

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Фурсов Владимир Александрович

Должность: И.о. директора Пятигорского института (филиал) Северо-Кавказского

федерального университета

Дата подписания: 05.06.2026 09:53:28

Уникальный программный ключ:

1c378726a41fd0143ae5bccc8ba81860b0b0aa62

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Пятигорский институт (филиал) СКФУ

Методические указания

по выполнению лабораторных работ

по дисциплине «ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ»

для студентов направления подготовки

13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Пятигорск 2026 г.

Содержание

№ п/п	Стр.
	Введение
1.	Цель и задачи изучения дисциплины
2.	Оборудование и материалы
3.	Наименование лабораторных работ
4.	Содержание лабораторных работ
4.1	Лабораторная работа № 1. Изоляторы воздушных линий и подстанций. Распределение напряжения по элементам гирлянды подвесных изоляторов.
4.2	Лабораторная работа № 2. Внутренняя изоляция электроустановок. Исследование электрической прочности воздушных промежутков в резко неоднородном поле.
4.3	Лабораторная работа № 3. Испытания изоляции. Измерение сопротивления и емкости изоляции. Статистические закономерности пробоя.
4.4	Лабораторная работа № 4. Контроль диэлектрических потерь и измерение параметров частичных разрядов. Контроль повышенным напряжением. испытания изоляции отдельных видов оборудования. Контроль изоляции контактной сети. Исследование перенапряжений в обмотках трансформатора.
4.5	Лабораторная работа № 5. Испытательные установки высокого переменного и постоянного напряжения. Исследование модели каскадного выпрямителя высокого напряжения.
4.6	Лабораторная работа № 6. Генераторы импульсных напряжений. Генератор импульсных напряжений 750 кВ.
4.7	Лабораторная работа № 7. Генераторы импульсных напряжений. Определение зон защиты стержневых и тросовых молниеотводов.
4.8	Лабораторная работа № 8. Распространение волн перенапряжений. квазистационарные и коммутационные перенапряжения. Защита от перенапряжений. Защитные разрядники и ограничители перенапряжений.
5	Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины
5.1	Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины

- 5.2 Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине
- 5.3 Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети Интернет, необходимых для освоения дисциплины

Приложения

Введение

Целью работы в лаборатории является углубление и закрепление приобретенных теоретических знаний путем экспериментальной проверки теоретических положений, а также знакомство с электронными компонентами, оборудованием, измерительными приборами и аппаратурой, используемыми в лаборатории.

В результате выполнения лабораторных работ студенты должны приобрести умения и навыки по сборке и исследованию электронных схем и приборов, измерениям электрических величин. Тематика лабораторных работ полностью соответствует содержанию основных разделов курса, изучаемого в высших технических учебных заведениях. В предлагаемом учебном пособии описано одиннадцать лабораторных работ. В описании каждой лабораторной работы сформулирована ее цель, изложены основные теоретические положения, описана схема установки для проведения экспериментального исследования, даны рекомендации по проведению опытов и обработке результатов измерений, а также контрольные вопросы.

1. Цель и задачи изучения дисциплины

Основными целями дисциплины являются: формирование у студентов стройной и устойчивой системы знаний о фундаментальных закономерностях зажигания и развития электрических разрядов в диэлектрических средах, механизмах пробоя диэлектриков при воздействии сильных электрических полей, видах изоляции высоковольтного оборудования и методах контроля ее состояния, способах получения и измерения высоких напряжений, природе возникновения перенапряжений и способов защиты от них.

В результате освоения данной дисциплины обеспечивается достижение целей основной образовательной программы «Электроэнергетика и электротехника»; приобретенные знания, умения и навыки позволят подготовить выпускника:

- способного к расчету, анализу и проектированию электроэнергетических элементов, объектов и систем с использованием современных средств автоматизации проектных разработок;
- научно-исследовательской деятельности, в том числе в междисциплинарных областях, связанной с математическим моделированием процессов в электроэнергетических системах и объектах, проведением экспериментальных исследований и анализом их результатов;
- к самостоятельному обучению и освоению новых знаний и умений для реализации своей профессиональной карьеры.

2. Оборудование и материалы

Аппаратные средства:

- Комплект учебно-лабораторного оборудования «Электротехнические материалы».

Учебная аудитория для проведения учебных занятий, оснащена оборудованием и техническими средствами обучения. Переносной ноутбук, проектор, доска магнитно-маркерная.

3. Наименование лабораторных работ

Для заочной формы обучения предусмотрены следующие лабораторные работы: Лабораторная работа № 1. Изоляторы воздушных линий и подстанций. Распределение напряжения по элементам гирлянды подвесных изоляторов – 2 часа, практическая подготовка – 2 часа; Лабораторная работа № 2. Внутренняя изоляция электроустановок – 2 часа.

№ Темы дисциплины	Наименование тем дисциплины, их краткое содержание	Объем часов	Из них практическая подготовка, часов
5 семестр			
2	Лабораторная работа № 1. Изоляторы воздушных линий и подстанций. Распределение напряжения по элементам гирлянды подвесных изоляторов. Выяснение причин неравномерного распределения напряжения по элементам изоляционных конструкций. Определение распределения напряжения по гирлянде подвесных изоляторов. Изучение влияния защитной арматуры на характер распределения напряжения вдоль гирлянды. Ознакомление с методикой поиска дефектных изоляторов в гирлянде.	2	2
3	Лабораторная работа № 2. Внутренняя изоляция электроустановок. Исследование электрической прочности воздушных промежутков в резко неоднородном поле. Изучение особенностей развития разряда в неоднородных полях. Исследование влияния полярности электродов на разрядные напряжения в резко неоднородном электрическом поле воздушного промежутка. исследование влияния барьера на электрическую прочность воздушного промежутка. Экспериментальное определение оптимального расположения барьера.	4	2
4	Лабораторная работа № 3. Испытания изоляции. Измерение сопротивления и емкости изоляции. Статистические закономерности пробоя. Ознакомление с основными статистическими закономерностями пробоя при испытании образцов газовой и жидкой изоляции. Изучение статистических методов обработки и анализа экспериментальных данных при испытании изоляции. Расчет параметров и построение дифференциальных и интегральных кривых распределения вероятностей пробоя.	2	
5	Лабораторная работа № 4. Контроль диэлектрических потерь и измерение параметров частичных разрядов. Контроль повышенным напряжением. испытания изоляции отдельных видов оборудования. Контроль изоляции контактной сети. Исследование перенапряжений в обмотках трансформатора. Ознакомиться со схемой и работой анализатора переходных процессов. Изучить методы определения перенапряжений в главной и продольной изоляции обмотки трансформатора при воздействии на обмотку грозовых импульсов.	2	

6	Лабораторная работа № 5. Испытательные установки высокого переменного и постоянного напряжения. Исследование модели каскадного выпрямителя высокого напряжения. Изучение устройства и принципа действия каскадного выпрямителя высокого напряжения. Определение изменений потенциалов различных точек схемы трехкаскадного выпрямителя в установившемся режиме при холостом ходе. Снятие зависимостей выходного напряжения и пульсаций напряжения от тока нагрузки и числа ступеней выпрямителя.	2	
7	Лабораторная работа № 6. Генераторы импульсных напряжений. Генератор импульсных напряжений 750 кВ. Ознакомиться со способами получения грозовых импульсов, устройством и работой ГИН 750 кВ; Изучить методы регулирования параметров грозового импульса и методы их измерения; Произвести измерение амплитуды грозового импульса с помощью измерительных шаров диаметром 50 см. Ознакомиться с методами регистрации формы грозового импульса с помощью электронного осциллографа.	2	
7	Лабораторная работа № 7. Генераторы импульсных напряжений. Определение зон защиты стержневых и тросовых молниеотводов. Изучить расчетные методы определения зон защиты стержневых и тросовых молниеотводов. Ознакомиться с экспериментальными методами исследования защитных зон молниеотводов с использованием ГИН. Определить экспериментально и сравнить с расчетными зоны защиты стержневых и тросовых молниеотводов. Провести визуальное исследование зон защиты стержневых и тросовых молниеотводов по компьютерной программе.	2	
9	Лабораторная работа № 8. Распространение волн перенапряжений. квазистационарные и коммутационные перенапряжения. Защита от перенапряжений. Защитные разрядники и ограничители перенапряжений. Ознакомление с назначением, принципом действия и конструкцией разрядников и ограничителей перенапряжений (ОПН). Изучение особенностей работы и применения основных типов трубчатых и вентильных разрядников и ОПН. Расчет характеристик и защитного действия разрядников с использованием ЭВМ.	2	
	Итого за 5 семестр:	18	4
	Итого:	18	4

4. Содержание лабораторных работ

Лабораторная работа № 1. Изоляторы воздушных линий и подстанций. Распределение напряжения по элементам гирлянды подвесных изоляторов.

Цель работы: Выяснение причин неравномерного распределения напряжения по элементам изоляционных конструкций. Определение распределения напряжения по гирлянде подвесных изоляторов. Изучение влияния защитной арматуры на характер распределения напряжения вдоль гирлянды. Ознакомление с методикой поиска дефектных изоляторов в гирлянде.

Основы теории:

В электрических установках имеет место неравномерное распределение напряжения по отдельным элементам и участкам изоляции. Это приводит к возникновению короны и частичных разрядов на отдельных элементах и в объемах изоляции, что в конечном итоге является причиной появления начальных дефектов и последующего развития повреждения изоляции.

Во внешней изоляции наиболее неравномерное распределение напряжения наблюдается на гирляндах подвесных изоляторов, опорных изоляционных колонках, высоковольтных выводах трансформаторов и выключателей.

Рассмотрим характер распределения напряжения для гирлянды подвесных изоляторов, состоящей из n элементов (рис. 1.1).

Гирлянду изоляторов можно представить электрической схемой замещения (рис. 1.1,б), где $C = 40...70$ пФ – собственная емкость изолятора; $C_1 = 4...5$ пФ – емкость изолятора относительно земли; $C_2 = 0,5...1,0$ пФ – емкость изолятора относительно провода.

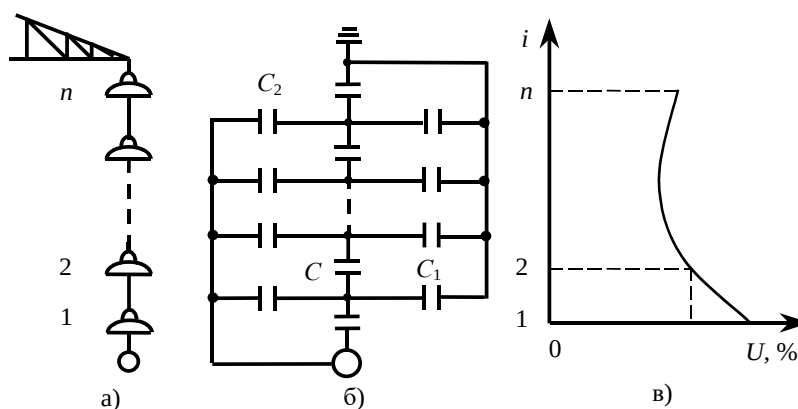


Рисунок 1.1 – Гирлянда подвесных изоляторов:

- а – схема установки; б – емкостная схема замещения;
в – распределение напряжения по изоляторам гирлянды.

Основное влияние на неравномерность распределения напряжения по элементам гирлянды, как видно из схемы замещения рис. 1.1 б, оказывают токи, протекающие по емкостям C_1 и C_2 .

Падение напряжения на каждом элементе гирлянды будет определяться алгебраической суммой токов, протекающих по изолятору. Поскольку $C_1 > C_2$, то наибольший ток протекает по изолятору, расположенному около провода, наименьший – по изолятору, расположенному где-то в середине гирлянды, а затем несколько увеличивается на элементах у заземленной опоры. Более подробный анализ схемы замещения гирлянды дан в соответствующей литературе [1, 2].

Неравномерность распределения напряжения по изоляторам будет увеличиваться с увеличением числа элементов в гирлянде, так как в этом случае величина эквивалентной емкости, обусловленная собственной емкостью изоляторов $C_{\Sigma} = \frac{C}{n}$, будет соизмерима с емкостями C_1 и C_2 .

При наличии шести и более изоляторов в гирлянде на первый от провода изолятор приходится примерно 20–25 % фазного напряжения. Таким образом, при номинальном напряжении 154 кВ и выше изоляторы, расположенные вблизи провода, будут коронировать.

Для выравнивания распределения напряжения вдоль гирлянды применяют защитную арматуру в виде колец, овалов, восьмерок и т. п., укрепленных на обоих концах гирлянды или только на линейном конце. Арматура увеличивает емкости C_2 и C_{Σ} . Аналогичным образом можно выровнять распределение напряжения вдоль стержневых изоляторов.

Арматура также защищает изоляторы от воздействия дуги при перекрытии изоляторов, так как дуга при перекрытии гирлянды возникает между электродами арматуры.

Из анализа схемы замещения гирлянды также следует, что более равномерного распределения напряжения по изоляторам можно достичь, увеличивая собственную емкость изолятора, т.е. используя более массивные изоляторы или сдвоенные гирлянды. В этом случае токи, протекающие по емкостям C_1 и C_2 , оказывают меньшее влияние на величину токов в емкостях C .

Распределение напряжения по гирлянде станет также более равномерным, если увеличить активную составляющую сквозного тока, например, покрывая изоляторы полупроводящей глазурью. Подобное явление наблюдается при дожде, когда возросшие активные токи утечки приводят к выравниванию распределения напряжения.

Измерить распределение напряжения по изоляторам гирлянды можно с помощью измерительной штанги или шарового разрядника.

Измерительная штанга представляет собой систему из двух электродов. Электроды с помощью контактных приспособлений (в виде «усов», щупов) соединяются с верхней и нижней металлической арматурой изолятора. Расстояние между электродами можно изменять путем поворота рукоятки штанги. Электрическое поле между электродами – слабонеоднородное, и напряжение пробоя воздушного промежутка между электродами будет зависеть от расстояния. Шкала измерительной штанги проградуирована в киловольтах. Имеются также штанги с электростатическими вольтметрами.

Методика определения распределения напряжения по элементам гирлянды с помощью шарового разрядника следующая:

- 1) Разрядник поочередно подключается параллельно каждому изолятору.
- 2) Включается испытательная установка, и плавно поднимается напряжение от нуля до возникновения устойчивого разряда между шариками разрядника.
- 3) Относительное значение напряжения на каждом изоляторе определяется расчетным путем.

Для каждого изолятора производится три измерения. Необходимо следить, чтобы в процессе измерений расстояние между шариками разрядника оставалось неизменным.

