включения тиристоров на заданный угол по отношению к нулю тока.

Представленная классификационная схема раскрывает возможность создания одинаковых по назначению аппаратов с использованием различных принципов действия. Например, контакторы или пускатели, в зависимости от конкретных условий работы и требований к характеристикам, могут быть выполнены как комбинированные аппараты, тиристорные (полупроводниковые) аппараты с естественной коммутацией, тиристорные аппараты с естественной коммутацией и фазовым регулированием.

Требования, предъявляемые к электронным аппаратам.

Несмотря на ряд принципиальных особенностей, полупроводниковые и комбинированные аппараты являются одним из видов электрических аппаратов и поэтому должны удовлетворять всем требованиям, которые к ним предъявляются. Конкретные требования определяются функциональным назначением аппаратов и условиями их эксплуатации.

Все без исключения аппараты должны иметь по возможности малые габариты, массу и стоимость. Они должны также обладать высокой надежностью и не требовать больших затрат на обслуживание в процессе эксплуатации.

Вместе с тем чувствительность полупроводниковых аппаратов даже к кратковременным перегрузкам по току и напряжению, особенности управления силовыми блоками и их охлаждение обязывают учитывать при проектировании ряд специфических требований.

К наиболее важным из них относятся следующие: обеспечение быстродействующей защиты СПП от перенапряжений, токов перегрузки и короткого замыкания; ограничение до допустимых значений скорости нарастания прямого напряжения; ограничение скорости нарастания тока при включении СПП; обеспечение оптимальных параметров управляющих импульсов; обеспечение оптимальных условий охлаждения полупроводниковых приборов.

3. Методические указания по самостоятельной работе студентов

Самостоятельная работа студентов – это планируемая работа, выполняемая по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия, является одним из основных видов деятельности обучающихся. Самостоятельная работа студентов включает в себя изучение лекционного материала и первоисточников, подготовку ко всем видам аудиторных занятий, текущему контролю и промежуточной аттестации.

Целью самостоятельной работы является более глубокое изучение студентами отдельных вопросов дисциплины с использованием рекомендуемой дополнительной литературы и других информационных источников.

Задачами самостоятельной работы обучающихся являются:

- систематизация и закрепление полученных знаний и умений;
- углубление и расширение теоретических знаний;
- формирование умения использовать научно-техническую, нормативную и справочную литературу;
- развитие познавательных способностей и активности, творческой инициативы, ответственности и организованности.

Основными формами внеаудиторной самостоятельной работы, используемыми при изучении дисциплины «Электрические и электронные», являются:

- изучение программного материала дисциплины (работа с учебником, конспектом лекции и иными информационными ресурсами);
- изучение и конспектирование рекомендуемых источников;
- работа с электронными информационными ресурсами и ЭИОС КГТУ;
- работа с компьютерными программами;
- получение консультаций по вопросам изучаемой дисциплины (аудиторно, в дни консультаций по расписанию; в любой доступной форме в электронной образовательной среде ЭИОС КГТУ и другими доступными способами);
- подготовка к текущему контролю и промежуточной аттестации.

Для подготовки к занятиям, текущему контролю и промежуточной аттестации обучающиеся могут воспользоваться электронной библиотекой Университета, где имеется возможность получить доступ к учебно-методическим материалам как библиотеки Университета, так и иных электронных библиотечных систем. Также студенты могут взять на дом необходимую литературу на абонементе или воспользоваться читальным залом. Ответы на вопросы, выносимые для самостоятельного изучения (повторения), должны быть кратко законспектированы в тетради для лекций. При подготовке к лабораторным работам студентам рекомендуется изучить соответствующий лекционный материал, а также вопросы, выносимые для самостоятельного изучения.

Заключение

В учебно-методическом пособии даны рекомендации по изучению дисциплины «Электрические и электронные аппараты». Объем сведений, рассматриваемых на аудиторных занятиях по данной дисциплине, обеспечивает формирование базового уровня знаний и умений студентов и предполагает значительный объем самостоятельной работы для более широкого и качественного освоения основных тем дисциплины.

В пособии содержатся рекомендации по изучению теоретического материала и самостоятельной подготовке. Знания, умения и навыки в соответствующем разделе электроэнергетики и электротехники, приобретенные в ходе изучения дисциплины, позволят будущим специалистам в дальнейшем успешно решать практические задачи в профессиональной деятельности.

Библиографический список

1. Выбор и применение низковольтных электрических аппаратов распределения, управления и автоматики [Электронный ресурс]: справочное пособие/ Е.Г. Акимов [и др.]. - Электрон. текстовые данные. - Москва: Издательский дом МЭИ, 2016. - 344 с. - Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/55951.html>.
2. Попов, Е.В. Устройство и эксплуатация электрических аппаратов. Часть первая. Коммутационные электрические аппараты [Электронный ресурс]: конспект лекций / Е.В. Попов - Электрон. текстовые данные. - Москва: Московская государственная академия водного транспорта, 2015. - 49 с. - Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/46877.html>.
3. Электрические аппараты [Электронный ресурс]: методические указания к практическим работам/ - Электрон. текстовые данные. - Липецк: Липецкий государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2015. - 13 с. - Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/57625.html>
4. Электрические аппараты высокого напряжения: учебно-метод. комплекс / сост.: В. Л. Беляев, А. Л. Виноградов, К. Б. Демьяненко. - Изд-во СЗТУ, 2010. - 140 с.
5. Электрические аппараты управления: учеб.-метод. комплекс, информ. о дисциплине, рабочие учеб. материалы, информ. ресурсы дисциплины, блок-контроля освоения дисциплины / Федер. агентство по образованию, СЗТУ, Каф.ЭТиЭМ. - Изд-во СЗТУ, 2008. - 72 с.
6. Электрические и электронные аппараты: учеб.-метод. комплекс / сост.: В. Л. Беляев, Ю. В. Куклев. - Изд-во СЗТУ, 2009. - 139 с.

Локальный электронный методический материал

Максим Сергеевич Харитонов

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ АППАРАТЫ

Редактор И. Голубева

Уч.-изд. л. 4,8. Печ. л. 4,6.

Издательство федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Калининградский государственный технический университет».
236022, Калининград, Советский проспект, 1