Так как напряжение по изоляторам распределяется неравномерно, то величина напряжения $U_{\tilde{a}i}$, приложенного к i -му изолятору, при котором пробивается разрядник, будет зависеть от места положения изолятора в гирлянде, т. е.

$$U_{\tilde{a}1} \neq U_{\tilde{a}2} \neq \dots \neq U_{\tilde{a}i} \neq \dots \neq U_{\tilde{a}n}$$

Наименьшее значение будет иметь $U_{\tilde{a}1}$, при установке разрядника на первом изоляторе от провода, а наибольшее $U_{\tilde{a}i}$ при установке разрядника где-то в середине гирлянды.

$$U_{\tilde{e}\zeta k} = \frac{U}{U_{\tilde{a}k}}$$

где U – напряжение, при котором пробивается разрядник;

$U_{\tilde{a}k}$ – напряжение на гирлянде при установке разрядника на k -ом изоляторе.

Для всей гирлянды

$$\frac{U}{U_{\tilde{a}1}} + \frac{U}{U_{\tilde{a}2}} + \dots + \frac{U}{U_{\tilde{a}n}} = U \left(\frac{1}{U_{\tilde{a}1}} + \frac{1}{U_{\tilde{a}2}} + \dots + \frac{1}{U_{\tilde{a}n}} \right) = U \sum_{i=1}^n \frac{1}{U_{\tilde{a}i}} = 1$$

Следовательно, относительное значение напряжения на k -ом изоляторе при измерении шаровым разрядником:

$$U_{\text{эк}} = \frac{1}{U_{\text{эк}} \sum_{i=1}^n \frac{1}{U_{\text{эк}}}}$$

или в процентах

$$U_{\text{изк}}\% = \frac{100}{U_{\text{эк}} \sum_{i=1}^n \frac{1}{U_{\text{эк}}}}$$

Во внутренней изоляции наибольшая неравномерность распределения напряжения по объему изоляции наблюдается в кабелях, трансформаторах и генераторах.

В изоляции кабелей наибольшая напряженность электрического поля наблюдается у токоведущих жил. Поэтому для выравнивания поля по толщине изоляции применяют градирование изоляции. Сущность градирования заключается в том, что изоляция, например бумажная, имеет слои с различными величинами коэффициента диэлектрической проницаемости ϵ ; ближе к жиле используется бумага с большим ϵ .

В трансформаторах наибольшая неоднородность электрического поля - у торца обмотки, примыкающего к магнитопроводу. Для выравнивания поля применяют емкостные кольца и экраны.

В электрических машинах максимальная неоднородность электрического поля возникает в местах выхода секции из пазов статора. Здесь для выравнивания электрического поля применяют покрытие лобовых участков изоляции полупроводящим лаком на определенную длину. Подробнее о методах регулирования полей в силовых кабелях, трансформаторах и машинах смотрите.

Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

Указания по выполнению лабораторной работы:

Определить распределение напряжения вдоль гирлянды из шести стеклянных изоляторов типа ПС70 с помощью штанги и методом шарового разрядника при:

- 1) отсутствии дефектных изоляторов;
- 2) наличии одного дефектного изолятора;
- 3) с защитной арматурой.

Работа выполняется на высоковольтной испытательной установке 60 кВ (рис. 1.2). Траверса должна быть заземлена, а высокое напряжение подводится к проводу.

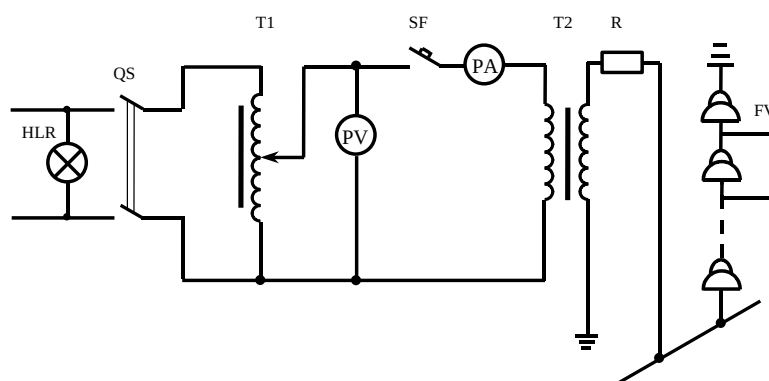


Рисунок 1.2 – Схема испытания установки

При измерении напряжения штангой необходимо:

- 1) включить испытательную установку и установить напряжение по низкой стороне 200 В, что соответствует вторичному напряжению 60 кВ;
- 2) с помощью штанги замерить напряжение U_k на каждом изоляторе, при котором возникает пробой между электродами штанги. Результаты измерений занести в табл. 1.1;
- 3) значения напряжений в процентах на каждом изоляторе занести в табл. 1.1, определив их по соотношению

$$U_{k\%} = \frac{U_k 100}{U_{\hat{A}\hat{I}}}$$

где $U_{\hat{A}\hat{I}}$ – напряжение, приложенное к гирлянде изоляторов (в нашем случае 60 кВ);

- 4) для проверки правильности измерений необходимо вычислить сумму $\sum U_{k\%}$.

Если сумма отличается от 100 % более чем на ± 10 %, то измерения следует считать неудовлетворительными, и опыт нужно повторить.

Таблица 1.1

Номер изолятора от провода, i	Измерения шаровым разрядником						Измерения штангой	
	$U'_{1\hat{a}}$, В	$U''_{1\hat{a}}$, В	$U'''_{1\hat{a}}$, В	$\bar{U}_{1\hat{a}}$, В	$U_{2\hat{a}}$, кВ	$U_{\text{вс } k\%}$, %	U_k , кВ	$U_{k\%}$, %
1								

2								
3								
4								
5								
6								

Последовательность определения распределения напряжения по гирлянде изоляторов с помощью шарового разрядника следующая:

- 1) подключить разрядник поочередно параллельно каждому изолятору;
- 2) включить испытательную установку и плавно поднять напряжение от нуля до возникновения устойчивого разряда между шариками разрядника;
- 3) величину напряжения разряда $U_{1\bar{a}}$ (на стороне 200 В) занести в табл. 1.1. Для каждого изолятора произвести три измерения ($U'_{1\bar{a}}$, $U''_{1\bar{a}}$ и $U'''_{1\bar{a}}$). Необходимо следить, чтобы в процессе измерений расстояние между шариками разрядника оставалось неизменным;
- 4) занести в табл. 1.1 значения напряжений на гирлянде (на стороне 60 кВ), при котором наступает разряд, определив их по выражению

$$U_{2\bar{a}} = K \bar{U}_{1\bar{a}}$$

где $K = \frac{60}{0,2}$ – коэффициент трансформации трансформатора;

- 5) вычислить значения напряжений в процентах для каждого изолятора по выражению (1.5);
- 6) результаты расчетов занести в табл. 1.1. Для каждого варианта должна быть определена сумма $\sum U_{k\%}$. Если сумма отличается от 100 %, то необходимо повторить расчет.

На основании полученных результатов необходимо:

1. Построить зависимость $U_{\text{э} \text{ } k\%} = f(i)$ для всех случаев в одних координатах (расчеты могут быть выполнены по компьютерной программе).
2. Определить коэффициент неравномерности распределения напряжения вдоль гирлянды для всех случаев

$$\eta = \frac{U_{\text{э} \text{ } k\% \text{ max}}}{U_{\text{э} \text{ } k\% \text{ min}}}$$

где $U_{\text{в } k\% \text{ max}}$ и $U_{\text{в } k\% \text{ min}}$ – наибольшее и наименьшее напряжение на изоляторах гирлянды.

Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

Контрольные вопросы:

1. Объяснить причины неравномерности распределения напряжения в изоляционных конструкциях.
2. В чем проявляется отрицательное действие неравномерного распределения напряжения?
3. Перечислить способы выравнивания напряжения по изоляторам гирлянды, а также при выполнении изоляции кабелей, трансформаторов и генераторов.
4. Пояснить с использованием полученных результатов влияние дефектного изолятора на распределение напряжения по гирлянде.
5. Перечислить способы выявления дефектных изоляторов.
6. Виды защитной арматуры и экранов и для чего они применяются.

Лабораторная работа № 2. Внутренняя изоляция электроустановок. Исследование электрической прочности воздушных промежутков в резко неоднородном поле.

Цель работы: Изучение особенностей развития разряда в неоднородных полях. Исследование влияния полярности электродов на разрядные напряжения в резко неоднородном электрическом поле воздушного промежутка. исследование влияния барьера на электрическую прочность воздушного промежутка. Экспериментальное определение оптимального расположения барьера.

Основы теории:

Электрическая прочность воздушных промежутков зависит от ряда факторов, в том числе от рода напряжения, формы электродов и их полярности.

В однородном электрическом поле ($E = \text{const}$) разряд в воздухе возникает при напряженности поля, близкой к 3 МВ/м, и не сопровождается явлением короны.

Степень неоднородности электрического поля принято характеризовать коэффициентом неоднородности K_n , равным отношению максимальной напряженности поля между электродами (E_{max}) к средней ее величине (E_{cp}): $K_n = E_{\text{max}} / E_{\text{cp}}$, где $E_{\text{cp}} = U/S$. Для однородных полей $K_n = 1$, для неоднородных $K_n > 1$ и увеличивается при уменьшении радиуса кривизны электродов и росте расстояния между ними. Условно считается, что поле будет слабонеоднородным при $K_n < 2$ и резко неоднородным при $K_n > 2 \dots 4$. Эта граница характерна для случая концентрических цилиндров при $R/r = 3$, для параллельных проводов $S/r = 30$ и для двух сфер одинакового радиуса $S/r = 8$ (S - везде расстояние между электродами) [1].

Электрическое поле промежутка с электродами острие-плоскость является неоднородным ($K_n > 4$). В таком промежутке разрядные напряжения оказываются значительно более низкими, чем в воздушных промежутках с однородными или слабонеоднородными полями. При этом искровому разряду (пробою) предшествует корона.

При любой полярности электродов острие-плоскость ионизации начинается у острия, поскольку напряженность поля здесь больше, чем у плоскости. Образующийся при этом объемный заряд состоит, в основном, из положительных ионов, т.к. электроны, обладающие малой массой и, следовательно, большей подвижностью, практически мгновенно покидают область ионизации. Положительный объемный заряд искажает поле и оказывает существенное влияние на процесс развития разряда.

Как видно из рис. 2.1, при положительной полярности острия возникающий при ионизации объемный заряд уменьшает напряженность поля непосредственно у острия и увеличивают ее в остальной части промежутка.

При отрицательной полярности острия влияние объемного заряда будет противоположным, - он увеличивает напряженность поля около острия и ослабляет ее в остальной части промежутка. В результате изменяется напряжение возникновения короны U_k и разрядное напряжение промежутка U_p .

При положительной полярности острия возникновение короны будет затруднено, т.к. напряженность поля непосредственно у острия понижена. Для возникновения короны потребуется более высокое напряжение, т.е. $U_k^+ > U_k^-$.

Поскольку напряженность поля по направлению к плоскости при положительной полярности острия увеличивается, а при отрицательной уменьшается (рис.2.1), то при дальнейшем повышении напряжения при положительном острие разряд в промежутке произойдет при более низком напряжении, т.е. $U_p^+ < U_p^-$.

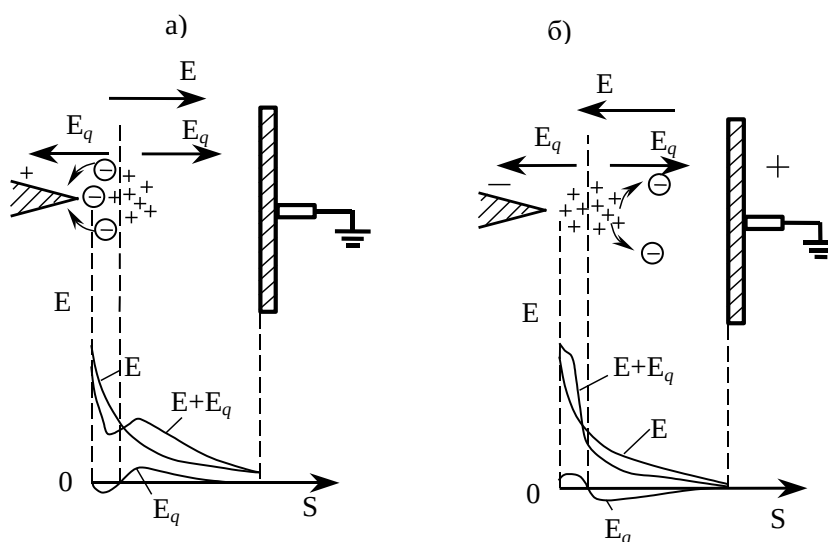


Рисунок 2.1 – Напряженность электрического поля в промежутке острие-плоскость: E - без учета влияния объемных зарядов; E_q - создаваемая положительными объемными зарядами; $E+E_q$ - результирующая

Зависимость разрядного напряжения в несимметричных полях от полярности электродов называют эффектом полярности.

Управлять электрическим полем разрядного промежутка и его электрической прочностью можно, например, поместив между электродами тороидальный проводящий экран, на который подан тот или иной потенциал. В зависимости от положения экрана и значения его потенциала можно добиться увеличения или уменьшения разрядного напряжения промежутка.

Устранить эффект полярности частично или полностью можно, поместив между электродами барьер (перегородку) Б (рис. 2.2) из диэлектрика.

Материал барьера существенного значения не имеет; важно, чтобы барьер был достаточно плотным, непроницаемым для ионов.

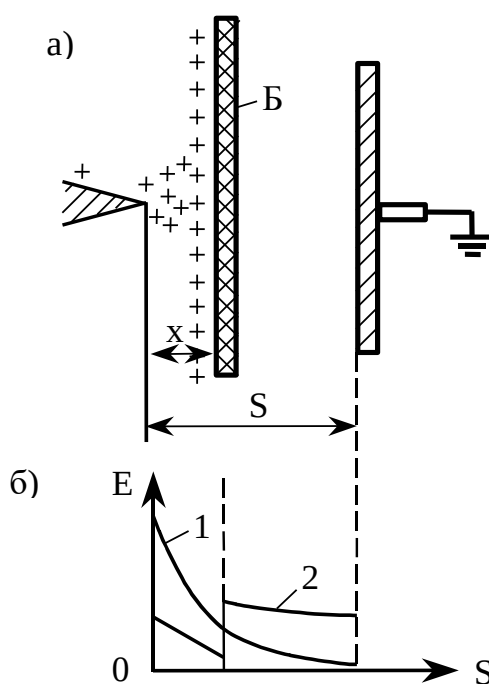


Рисунок 2.2 – Барьер (а) и напряженность электрического поля (б) в промежутке острие-плоскость: 1- без барьера; 2 - с барьером

При наличии барьера и положительной полярности острия положительные ионы на поверхности барьера, распределяются тем более равномерным слоем, чем дальше от острия установлен барьер. В результате напряженность электрического поля на участке барьер-плоскость несколько повышается, но, распределяется более равномерно (рис. 2.2, б) в промежутке, что и приводит к заметному увеличению разрядного напряжения при оптимальном положении экрана.

При наличии барьера и отрицательной полярности острия наблюдается как снижение разрядного напряжения промежутка, так и незначительное его увеличение (рис. 2.3).

При переменном напряжении (при частоте 50 Гц) в промежутке острие-плоскость разряд возникает при положительной полярности напряжения на стержне, поскольку при этом разрядное напряжение значительно ниже, чем при отрицательной полярности острия. Поэтому применение барьера для увеличения прочности промежутков эффективно и при напряжении промышленной частоты.

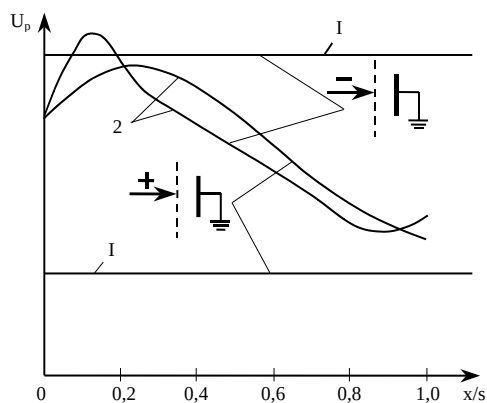


Рисунок 2.3 – Разрядные напряжения промежутка острие-плоскость:
1 – без барьера; 2 – с барьером.

Разрядные напряжения промежутка с электродами острие-острие при переменном напряжении будут выше, чем разрядные напряжения промежутка острие-плоскость. Это объясняется тем, что в последнем случае (в силу большой емкости системы канал стримера - плоскость) плотность заряда на фронте стримера и, следовательно, напряженность поля вблизи него оказываются более высокими, что облегчает условие распространения стримера вглубь промежутка.

Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

Указания по выполнению лабораторной работы:

Работа выполняется на выпрямительной установке, схема которой приведена на рис.

2.4.

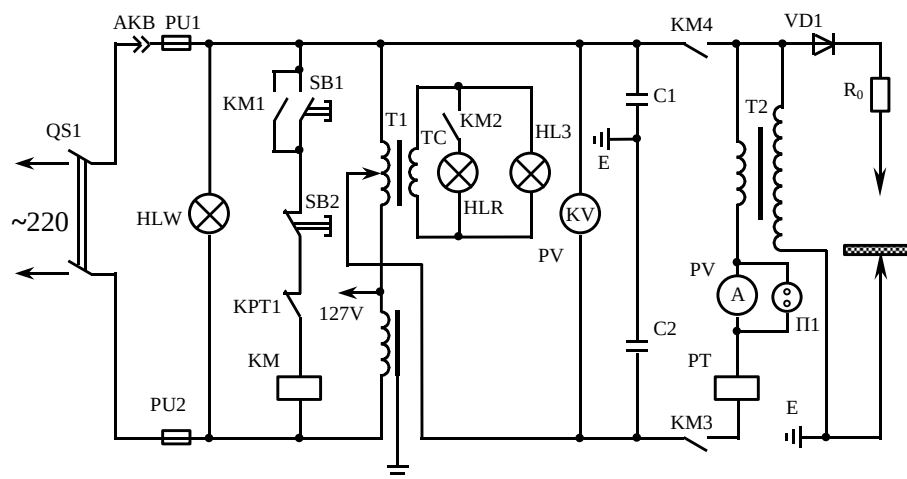


Рисунок 2.4 – Принципиальная схема выпрямительной установки:

Работа на установке производится в следующем порядке:

1. Необходимо убедиться, что установка полностью отключена от сети:

Выключены рубильник QS1 щитка управления, регулятор регулировочного трансформатора T1 находится в отключенном положении, и на выход высокого напряжения ВН установки наложено временное заземление.

2. После этого можно заходить за ограждение установки и производить необходимые изменения в схеме исследования.

3. Закончив работу за ограждением, закрывают дверь ограждения, включают цепь блокировки АКВ, снимают временное заземление.

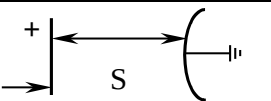
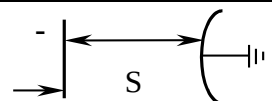
4. Включают рубильник QS1 щитка питания, при этом подается напряжение на регулировочный трансформатор T1, загораются сигнальные лампы HLW и HL3.

5. Включают кнопку QS1 на пульте управления, при этом замыкаются контакты магнитного пускателя КМ и подается напряжение на высоковольтный трансформатор T2, сигнальную лампу HLR и обмотку токового реле РТ.

1. Определить разрядные напряжения воздушного промежутка острие-плоскость в зависимости от расстояния S между электродами при положительной и отрицательной полярности острия.

Результаты опытов сводят в таблицу следующей формы.

Таблица 2.1

S, см					S, см				
	U, кВ			U _{р,ср} , кВ		U, кВ			U _{р,ср} , кВ
	1	2	3			1	2	3	
1					0,5				
---					---				
5					2,5				

Здесь $U_{р,ср}$ – среднее значение напряжения между электродами в момент пробоя, кВ.

На основании полученных данных построить зависимость $U_p = f(S)$.

1. Определить разрядные напряжения промежутка острие-плоскость с барьером при различном положении барьера и различной полярности острия.

Барьер располагают в специальном приспособлении; расстояние S указывает преподаватель. Результаты опытов заносят в таблицу следующей формы.

2. На основании полученных результатов построить зависимости $U_p = f(x/S)$ для различной полярности электродов. На этом же графике показать разрядные напряжения промежутка для данного расстояния S при различных полярностях острия без барьера.

Распределение и напряженности электрического поля влияют на конструктивные особенности и эксплуатационные характеристики электротехнического оборудования. Поэтому расчет напряженности электрического поля представляет важную задачу при проектировании токопроводов, изоляторов, экранов и других конструкций изоляции.

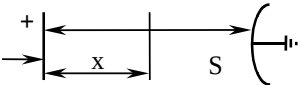
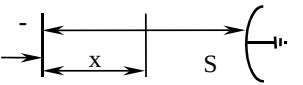
В изоляционных конструкциях с неоднородным полем, например, в коаксиальных токопроводах (рис. 2.5, а) напряженность электрического поля E в любой точке на расстоянии r от оси равна

$$E = \frac{U}{r \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$

где U - напряжение между жилой и оболочкой;

r_1 и r_2 - внутренний и наружный радиусы изоляции.

Таблица 2.2

x/S								
	U, кВ			U _{p,ср} , кВ	U, кВ			U _{p,ср} , кВ
	1	2	3		1	2	3	
0,0								
0,25(0,2)								

0,75(0,8)								
1,0								

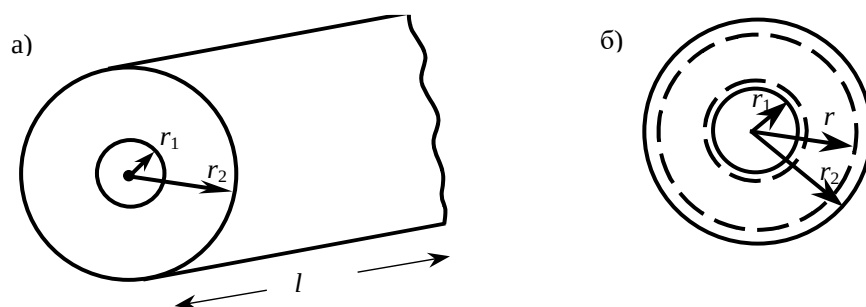


Рисунок 2.5 – Расчет напряженности электрического поля
в изоляционных конструкциях с неоднородным полем:

а – в коаксиальных токопроводах; б – в сферическом конденсаторе

Расчет напряженности поля в любой точке сферического конденсатора (рис. 2.5, б) выполняется по формуле

$$E = \frac{U \cdot r_1 \cdot r_2}{r^2 (r_2 - r_1)}$$

Подобные точные соотношения получены и для других сравнительно простых систем электродов.

Расчет напряженности электрического поля в реальных изоляционных конструкциях часто представляет собой сложную и трудоемкую задачу, и поэтому выполняется с применением численных методов и ЭВМ.

Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

Контрольные вопросы:

1. Схема испытательной установки.
2. Результаты испытаний в виде таблиц и графиков.
3. Выводы по результатам работы и заключение о наиболее выгодном расположении барьера для данных электродов.

Лабораторная работа № 3. Испытания изоляции. Измерение сопротивления и емкости изоляции. Статистические закономерности пробоя.

Цель работы: Ознакомление с основными статистическими закономерностями пробоя при испытании образцов газовой и жидкой изоляции. Изучение статистических методов обработки и анализа экспериментальных данных при испытании изоляции. Расчет параметров и построение дифференциальных и интегральных кривых распределения вероятностей пробоя.

Основы теории:

Образцы изоляции (газовой, жидкой, твердой) и изоляционные конструкции подвергаются различного рода испытаниям. Например, электрическая прочность газовых промежутков и конструкций при постоянном или переменном напряжении определяется при непрерывном подъеме напряжения до пробоя. Скорость нарастания напряжения в этом случае, как правило, не лимитируется. При повторных испытаниях наблюдаемые значения пробивных напряжений будут неодинаковы. Разброс пробивных напряжений при таком виде испытаниях определяется многими причинами: не идентичностью промежутков от испытания к испытанию; нестабильной погрешностью измерительного прибора; субъективностью оператора; статистическими закономерностями, связанными с возникновением и развитием самого процесса разряда и т.п., - т.е. разброс зависит от многих случайных факторов.

Среднее значение пробивного напряжения:

$$\bar{U}_p = \frac{\sum_{K=1}^N U_{PK}}{N}$$

Часто приводится как характеристики электрической прочности образца или изоляционной конструкции. Однако для многих практических случаев важно знать, помимо $\bar{U}_p$, характеристики, связанные с разбросом пробивных напряжений; минимальное пробивное напряжение $U_{p \min}$; вероятность пробоя при подъеме напряжения до данной величины $U_i - P(U_p \leq U_i)$; среднеквадратичное отклонение

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{K=1}^N (U_{PK} - \bar{U}_p)^2}{N - 1}}$$

которое является мерой крутизны зависимости $P(U_p \leq U_i)$.

Зависимость вероятности пробоя от величины напряжения по экспериментальным данным строится следующим методом. Разделим диапазон полученных N значений пробивных напряжений на n равных элементарных диапазонов ΔU по соотношению

$$\frac{U_{p\max} - U_{p\min}}{n} = \Delta U$$

Каждому из этих элементарных диапазонов пробивного напряжения будет соответствовать число пробоев $\Delta n_1; \Delta n_2 \dots \Delta n_n$ и

$$\sum_{k=1}^n \Delta n_k = N$$

Величина $\frac{\Delta n_k}{N} = p_k$ приблизительно равна вероятности того, что пробой произойдет в диапазоне значения напряжения от U_k до U_{k+1} .

При условиях нормировки $\Delta U=1$ и $\sum_{k=1}^N p_k = 1$ получается экспериментальная гистограмма (рис.3.1) распределения плотности вероятности пробоев. Суммируя p_k от p_1 до p_i получаем: $P_i(U_p \leq U_i) = \sum_{k=1}^i p_k$ - приближенную вероятность того, что пробой произойдет при U_p . Ступенчатый график $P_i(U_p \leq U_i)$ дает экспериментальную зависимость P_i от напряжения. Из теории вероятности известно, что при $N \rightarrow \infty, \Delta U \rightarrow dU, \Delta n_k \rightarrow dn$ функция $P_k(U)$ представляет собой распределение плотности вероятности или дифференциальную кривую распределения вероятностей пробоя.

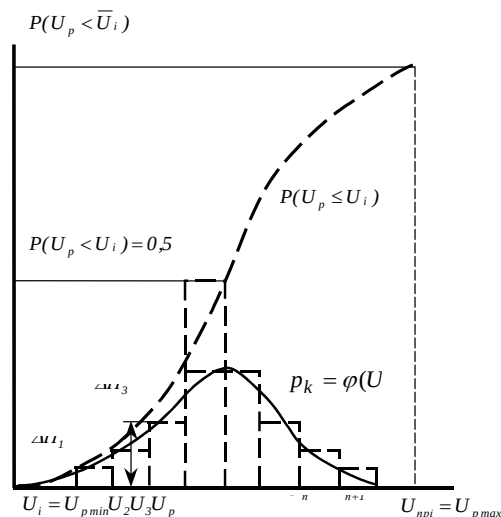


Рисунок 3.1 – Построение экспериментальных гистограмм распределения вероятности пробоев и аппроксимирующих кривых дифференциального и интегрального распределений

При этом

$$P(U_p < U_1) = \int_{-\infty}^{U_1} p_k(U) \cdot dU$$

интегральная кривая распределения вероятности пробоя. В общем случае эти кривые экспериментально получены быть не могут ($N \rightarrow \infty$). Однако, исходя из физических предпосылок, экспериментальные гистограммы для p_k и $P_i(U_p \leq U_i)$ могут быть аппроксимированы каким-либо математическим законом распределения вероятностей.

Многочисленные исследования показали, что при многократных пробоях воздушных промежутков зависимость вероятности возникновения разряда от напряжения разряда в пределах $-3\sigma \dots +3\sigma$ удовлетворительно описывается функцией нормального распределения Гаусса

$$P(U \leq U_p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{U_p} \exp\left[-\frac{(U_p - \bar{U}_p)^2}{2\sigma^2}\right] dU_p,$$

где $\bar{U}_p$ и σ - параметры распределения.

Точность определения найденных значений $\bar{U}_p$ и σ по сравнению с истинным зависит от N . Например, относительная погрешность определения σ и $\bar{U}_p$ с надежностью 0,95 находится по соотношениям

$$\varepsilon_{U_p}^x = \frac{1,96}{\sqrt{N}} \cdot \frac{\sigma}{\bar{U}_p};$$

$$\varepsilon_{\sigma}^x = \frac{1,96}{\sqrt{2N}}.$$

Соответствующие абсолютные погрешности

$$\varepsilon_{\bar{U}_p} = \varepsilon_{U_p}^x \cdot \bar{U}_p; \quad \varepsilon_{\sigma} = \varepsilon_{\sigma}^x \cdot \sigma.$$

Построение кривых нормального распределения по известным параметрам σ и $\bar{U}_p$ производится с использованием соответствующих таблиц, приведенных в пособиях и справочниках по теории вероятности и математической статистике (некоторые табличные значения приведены в приложении к данной работе).

При аналогичных испытаниях образцов жидкости (например, трансформаторного масла) разброс пробивных напряжений и $\bar{U}_p$ зависят не только от всех факторов, перечисленных для газообразных образцов, но и от времени воздействия (скорости подъема) напряжения.

Формирование разряда в технически чистой жидкости при сравнительно длительном воздействии напряжения (секунды и более) связано с наличием и расположением в момент испытания в промежутке различного рода примесей, пузырьков, их накоплением, деформацией и т.д.

Поэтому разброс пробивных напряжений в жидкости будет больше, чем в газе, и, повторяем, будет сильно зависеть от скорости подъема напряжения. Следовательно, при испытаниях жидких образцов скорость нарастания напряжения должна быть строго лимитирована. Кривая $\frac{N_{pi}(U_p \leq U_i)}{N} \approx P_i(U_p \leq U_i)$ при испытаниях жидкой изоляции также удовлетворительно аппроксимируется усеченным (от -3σ до $+3\sigma$) интегральным распределением Гаусса, хотя отличие действительной кривой от нормального закона здесь может быть более заметно.

Для большинства практически важных случаев при известной (найденной) кривой распределения вероятностей пробоев по напряжениям за минимальное разрядное напряжение при идентичных условиях опыта принимается $U_{pmin} = \bar{U}_p - 3\sigma$.

Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

Указания по выполнению лабораторной работы:

1. Получить экспериментальные данные для определения статических характеристик пробоя при испытании воздушных и масляных промежутков при плавном подъеме напряжения промышленной частоты.
2. Построить по экспериментальным данным гистограммы для p_k , рассчитать $P_i(U_p < U_i)$ и $\bar{U}_p$ и оценить точность их определения.
3. По найденным $\bar{U}_p$ и σ , используя таблицы, построить график нормального распределения (интегральная кривая) и определить U_{min} .
4. Для полученных опытных данных по программе ЭВМ (по отдельной инструкции) построить гистограммы плотности вероятности и вероятности пробоев для разных величин n . Рассчитать параметры $\bar{U}_p$, σ , $\varepsilon_{\bar{U}_p}$, ε_σ и получить кривые дифференциального и интегрального распределения Гаусса.

Работа выполняется на высоковольтной испытательной установке, которая приведена на рис. 3.2.

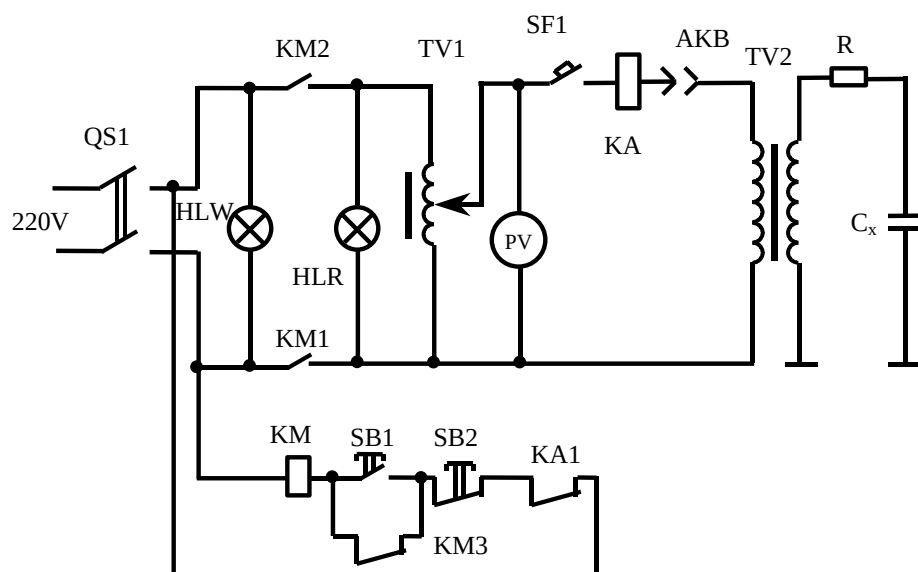


Рисунок 3.2 – принципиальная схема испытательной установки

Включение обеспечивается с помощью рубильника QS1, кнопки SB1 (ВКЛ) и магнитного пускателя KM. Отключение и защита – с помощью токового реле КА, автомата SF1 и кнопки SB2 (ОТКЛ).

При выполнении опытов использовать заданные преподавателем промежутки. Рекомендуется для получения приемлемых оценок выполнить $N=50$ опытов для каждого промежутка. Скорость подъема напряжения и условия проведения опытов выдержать, по возможности, постоянным. Для построения гистограммы по данным 50 опытов n принимается обычно в пределах 7-9. При работе с программой ЭВМ число диапазонов n можно менять.

Результаты измерений записать в табл. 3.1, а расчеты – в табл. 3.2.

Таблица 3.1

№ п/п	U_1 , В	U_2 , кВ $U_2=k_{\text{гр}}U_1$	U_{2i} , кВ	№ п/п	U_1 , В	U_2 , кВ	U_{2i} , кВ
1			$U_{2,1} \approx U_{pmin}$	26			$U_{2,26} \approx \bar{U}_p$
2				27			
...			$U_{2,25} \approx \bar{U}_p$	...			$U_{2,50} \approx U_{pmax}$
25				50			

Таблица 3.2

№ п/ п	$U_{pk} - \bar{U}_p$	Δn_k	$\frac{\Delta n_k}{N} = P_k$	$P_i(U_p \leq U_i)$	$\bar{U}_p$	σ	$\varepsilon_{\bar{U}_p}$	ε_σ

По полученным и рассчитанным данным построить гистограммы для $p_k(\Delta U_k)$ и $P_i(U_p \leq U_i)$, интегральную кривую нормального распределения Гаусса в пределах $(-3\sigma) \dots (+3\sigma)$).

Вероятность попадания нормально распределенной случайной величины U (в нашем случае - вероятность пробоя) в интервал (U_1, U_2) вычисляется по формуле

$$P(U_1 < U < U_2) = \frac{1}{2} \left[\Phi \left(\frac{U_2 - \bar{U}}{\sigma} \right) - \Phi \left(\frac{U_1 - \bar{U}}{\sigma} \right) \right],$$

$$\text{где } \Phi \left(\frac{U - \bar{U}}{\sigma} \right) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\frac{U - \bar{U}}{\sigma}} e^{-\frac{t^2}{2}} \cdot dt - \text{функция Лапласа (интеграл вероятности), некото-}$$

рые значения которой приведены в таблице.

Приведем расчет одной точки. Допустим, по экспериментальным данным $\sigma = 5$ кВ, $\bar{U} = 30$ кВ. Определим $P(U \leq 25)$.

$$\begin{aligned} P(U_p \leq 25) &= P(0 \leq U_{np} \leq 25) = \frac{1}{2} \left[\Phi \left(\frac{25 - 30}{5} \right) - \Phi \left(\frac{0 - 30}{5} \right) \right] = \\ &= \frac{1}{2} [\Phi(-1) - \Phi(-6)] = \frac{1}{2} [-0,6827 + 1] = 0,1586 \end{aligned}$$

Интеграл вероятности является функцией нечетной и

$$\Phi(-U) = -\Phi(U).$$

Аналогично рассчитываются все остальные точки в пределах от -3σ до $+3\sigma$.

Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;

7. Выводы.

Контрольные вопросы:

1. Чем определяется разброс пробивных напряжений образцов изоляции?
2. Почему разброс пробивных напряжений жидкой изоляции больше, чем воздушной?
3. Является ли исчерпывающей характеристикой изоляционных возможностей конструкции величина $\bar{U}_p$?
4. Поясните смысл основных параметров нормального распределения ($\sigma, \bar{U}_p$).
5. Почему нормальное распределение Гаусса удовлетворительно аппроксимирует экспериментальную кривую Р ($U_p = U_i$) в пределах $\bar{U}_p \pm 3\sigma$?
6. Часто очень важной величиной для оценки изоляции является величина $U_{p,min}$. Почему?
7. Определите необходимый объем испытаний для оценки $\bar{U}_p$ и σ при заданной величине погрешности.

Лабораторная работа № 4. Контроль диэлектрических потерь и измерение параметров частичных разрядов. Контроль повышенным напряжением. Испытания изоляции отдельных видов оборудования. Контроль изоляции контактной сети. Исследование перенапряжений в обмотках трансформатора.

Цель работы: Ознакомиться со схемой и работой анализатора переходных процессов. Изучить методы определения перенапряжений в главной и продольной изоляции обмотки трансформатора при воздействии на обмотку грозовых импульсов.

Основы теории:

Изоляция обмоток высоковольтных силовых трансформаторов в значительной мере определяется перенапряжениями, возникающими в обмотках при воздействии на них грозовых импульсов. При падении на обмотку импульсной волны возникают сложные электромагнитные процессы, которые приводят к быстро меняющимся перенапряжениям на элементах главной и продольной изоляции.

Точный расчет этих процессов практически невозможен вследствие взаимного влияния многих элементов: распределенных продольных и поперечных емкостей обмотки, собственных и взаимных индуктивностей витков и обмоток и т.п. Поэтому наряду с теоретическими приближенными расчетами и моделированием процессов с помощью ЭВМ часто и наиболее плодотворно используются испытания на моделях или реальных обмотках с применением анализатора переходных процессов.

Обмотка трансформатора может быть представлена линейной электрической цепью (рис. 4.1), параметры которой отнесены к единице длины.

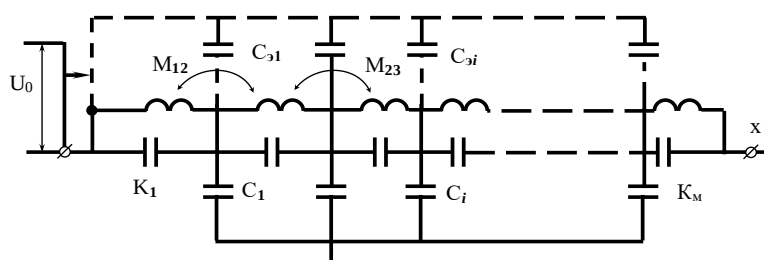


Рисунок 4.1 – Схема замещения обмотки однофазного трансформатора при падении на обмотку прямоугольной волны.

При падении на трансформатор прямоугольной волны $U_0 = const$ индуктивности в первый момент не пропускают тока, и распределение напряжения вдоль обмотки определяются только емкостями C и K . Расчет такой емкостной цепочки ([1], [3], с.201), приводит к приближенному выражению

$$U_{HAC}(x) \approx U_0 e^{-\alpha \frac{x}{l}} \approx U_0 e^{-\alpha x},$$

Справедливому и для случая заземленной, и для случая изолированной нейтрали. При этом для современных трансформаторов:

$$\alpha l = \sqrt{\frac{C}{K}} \cdot l = \sqrt{\frac{C \cdot l}{K/l}} = \sqrt{\frac{C_{об}}{K_{об}}} = 10 \div 20.$$

Так как витки и катушки обмотки соединены между собой и образуют токопроводящую цепь, первоначально возникшее распределение напряжения не может сохраниться. Возникает периодический переходный процесс, который закончится установившимся (принужденным) распределением напряжения вдоль обмотки. Принимая $M_{nk} \ll L$ для схемы рис. 4.1, получим:

при заземленной нейтрали:

$$U_{ycm}(x) = U_0 \left(1 - \frac{x}{l}\right);$$

при изолированной нейтрали:

$$U_{ycm}(x) = U_0.$$

Напряжение в некоторой точке x в произвольный момент переходного процесса может быть представлено в виде:

$$U(x, t) = U_{ycm}(x) + U_{св}(x, t) = U_{ycm}(x) + \sum_{k=1}^{k=\infty} U_k(x) \cos \omega_k t$$

где ω_k - частота k -ой пространственной гармоники,

$U_k(x)$ - функция распределения по x затухающих амплитуд собственных колебаний частоты ω .

Частота составляющих определяется параметрами эквивалентной схемы (рис.4.1),

$$\omega_k = \frac{k\pi}{\sqrt{LC + K^2 \pi^2 LK}},$$

а амплитуды зависят от рассматриваемой точки и краевых условий. Например, при глухом заземлении нейтрали $U_1(x)$, $U_2(x)$ и $U_3(x)$ распределены по длине обмотки, как показано на рис. 4.2,а – кривые 1, 2, 3. С ростом номера гармоники амплитуды быстро уменьшаются, поэтому для грубой оценки переходного процесса достаточно учитывать лишь три первые составляющие. Характерные кривые перенапряжения в обмотке в различные моменты времени представлены на рис.4.2. Кривая, проведенная через максимальные значения напряжения, возникающие в обмотке в различные моменты времени, называется огибающей максимальных потенциалов.

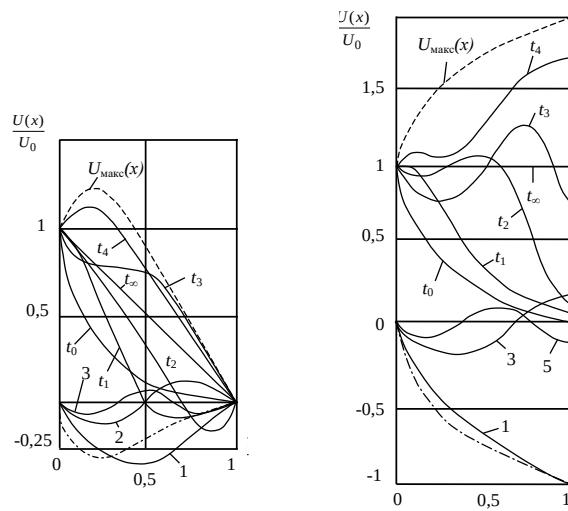


Рисунок 4.2 – Кривые распределения напряжения по обмотке трансформатора

Для приближенной оценки максимально возможных потенциалов в каждой точке обмотки можно считать, что гармонические колебания не затухают и период колебания T всех гармоник одинаков. Тогда

$$U(x)_{\max} = U_{\text{ycm}}(x) + \sum_{k=1}^{k=\infty} U_k(x) =$$

$$= U_{\text{ycm}}(x) + [U_{\text{ycm}}(x) - U_{\text{нач}}(x)] = 2U_{\text{ycm}}(x) - U_{\text{нач}}(x)$$

Как видно из рис. 4.2 максимальные напряжения при изолированной нейтрали наблюдаются на конце обмотки и могут достичь величин $(1,7-1,9) U_0$. Для трансформаторов с заземленной нейтралью максимальное напряжение до $(1,2-1,3) U_0$ наблюдается вблизи начала обмотки $\left(\frac{x}{\ell} \approx 0,3\right)$.

Максимальные напряженности в продольной изоляции наблюдаются в начале обмотки в первый момент после падения волны. Величина максимального градиента может быть оценена по соотношению

$$\left| \frac{dU}{dx} \right| = U_0 \alpha e^{-\alpha x}$$

$$E_{\max} = \left| \frac{dU}{dx} \right|_{\max} = \left| \frac{dU}{dx} \right|_{x=0} = U_0 \cdot \alpha = \frac{U_0}{l} \alpha l = E_{\text{cp}} \cdot \sigma \ell$$

где $E_{\text{cp}} = \frac{U_0}{\ell}$ - продольная напряженность при равномерном распределении напряжения вдоль обмотки.

В последующие моменты времени максимальные напряжения на продольной изоляции распространяются вглубь обмотки, при этом уменьшается их амплитуда.

Для снижения перенапряжений, возникающих на главной и продольной изоляции, в некоторых трансформаторах устанавливаются емкостные экраны в виде разомкнутых колец, соединенных с началом обмотки. В этом случае поперечные токи, оттекающие от обмотки через емкости C_i , компенсируются токами, подтекающими через емкости $C_{\varepsilon i}$, и первоначальное распределение напряжения вдоль обмотки выравнивается. Полное устранение колебательного процесса в обмотке трансформатора с заземленной нейтралью при $C_i = const$ наступает при условии

$$C_{\varepsilon i} = \frac{m-i}{i} C_i$$

где i – номер катушки, считая от начала обмотки; m – число катушек в обмотке (рис.4.1).

В настоящей работе с помощью анализатора переходных процессов исследуются перенапряжения в обмотке трансформатора ТМ 10/380 320 кВА. Используется изолированная обмотка ВН одной фазы. Обмотка низкого напряжения этой фазы разомкнута.

Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

Указания по выполнению лабораторной работы:

1. Подать напряжение на схему с помощью выключателя QS1 и автотрансформатором Т1 установить необходимое напряжение на тиристоре VU1, VD1 (по указанию преподавателя).
2. Изменяя системой напряжение R1, C2 на управляющем электроде открыть тиристор. На выходе генератора появляются импульсы.
3. Проконтролировать форму импульса с помощью осциллографа.
4. Подключить исследуемый трансформатор к генератору импульсов согласно рис. 4.5.
5. С помощью осциллографа исследовать изменение напряжения при переходном процессе в отдельных точках (1,2,3,4,5,6) обмотки на главной изоляции (рис. 4.3):
 - а) с заземленной нейтралью;
 - б) с изолированной нейтралью.

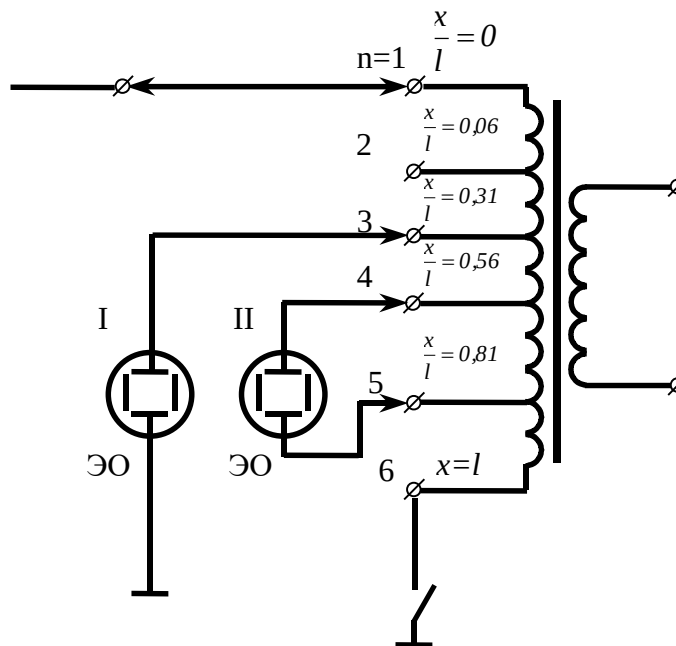


Рисунок 4.3 – Схема подключения осциллографа при исследовании перенапряжений в обмотке трансформатора; 1- измерение напряжения на главной изоляции; 2 – измерение напряжения на продольной изоляции

Результаты работы записать в табл. 4.1.

Таблица 4.2

Исследуемый участок обмотки	Заземленная нейтраль	Изолированная нейтраль
	$\Delta U_{\text{макс}}$	$\Delta U_{\text{макс}}$
1-2		
2-3		
.....		

Зарисовать 2-3 характерные осциллограммы.

Проверить влияние величины R_2 на ΔU при изолированной и заземленной нейтрали.

По результатам табл. 4.2 построить в относительных единицах кривые $\frac{E_{\text{макс}}(x)}{E_{\text{ср}}} = f(x)$

для обоих исследованных случаев $E_{\text{макс}}(x) = \frac{\Delta U_{\text{макс}}}{\Delta l}$ или, например

$$E_{\text{макс}}(1-2) = \frac{\Delta U_{\text{макс}}(1-2)}{0,06} \text{ и т.д.}$$

Аналогичные исследования можно произвести на модели обмотки, схема которой соответствует схеме замещения трансформатора (рис. 4.1). Смонтированная в лаборатории ТВН модель имеет следующие параметры: емкости катушек относительно земли $C_3 = C_1 = \dots C_i \dots = C_o = 800 \text{ нФ}$; продольные емкости $C_n = K_1 = \dots K_i = K_{10} = 820 \text{ нФ}$; $L_1 = L_i = \dots L_{10} = 1,8 \text{ Гн}$. При таких величинах емкостей $al = \sqrt{\frac{C_3}{C_n}} \cdot N \approx 10$, т.е. соответствует al реальных трансформаторов.

Все условные точки модели имеют выводы, позволяющие набирать чисто емкостные цепочные схемы, схемы с индуктивностями, схемы с C_3 .

Емкости C_3 - сменные и могут меняться от 100 пФ до 3000 пФ, что дает возможность регулировать первоначальное распределение напряжения вдоль обмотки от экспоненциального $U(n) = U_0 \cdot e^{-\alpha n}$ при $C_3 = 0$ до линейного при

$$C_3 = \frac{N-n}{n} C_3.$$

В качестве индуктивностей L используются дроссели. Собственная частота колебаний модели обмотки при включенных C_n и C_3 лежит в пределах $10^3 \div 2 \cdot 10^3$ Гц, что близко к собственным частотам колебаний обмоток реальных трансформаторов. Однако эта частота несколько ниже собственной частоты исследуемого трансформатора ТМ – 10/0,4; 320 кВА ($5 \cdot 10^3$ Гц). Переходной процесс в модели регистрируется более четко и наглядно, и работа с моделью достаточно проста.

Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

Контрольные вопросы:

1. Нарисуйте схему замещения обмотки трансформатора в момент падения на обмотку прямоугольной волны, в установившемся режиме и в переходном режиме.
2. Что такое огибающие максимальных потенциалов?
3. На каком участке обмотки возможны максимальные напряжения в переходном режиме для случая: а) с заземленной нейтралью; б) с изолированной нейтралью?
4. Как оценить величину напряженности в продольной изоляции, если известна кривая распределения напряжения вдоль обмотки?
5. В какой части обмотки наблюдаются наибольшие напряжения на продольной изоляции?
6. Какие вы знаете способы выравнивания распределения напряжения вдоль обмотки?
7. Как работает схема анализатора переходных процессов? Назначение ее отдельных элементов.
8. Как находится первоначальное и установившееся распределение напряжения вдоль обмотки с помощью осциллограмм, полученных при работе анализатора переходных процессов?
9. Как влияет на максимальное напряжение в главной изоляции и максимальные градиенты в продольной изоляции крутизна фронта падающей на обмотку волны?

Лабораторная работа № 5. Испытательные установки высокого переменного и постоянного напряжения. Исследование модели каскадного выпрямителя высокого напряжения.

Цель работы: Изучение устройства и принципа действия каскадного выпрямителя высокого напряжения. Определение изменений потенциалов различных точек схемы трехкаскадного выпрямителя в установившемся режиме при холостом ходе. Снятие зависимостей выходного напряжения и пульсаций напряжения от тока нагрузки и числа ступеней выпрямителя.

Основы теории:

Высокое напряжение постоянного тока для испытания изоляционных конструкций получают обычно с помощью высоковольтных выпрямителей, в которых в качестве вентиля используются полупроводниковые выпрямительные диоды.

При относительно небольших напряжениях (до 100-200 кВ) применяют однополупериодные, двухполупериодные или мостовые схемы выпрямления. Эти схемы питаются от сети переменного тока через повышающий трансформатор. Вторичное амплитудное напряжение трансформатора должно быть приблизительно равно требуемому напряжению постоянного тока.

Для получения более высоких напряжений могут быть использованы схемы выпрямления с умножением напряжения – схемы удвоения напряжения или многоступенчатые схемы. Они позволяют получить более высокое постоянное напряжение, чем вторичное напряжение питающего трансформатора при сравнительно небольшом обратном напряжении на вентилях.

Рассмотрим работу схемы, приведенной на рис. 6.1. Для упрощения анализа предположим, что вентили и конденсаторы идеальные.

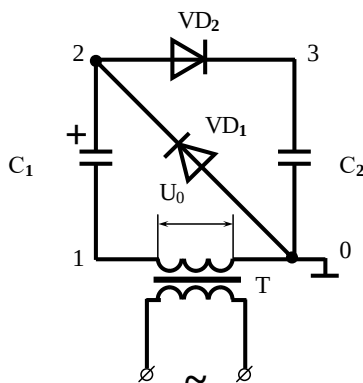


Рисунок 6.1 – Схема одной ступени каскадного выпрямителя

Пусть на схему подано напряжение $U_2 = U_{2m} \cdot \sin(\omega t + \pi)$ (рис. 6.2). В течение первой четверти периода ($0 - t_1$) клапан VD_2 закрыт, а клапан VD_1 открыт и конденсатор C_1 заряжается по контуру 0-2-1. В момент t_1 , напряжение на конденсаторе $U_{C1} = U_{2m}$ и заряд $Q_1 = Q_m = C_1 \cdot U_{2m}$. Затем, U_2 пройдя через отрицательный максимум, начинает увеличиваться. Потенциал φ_2 точки 2 становится положительным. Клапан VD_1 закрывается, а клапан VD_2 открывается. В течении времени $t_1 - t_2$ под действием напряжения источника питания и напряжения на конденсаторе C_1 , который включен согласно, в цепи 1-2-3-0 протекает ток. Конденсатор C_1 разряжается, а конденсатор C_2 заряжается. Напряжение на C_2 достигает максимальной величины в момент t_2 .

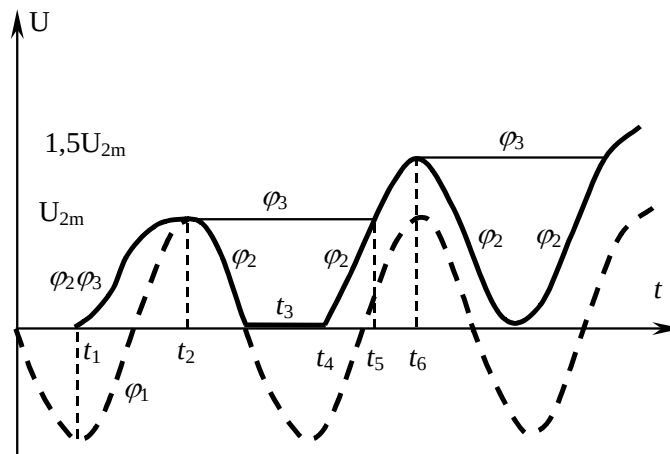


Рисунок 6.2 – Изменение потенциалов точек схемы (рис. 6.1) при зарядке выпрямителя

Для определения U_{C1} и U_{C2} рассмотрим контур 1-2-3-0. Клапан VD_2 включен в прямом направлении, и его сопротивление равно нулю. Поэтому $U_2 + U_{C1} = U_{C2}$. В момент времени t_2 : $U_2 = U_{2m}$, а напряжение на конденсаторе C_2 $U_{C2} = \frac{Q}{C_2}$, где Q - заряд, переместившийся по контуру за время $t_1 - t_2$. Заряд конденсатора C_1 уменьшится и станет равным $Q_1 - Q$, поэтому $U_{C1} = \frac{Q_1 - Q}{C_1}$. Учитывая это, получим:

$$U_{2m} + \frac{Q_1 - Q}{C_1} = \frac{Q}{C_2}, \text{ или}$$

$$U_{2m} + \frac{Q_1}{C_2} = Q \frac{C_1 + C_2}{C_1 \cdot C_2}.$$

Так как

$$Q_1 / C_1 = U_{2m}, \text{ то}$$

$$Q = 2U_{2m} \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2},$$

Откуда:

$$U_{C1} = 2U_{2m} \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2};$$

$$U_{C2} = 2U_{2m} \frac{C_1}{C_1 + C_2}.$$

При $C1=C2$ в момент t_2 конденсатор $C1$ полностью разряжен, а $C2$ заряжен до U_{2m}

После t_2 питающее напряжение начинает уменьшаться, φ_2 становится ниже φ_3 . Вентиль VD_2 закрывается. Вентиль VD_1 откроется только после t_3 , когда напряжение питания становится отрицательным и φ_1 - ниже нуля. Конденсатор $C1$ заряжается по контуру 0-2-1 и к моменту t_4 $U_{C1} = U_{2m}$.

После t_4 напряжение питания увеличивается, φ_2 становится положительным, но вентиль VD_2 открывается только в момент t_5 , когда $\varphi_2 = \varphi_3 = U_{2m}$. Конденсатор $C2$ подзаряжается по контуру 1-2-3-0. Пользуясь уже рассмотренным методом, можно легко определить, что в момент t_6 : $U_{C1} = 0,5U_{2m}$, а $U_{C2} = 1,5 \cdot U_{2m}$.

После t_6 вентиль VD_2 закрывается, на конденсаторе $C2$ остается напряжение $1,5 U_{2m}$. Когда φ_2 станет равным нулю, откроется вентиль VD_2 , и конденсатор $C1$ подзарядится до U_{2m} . После того, как питающее напряжение пройдет через отрицательный максимум, φ_2 становится положительным и VD_1 закроется.

Затем откроется вентиль VD_2 , и конденсатор $C2$ подзарядится за счет $C1$ и питающего напряжения до $1,75U_{2m}$. Нетрудно видеть, что в установившемся режиме напряжение на $C2$ достигает $2 U_{2m}$.

Если между точками 3 и 0 включена нагрузка R_n , то в течение промежутка времени, когда VD_2 заперт, конденсатор C_2 будет частично разряжаться через R_n . Выходное напряжение будет пульсирующим (рис. 6.3). Пульсации напряжения δU зависят от величины C_2 , R_n и времени, в течении которого закрыт вентиль VD_2 . Из-за постоянного разряда амплитуда напряжения на C_2 будет отличаться от $2 U_{2m}$ на некоторую величину ΔU , которую называют падением напряжения. При равенстве C_1 и C_2 $\Delta U = \delta U$.

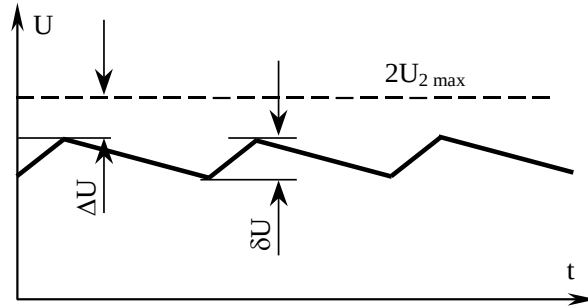


Рисунок 6.3 – Падение напряжение и напряжение пульсаций для схемы

Схема трехступенчатого каскадного выпрямителя приведена на рис. 6.4. Процесс зарядки конденсатора во времени протекает так же, как и в одноступенчатой схеме.

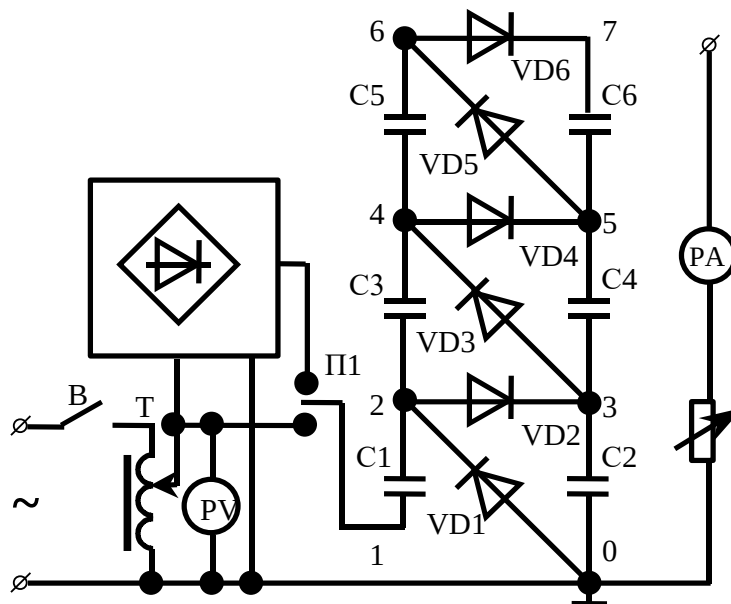


Рисунок 6.4 – Схема трехступенчатого каскадного выпрямителя

В установившемся режиме конденсатор C_1 заряжен до напряжения U_{2m} , а C_2 – до $2 U_{2m}$. Потенциал точки 2 изменяется от 0 до $2 U_{2m}$. Следовательно, конденсатор C_3 может зарядиться до $2U_{2m}$. Потенциал точки 4 тогда будет меняться от $2 U_{2m}$ до $4U_{2m}$, и

через вентиль VD5 конденсатор C5 зарядится до $2U_{2m}$. Тогда потенциал точки 6 будет меняться от $4U_{2m}$ до $6U_{2m}$, и через VD6 конденсатор C6 зарядится до $2U_{2m}$. Выходное напряжение схемы складывается из напряжений на конденсаторах C2, C4, C6 и составит $6U_{2m}$. В общем случае при n ступенях

$$U_{вых} = 2U_{2m} \cdot n = 2\sqrt{2 \cdot n} \cdot U_2$$

Поскольку заряд, поступающий на верхние ступени, отбирается от предыдущих, то многоступенчатые схемы оказываются очень чувствительными к нагрузке. Напряжение пульсации δU и падение напряжения ΔU быстро возрастают с увеличением числа ступеней. Для выпрямителя с n ступенями эти величины могут быть рассчитаны по следующим приближенным соотношениям:

$$\delta U = \frac{I_n}{f \cdot C} \cdot \frac{(n+1)n}{2};$$

$$\Delta U = \frac{I_n}{f \cdot C} \left(\frac{2}{3}n^3 + \frac{1}{2}n^2 - \frac{1}{6}n \right),$$

где I_n - среднее значение тока нагрузки;

n – число ступеней генератора;

f_c - частота питающего напряжения;

C - емкость конденсатора схемы (при $C_1=C_2=\dots C_n=C$).

Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

Указания по выполнению лабораторной работы:

В настоящей работе необходимо:

1. Ознакомиться со схемой и принципом работы каскадного выпрямителя, подготовить таблицу для записи результатов измерений. Ознакомиться с расположением ручек управления осциллографа.
2. С разрешения преподавателя подать на установку питание, включить освещение электростатического вольтметра и проверить положение нуля, включить электронный осциллограф и отрегулировать фокусировку и яркость луча.
3. Не включая нагрузки, перечертить с экрана осциллографа на один общий график напряжение на всех ступенях выпрямителя.

Для этого включить выключатель В, переключателем П1 подать на схему переменное напряжение и с помощью автотрансформатора установить входное напряжение схемы 5В. Вход постоянного тока осциллографа включить между точками 0-1. Усиление осциллографа подобрать таким, чтобы размах синусоиды на экране составлял 1 см. Перечертить форму напряжения на график. Затем, не меняя усиления и не смещая положения луча, включить осциллограф между точками 0-2, 0-3, 0-4, 0-5, 0-6, 0-7 и перечертить форму напряжений. Полученный график сравнить с рис. 6.5, объяснить.

4. Проградуировать по напряжению осциллограф по входу переменного тока. Для этого переключатель входа осциллографа со схемы выпрямителя подать переменное напряжение 5В и установить усиление таким, чтобы размах синусоиды на экране осциллографа составлял 4 см. Тогда чувствительность осциллографа по напряжению составит:

$$K_Y = \frac{2\sqrt{2}U_{ex}}{4}$$

При дальнейших измерениях положения осциллографа не менять.

5. Снять зависимость выходного напряжения и напряжения пульсации от тока нагрузки для одной, двух и трех ступеней каскадного выпрямителя.

Для этого установить напряжение питания выпрямителя 17В. По электростатическому вольтметру определить выходное напряжение выпрямителя, изменяя то нагрузки от 0 до 400 мкА.

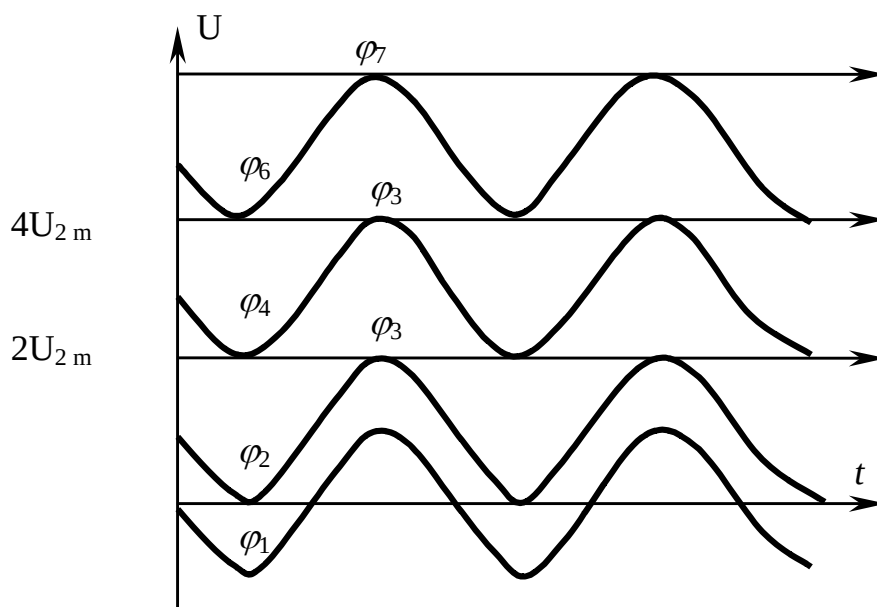


Рисунок 6.5 – Изменение потенциалов в различных точках схемы трехступенчатого выпрямителя в установившемся режиме

На экране осциллографа измерить величину пульсаций выходного напряжения в см.
Результаты измерений занести в таблицу.

Таблица 6.1 – Выходное напряжение и напряжение пульсаций каскадного выпрямителя

№ п/п	Число ступеней выпрямителя	Ток нагрузки выпрямителя, мкА	0	100	200	300	400
1	1	U_m , В					
		δy , см					
		δU , В					
2	2	$U_{вых}$, В					
		δy , см					
		δU , В					
3	3	$U_{вых}$, В					
		δy , см					
		δU , В					

Здесь: $U_{вых}$ - выходное напряжение выпрямителя, определяемое по электростатическому вольтметру;

δy - напряжение пульсаций на экране осциллографа, см;

δU - напряжение пульсаций, В;

K_y - чувствительность осциллографа, определенная в 6.3.

При измерении выходного напряжения выпрямителя на холостом ходу отключить от схемы выпрямителя нагрузку и вход осциллографа.

6. По полученным данным построить для одной, двух, трех ступеней выпрямителя зависимости выходного напряжения и напряжения пульсации от тока нагрузки $U_{вых} = f(I_H)$ и $\delta U = f(I_H)$.

7. Рассчитать выходное напряжение и напряжение пульсации для одной; двух, трех ступеней выпрямителя и построить зависимости $U_{вых} = f(I_H)$ и $\delta U = f(I_H)$ - на предыдущем графике.

Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;

5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

Контрольные вопросы:

1. Принцип работы однофазного выпрямителя на емкостную нагрузку. Соотношение напряжений на элементах схемы.
2. Схема и принцип работы одной ступени каскадного выпрямителя в процессе зарядки.
3. Принцип умножения напряжения с помощью многоступенчатой схемы выпрямителя.
4. Достоинства и недостатки многоступенчатых каскадных выпрямителей.
5. Проанализировать работу одной ступени выпрямителя при питании прямоугольными импульсами чередующейся полярности.

Лабораторная работа № 6. Генераторы импульсных напряжений. Генератор импульсных напряжений 750 кВ.

Цель работы: Ознакомиться со способами получения грозовых импульсов, устройством и работой ГИН 750 кВ; Изучить методы регулирования параметров грозового импульса и методы их измерения; Произвести измерение амплитуды грозового импульса с помощью измерительных шаров диаметром 50 см. Ознакомиться с методами регистрации формы грозового импульса с помощью электронного осциллографа.

Основы теории:

В процессе эксплуатации на электрическую изоляцию линий и аппаратов воздействуют грозовые и внутренние перенапряжения. Грозовые перенапряжения возникают при ударах молнии и имеют форму кратковременного апериодического импульса. Внутренние перенапряжения связаны прежде всего с различного рода коммутациями и переходными режимами. Форма внутренних перенапряжений зависит от их вида, но чаще всего – это затухающие колебания с некоторой максимальной амплитудой. При лабораторных исследованиях импульсных процессов используются генераторы грозовых и коммутационных импульсов и измерительные системы, позволяющие определить амплитуду и регистрировать форму однократного или многократного импульса напряжения.

Амплитуда может быть измерена с помощью шарового разрядника, а для регистрации формы импульса используются высоковольтные осциллографы с емкостными или смешанными делителями напряжения.

Импульсные установки должны обеспечить генерацию апериодических импульсов напряжения (тока). Основными параметрами импульса (рис. 7.1) являются: амплитуда U_{max} , длительность фронта импульса τ_ϕ , длительность импульса τ_u .

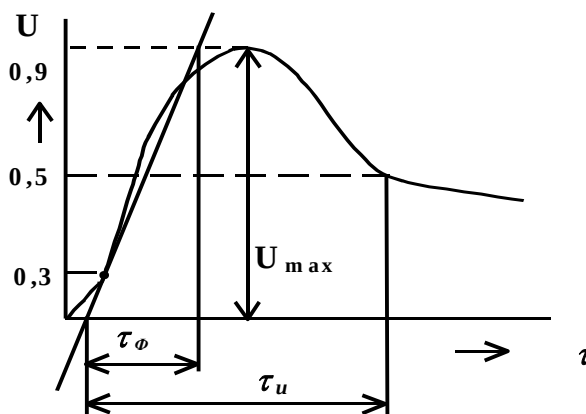


Рисунок 7.1 – Основные параметры импульса ГИН

Стандартные импульсы, имитирующие атмосферные перенапряжения, имеют $\tau_{\phi}=1,2$ мкс, $\tau_u=50$ мкс. Импульсы, имитирующие внутренние перенапряжения, имеют $\tau_{\phi}=250$ мкс, $\tau_u=2500$ мкс.

Схема ГИН, представленная на рис. 7.2, состоит из двух блоков – зарядного устройства 1 (ЗУ) и умножителя напряжения 2 (УН).

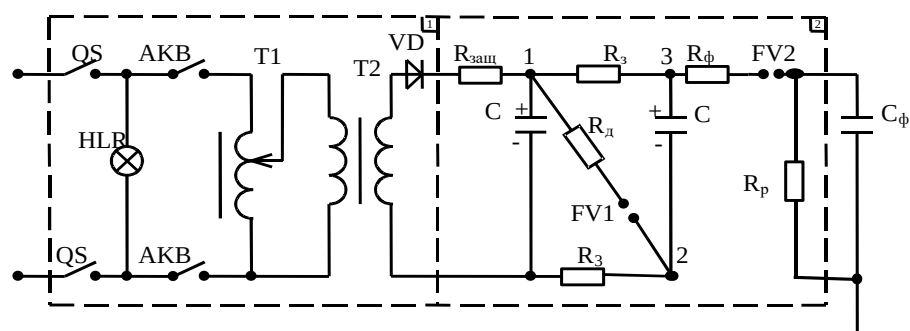


Рисунок 7.2 – Схема ГИН

Зарядное устройство 1 включает регулировочный автотрансформатор Т1, повышающий трансформатор Т2 и высоковольтный выпрямитель VD, то есть ЗУ представляет однополупериодный, высоковольтный, регулируемый выпрямитель. В качестве вентиль VD на напряжение 100 кВ используют выпрямительные столбики на полупроводниковых диодах.

Умножитель напряжения 2 включает конденсаторы С, резисторы $R_{заш}$, R_3 , $R_д$, $R_ф$ и разрядные промежутки FV1, FV2. На рис. 7.2 приведена схема удвоения напряжения.

Принцип работы ГИНа заключается в следующем: на первой стадии, в режиме заряда конденсаторы С соединены параллельно и заряжаются от ЗУ через резисторы $R_{заш}$, R_3 с полярностью, указанной на схеме (рис. 7.2). Защитный резистор $R_{заш} = 3 \cdot 10^6$ Ом предназначен для ограничения тока заряда в момент включения, т.е. защищает вентиль VD и трансформатор Т2 от перегрузки.

Величина напряжения, до которого заряжаются конденсаторы С определяется электрической прочностью искрового промежутка FV1 но не должна превышать амплитуду выпрямленного напряжения U_{2m} .

Когда напряжение в точке 1 превысит электрическую прочность промежутка FV1, происходит пробой этого промежутка и конденсаторы С соединяются последовательно, - точка 2 будет соединена с точкой 1 через демпфирующий резистор $R_д$ и сопротивление искрового промежутка FV1.

Благодаря тому, что сопротивление резистора R_3 велико ($R_3=5 \cdot 10^4$ Ом), а сопротивление резистора R_ϕ мало ($R_\phi=10-20$ Ом), конденсаторы не успевают разрядиться, потенциал точки 2 повышается до потенциала точки 1, а потенциал точки 3 увеличивается, примерно, в два раза.

При переключении конденсаторов C с параллельной схемы на последовательную происходит пробой разрядного промежутка $FV2$, так как его электрическая прочность ниже величины удвоенного напряжения умножителя, выходное напряжение умножителя будет приложено к объекту испытания C_ϕ и разрядному резистору R_p .

Скорость нарастания напряжения на объекте (длина фронта импульса) будет определяться постоянной времени заряда конденсатора C_ϕ , т.е.

$$\tau_\phi = (2 \div 3) \cdot (R_3 + R_\phi) \cdot C_\phi$$

Когда напряжение на объекте (C_ϕ) достигнет предельного значения, конденсаторы C и C_ϕ начнут разряжаться через главный разрядный резистор R_p (спад импульса). При этом длительность волны импульса приблизительно в данной схеме будет равна

$$\tau_u = 0,67 \left(\frac{C}{2} + C_\phi \right) \cdot (R_\phi + R_p)$$

Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

Указания по выполнению лабораторной работы:

1. Ознакомиться с инструкцией по технике безопасности для данной установки.
2. Ознакомиться со схемами ГИН-750, схемой зарядного устройства ЗУ-150 и схемой управления шарами.
3. Ознакомиться с перечисленными устройствами и установками в натуре, записать паспортные данные основного оборудования и определить полярность получаемого импульса.
4. Рассчитать основные параметры ГИН: емкость в ударе C_y , энергию в ударе и коэффициент использования ГИН.
5. Руководствуясь инструкцией к ЗУ-150 включить ГИН-750 в работу и добиться устойчивого рабочего хода с периодичностью импульса 3-5 с.
6. Измерить амплитуду импульса измерительными шарами.

7. Используя импульсный электронный осциллограф, определить основные параметры полученных импульсов.

8. Провести исследование влияния различных параметров схемы ГИН на величину амплитуды грозового импульса и времени ее достижения, используя компьютерную программу GIN (Инструкция по пользованию программой приводится в Приложении 1 практикума).

Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

Контрольные вопросы:

1. Назначение и принцип работы ГИН.
2. Основные элементы ГИН и их влияние на форму и параметры импульса.
3. Способы регулирования режима работы ГИН для измерения амплитуды импульсов и частоты их следования.
4. Методы измерения импульсных напряжений: амплитуды апериодического импульса, длины фронта и длины импульса.
5. Блок-схема осциллографа для регистрации однократных кратковременных импульсов высокого напряжения.

Лабораторная работа № 7. Генераторы импульсных напряжений. Определение зон защиты стержневых и тросовых молниеотводов.

Цель работы: Изучить расчетные методы определения зон защиты стержневых и тросовых молниеотводов. Ознакомиться с экспериментальными методами исследования защитных зон молниеотводов с использованием ГИН. Определить экспериментально и сравнить с расчетными зоны защиты стержневых и тросовых молниеотводов. Провести визуальное исследование зон защиты стержневых и тросовых молниеотводов по компьютерной программе.

Основы теории:

Стержневые и тросовые молниеотводы являются основным средством защиты энергетических и промышленных сооружений и установок от прямых ударов молнии (ПУМ). Реальный молниеотвод состоит из молниеприемника в виде стержня или троса, возвышающегося над объектом защиты, токоведущих спусков и заземлителя.

Молниеотводы воспринимают на себя удары молнии и образуют вокруг себя пространство, защищенное от ПУМ с большой степенью вероятности. Это пространство называется зоной защиты молниеотвода.

Защитное действие молниеотвода связано с тем, что развивающийся от облака лидерный разряд ориентируется в направлении максимального градиента (напряженности) электрического поля. Начиная с некоторой высоты $H = 10 - 20h$, где h является высотой защищаемого объекта на ориентацию лидерного разряда начинает влиять наиболее возвышающийся проводящий заземленный предмет (молниеотвод высотой h), в направлении которого поле резко усиливается.

При формировании лидерного канала над молниеотводом или с некоторым смещением (не более $3,5h$) молния или поразит молниеотвод, или ударит на значительном расстоянии в землю.

Если вблизи молниеотвода или под ним располагаются сооружения или оборудование, то при определенном возвышении молниеотвода над объектами защиты вероятность их поражения ПУМ может быть доведена до очень малых значений. Однако следует помнить, что статистический характер процесса пробоя длинных воздушных промежутков (молнии) при любых условиях оставляет некоторую вероятность поражения молнией объекта защиты. Поэтому зоны защиты молниеотводов ограничиваются расстояниями (кривыми), определенными с заданной степенью вероятности защиты, например с $P_z = 0,999$.

Принятые нормы и рекомендации по расчету зон защиты молниеотводов получены на основании лабораторных исследований и подтверждаются полевыми наблюдениями за поражаемостью ПУМ реальных объектов и молниеотводов.

Зона защиты одиночного стержневого молниеотвода (рис. 8.1) вследствие осевой симметрии имеет вид тела вращения с образующей, удовлетворяющей уравнению:

$$r_x = 1,6h \frac{h - h_x}{h + h_x} p$$

где $p=1$ при $h \leq 30$ и $p = 5,5/\sqrt{h}$ при $h > 30$.

Для двух, трех и более стержневых молниеотводов при оптимальном их расположении общая зона защиты заметно превышает сумму зон отдельно стоящих двух, трех и более молниеотводов, так как общая вероятность прорыва молнии к объекту в сфере действия нескольких молниеотводов уменьшается.

На рис. 8.2 представлены зоны защиты двух, трех и четырех молниеотводов. Для двух молниеотводов внешняя огибающая в разрезе проводится также, как и для одиночного молниеотвода. Прогиб огибающей между вершинами определяется по окружности, проведенной через точки 1, 2 (рис. 8.2, а). Наименьшая ширина $2b_x$ на уровне h_x в плане находится по кривым или по выражению

$$b_x = 4r_x(7h_a - a)/(14h_a + a)$$

Построение внешней границы зоны защиты трех или четырех стержневых молниеотводов производится попарно по расчетным соотношениям для каждой двух соседних молниеотводов. Условие защиты всей площади между молниеотводами на уровне h_x определяется соотношением $D \leq 8h_a$, где D является диаметром окружности, проведенным через точки 1, 2, 3 или большая диагональ четырехугольника 1, 2, 3, 4 (рис. 8.2 б, в).

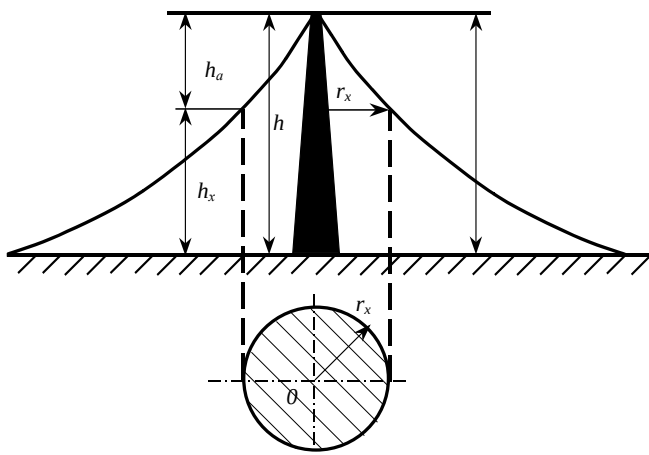


Рисунок 8.1 – Зона одиночного стержневого молниеотвода

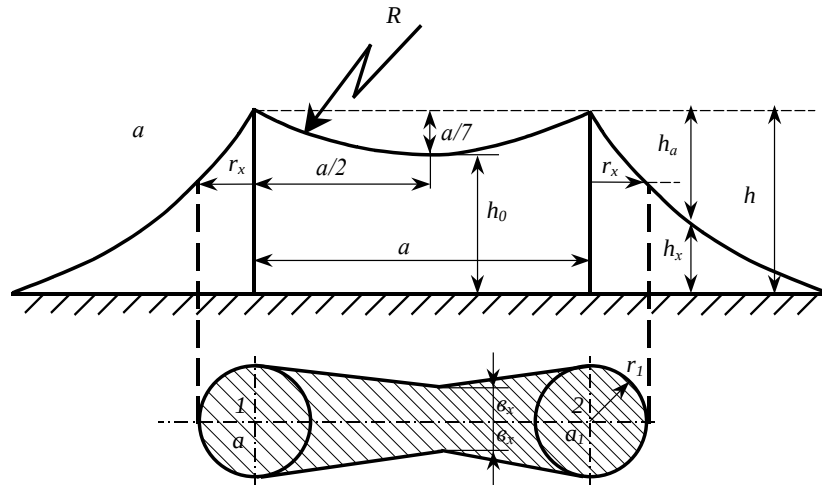


Рисунок 8.2 – Зона защиты двухстержневого молниеотвода

Для оценки эффективности тросовой защиты проводов ВЛ чаще всего используется понятие угла защиты α (рис. 8.3).

Лабораторные исследования и полевые наблюдения показывают, что эффективность тросовой защиты может быть определена по выражению

$$\lg P_{\alpha} = \frac{\alpha \sqrt{h_{on}}}{90} - 4 ,$$

где P_{α} - вероятность прорыва молнии через тросовую защиту;

h_{on} - высота опоры в метрах;

α - угол защиты, градусы.

При лабораторных исследованиях канал молнии моделируется обычно металлическим стержнем, на который подаются импульсы напряжения от ГИН. Стержень располагается на «высоте ориентации» молнии $H_M \approx (10 - 20)h_m$,

где h_m - высота модели молниеотвода.

Стержень перемещается в горизонтальной плоскости на расстоянии до $4h_m$ и более от оси молниеотвода (или наоборот молниеотвод перемещается относительно неподвижного стержня). Максимальная высота H_M при этом ограничена расстоянием, которое может быть перекрыто с помощью ГИН при положительном импульсе. По величине H_M можно найти размеры моделей молниеотводов и объектов защиты.

Испытательная установка (рис. 8.4) состоит из ГИН-750 кВ (см. лаб. работу № 7); стержня, имитирующего канал разряда молнии; заземленной плоскости; моделей стержневых молниеотводов; моделей объектов защиты и модели воздушной линии с защитными тросами.

Модели можно произвольно располагать на плоскости, а стержень перемещать по вертикали. Амплитудное значение импульса ГИН-750 $U_{имп. max} = 600 - 700$ кВ. Это напряжение при положительной полярности стержня позволяет перекрыть расстояние 1-1,2 метра. Поэтому для моделей стержневых молниеотводов приняты $h_m = 10$ и 15 см, объектов защиты $h_{м.об} = 5$ и 7 см.

Кроме строгого соблюдения правил ТБ при работе на испытательных установках высокого напряжения при выполнении данной работы необходимо иметь в виду следующее:

1. Подготовка моделей к испытанию и их перемещение по ходу работы при снятом напряжении и заземленной установке, а также включение ГИН-750 в работу и его отключение выполняется только преподавателем или лаборантом.

2. При работе ГИН-750 кВ студенты должны находиться на расстоянии не менее 0,5 метра от сетчатого ограждения.

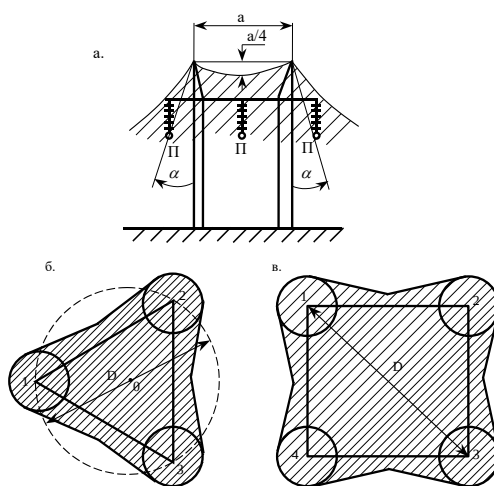


Рисунок 8.3 – Зоны защиты

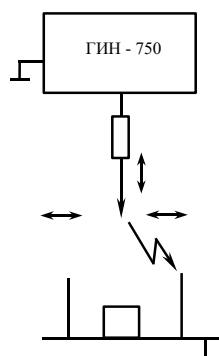


Рисунок 8.4 – принципиальная схема испытательной установки

Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

Указания по выполнению лабораторной работы:

1. По заданным размерам молниеотводов (h) и объектов защиты (например, $h_{об} = 0,5h$):

а) рассчитать радиус защиты отдельно стоящего стержневого молниеотвода на уровне земли и на уровне $h_{об}$;

б) рассчитать максимальное расстояние (а) между двумя молниеотводами одинаковой высоты (h) при расположении посередине между ними объекта защиты ($h_{об} = 0,5h$);

в) вычертить полученные зоны защиты в разрезе и в плане (на уровнях $h_x = 0$ и $h_x = h_{об}$).

2. Выполнить опытную проверку расчетных зон защиты на модели:

а) определить масштаб линейного моделирования $K_M = \frac{H_M}{H}$ при $H_M = 1м$ для случая $H = 10h$ при $h \leq 30м$ и вычислить размеры модели ($h_M = K_M h$);

б) установить модель молниеотвода на расстоянии $3,5h_M$ от оси стержня, а модель объекта защиты $h_{м.об} = h_{мх} = 0,5h_M$ на расстоянии $r_{хм}$ от оси молниеотвода;

в) включить ГИН-750 и определить вероятность поражения объекта для заданного числа разрядов (10-20).

Внимание! Операции включения и отключения ГИН-750 выполняются только преподавателем или лаборантом;

г) установить модели двух стержневых молниеотводов одинаковой высоты на расстоянии $\alpha_M = \alpha K_M$ друг от друга и модель объекта защиты $h_{м.об}$ посередине между молниеотводами. Включить ГИН и убедиться, что при принятых условиях вероятность поражения объекта практически равна нулю.

3. Рассчитать вероятность прорыва молнии мимо троса к проводу для опор высотой $h=16м$ и $20м$ при углах защиты $\alpha=20^\circ$, 25° и 30° . Выполнить качественную проверку эффективности тросовой защиты на модели воздушной линии.

Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

1. Название работы;

2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

Контрольные вопросы:

1. Объясните, с чем связано защитное действие стержневых и тросовых молниеотводов.
2. С какой высоты молния начинает ориентироваться на молниеотвод?
3. Что такое защитная зона молниеотвода?
4. Почему защитная зона ограничивается поверхностью, которая определяется с некоторой вероятностью?
5. Как определяются границы защитных зон стержневых и тросовых молниеотводов?
6. В чем заключается линейное моделирование молниеотводов и объектов защиты от ПУМ?
7. Как проверить соответствие результатов, полученных на моделях, защитному действию реальных молниеотводов?
8. Покажите защитный угол тросовой защиты ВЛ. Как зависит вероятность прорыва молнии мимо троса к проводу от величины защитного угла?

Лабораторная работа № 8. Распространение волн перенапряжений. квазистационарные и коммутационные перенапряжения. Защита от перенапряжений. Защитные разрядники и ограничители перенапряжений.

Цель работы: Ознакомление с назначением, принципом действия и конструкцией разрядников и ограничителей перенапряжений (ОПН). Изучение особенностей работы и применения основных типов трубчатых и вентильных разрядников и ОПН. Расчет характеристик и защитного действия разрядников с использованием ЭВМ.

Основы теории:

Волны перенапряжений, возникшие на линиях при ударах молнии, распространяются по проводам, доходят до подстанции и могут представлять опасность для изоляции установленного на подстанции оборудования. Такой же опасности могут подвергаться отдельные места на линии, имеющие ослабленную изоляцию или особенно ответственные участки (транспозиционные опоры, пролеты пересечения, переходы через транспортные магистрали, большие реки и т.д.). В этих случаях наряду с защитой от прямых ударов с помощью молниеотводов применяется защита от набегающих волн. Для предупреждения повреждения какой-либо изоляционной конструкции параллельно может быть включен искровой промежуток ИП (рис. 5.1, а), вольт-секундная (U_p-t_p) характеристика которого должна лежать ниже U_p-t_p характеристики защищаемой изоляции (рис. 5.1, соответственно кривые 2 и 1). При соблюдении этого условия падение волны перенапряжений вызовет пробой ИП с последующим резким падением (“срезом”) напряжения на ИП и защищаемой изоляции.

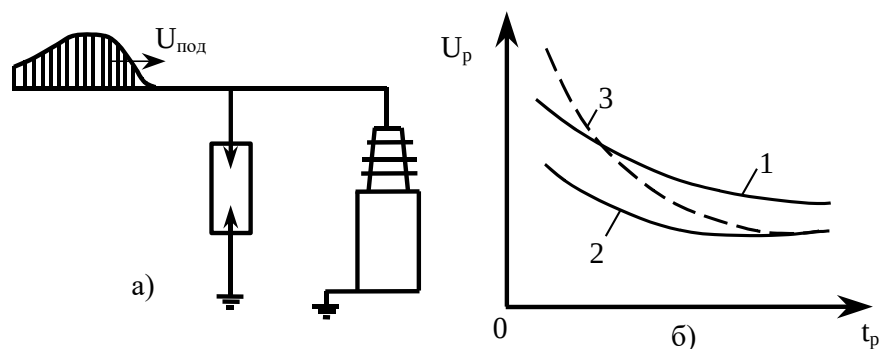


Рисунок 5.1 – Принцип защиты от набегающих волн:

а – принципиальная схема; б – вольт-амперные характеристики

Вслед за импульсным током через искровой промежуток начнет протекать ток, обусловленный напряжением промышленной частоты электроустановки, - сопровождающий

ток, который должен быть отключен с помощью релейной защиты и отключающих аппаратов.

Защитные разрядники обеспечивают не только защиту изоляции от перенапряжения, но и гашение дуги сопровождающего тока в течение времени, меньшего, чем время действия релейной защиты.

В последнее время активно внедряются ограничители перенапряжений (ОПН), представляющие собой устройство с варистором, ограничивающим сопровождающий ток практически до нуля. ОПН включают непосредственно, параллельно изоляции, без искрового промежутка.

Существует два основных типа разрядников, отличающихся принципом гашения дуги сопровождающего тока: трубчатые (РТ), в которых гашение дуги осуществляется созданием интенсивного продольного дутья и вентильные (РВ), в которых дуга гаснет благодаря уменьшению сопровождающего тока с помощью нелинейного сопротивления (варистора), включенного последовательно с искровым промежутком или достаточно сложной системой гашения дуги сопровождающего тока.

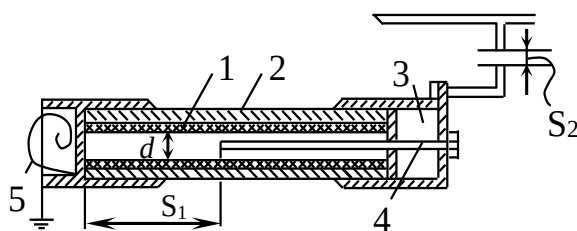


Рисунок 5.2 – Трубчатый разрядник

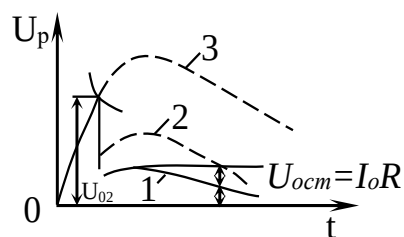


Рисунок 5.3 – Определение остающегося напряжения разрядника

При перенапряжении в сети оба искровых промежутка пробиваются, и волна перенапряжения срезается. По пути, созданным импульсным разрядом, начинает протекать сопровождающий ток, и искровой разряд переходит в дуговой. Под действием высокой температуры канала дуги материал трубки разлагается с выделением большого количества газов, давление в ней резко возрастает (до нескольких МПа), и газы с силой вырываются через отверстия фланца 3, создавая интенсивное продольное дутье. В результате дуга гаснет при первом прохождении тока через ноль.

При срабатывании разрядника из него выбрасываются раскаленные газы в виде факела длиной 1,5-3,5 м и шириной 1-2,5 м и раздается звук, напоминающий выстрел. Поэтому для предупреждения междофазных замыканий при монтаже разрядников нужно следить, чтобы в зону выхлопа не попадали токоведущие части соседних фаз.

Напряжение срабатывания разрядников можно регулировать, изменяя расстояние внешнего искрового промежутка S_2 , но нельзя снижать ниже определенного минимума (табл. 5.1), так как это вызывает слишком частые срабатывания и повышенный износ разрядника.

Таблица 5.1

U_n , кВ	3	6	10	35	110	220
S_2 , мм	8	10	15	100	400	500

Величина остающегося напряжения (кривые 1 и 2, рис.5.3) определяется, в основном, сопротивлением заземления разрядника R_3 , которое должно быть, по возможности, малым. По нормам $R_3 \leq 10$ Ом, тогда при $Z=400$ Ом имеем $U_{ост} \approx 0,05U_n$.

$$\frac{2U_n}{Z + R_3} R_3 = \frac{2U_n}{400 + 10} \cdot 10 \approx 0,05U_n$$

Для успешного гашения дуги необходима определенная интенсивность газообразования, поэтому существует нижний предел отключаемых токов I_{min} , при которых разрядник еще может погасить дугу в течении 1-2 полупериодов. Верхний предел отключаемых токов I_{max} также ограничивается, так как слишком интенсивное газообразование может привести к разрушению (разрыву) разрядника. Диапазон отключаемых токов указывается в обозначении разрядника: например, РТВ $\frac{35}{0,5-2,5}$ означает трубчатый разрядник винипластовый на 35 кВ с пределами токов 0,5...2,5 кА.

Выбор трубчатых разрядников производится по номинальному напряжению сети и пределам токов короткого замыкания (КЗ) сети в точке установки РТ. Максимальный ток КЗ рассчитывают при условии включения всех элементов сети (линии, трансформаторы, генераторы) с учетом апериодической составляющей тока КЗ, минимальный ток – при схеме сети с частично выключенными элементами (например, для капитального ремонта) и без учета апериодической составляющей. Найденные пределы тока КЗ должны укладываться в пределы отключаемых токов трубчатого разрядника. Трубчатые разрядники выпускаются на напряжение от 3 до 220 кВ, отключаемые токи лежат в пределах от 0,2...7,0 и 1,5...30 кА при напряжении 3...35 кВ до 0,4...7,0 и 2,2...30 кА при напряжении 110 кВ.

Основным недостатком трубчатых разрядников являются: наличие зоны выхлопа; крутой срез волны перенапряжения; замыкания (хотя и кратковременные) линий на землю, и особенно – крутая вольт-секундная характеристика, исключающая возможность широкого применения РТ в качестве аппарата защиты подстанционного оборудования.

Недостатком РТ является также наличие предельных отключаемых токов, что осложняется их производство и эксплуатацию.

Благодаря своей простоте и низкой стоимости трубчатые разрядники применяются в качестве вспомогательных средств защиты подстанций, а также отдельных участков линий. Следует, однако, отметить, что в последнее время применение трубчатых разрядников все более ограничивается, и есть предпосылки, что в сетях РБ скоро их не останется вовсе (по последним данным уже не осталось).

Вентильные разрядники являются основными аппаратами в схемах защиты изоляции электрооборудования станций и подстанций.

Вентильный разрядник, например, РВС (рис.5.4) состоит из системы соединенных последовательно искровых промежутков ИП и варистора (нелинейного сопротивления). Сопротивление варистора зависит от приложенного напряжения, поэтому его вольтамперная характеристика (и соответственно разрядника в целом) также нелинейная (рис.5.5).

Работает вентильный разрядник следующим образом. Когда мгновенное значение волны перенапряжения U_n на разряднике достигает импульсного пробивного напряжения искровых промежутков, они пробиваются. Сопротивление разрядника при этом мало, и через него протекает значительный по величине импульсный ток I_p , который и определяет напряжение на разряднике. Наибольшее напряжение на разряднике при максимально допустимом импульсном токе через него $I_{u, max}$ называют остающимся напряжением $U_{ост}$. Это напряжение должно быть на 20...25% меньше импульсной прочности защищаемой изоляции. После прохождения импульсного тока через разрядник начинает протекать сопровождающий ток промышленной частоты $I_{сопр}$, обусловленной рабочим напряжением сети. Так как это напряжение значительно ниже амплитуды импульса перенапряжения, то сопротивление варистора резко возрастает, и величина сопровождающего тока ограничивается до величины, при которой дуга, разбитая в искровых промежутках на большое число отдельных душек небольшой длины, гасится при первом же переходе сопровождающего тока через нуль.

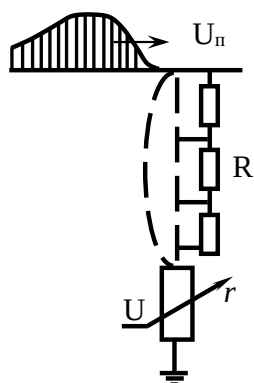


Рисунок 5.4 – Устройство и схема включения вентильного разрядника (пунктиром показан вариант ОПН).

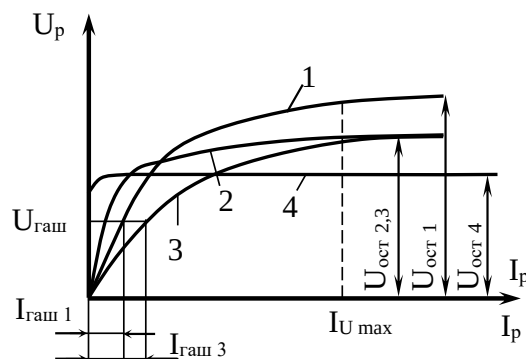


Рисунок 5.5 – Вольтамперная характеристика разрядника.

Наибольшее действующее значение напряжения гашения дуги $U_{гаш}$, при котором надежно обрывается проходящий через разрядник ток, называемый током гашения $I_{гаш}$, должно быть выше максимально возможного напряжения на разряднике в момент гашения дуги, иначе разрядник может не погасить дугу сопровождающего тока при первом прохождении его через нуль и выйдет из строя.

$$U_{гаш} = K_3 U_{ном},$$

где $U_{ном}$ - номинальное линейное напряжение;

K_3 - коэффициент, зависящий от способа заземления нейтрали;

$K_3 = 0,8$ или $1,1$ для установки с заземленной и изолированной нейтралью соответственно.

Важной характеристикой вентильных разрядников является коэффициент защиты

$$K_{защ} = \frac{U_{ост}}{U_{гаш}}.$$

Так как $U_{гаш}$ зависит от $U_{ном}$ установки, то $K_{защ}$ определяет значение $U_{ост}$ разрядника, т.е. требуемый уровень изоляции. Снижение уровня изоляции при сохранении надежности защиты ее с помощью РВ может быть достигнуто путем применения разрядников или ОПН с более пологой вольтамперной характеристикой (рис. 5.5, кривые 2,4) или путем увеличения тока гашения за счет улучшения дугогасящих свойств искровых промежутков (кривая 3).

Искровые промежутки вентильных разрядников делаются многократными, т.е. состоящими из большего числа последовательно соединенных единичных промежутков. Простейший единичный промежуток (рис. 5.6) состоит из двух латунных электродов 1, разде-

ленных изолирующей шайбой 2. Электрическое поле между электродами близко к однородному, поэтому промежутки пробиваются при коэффициенте импульса, близком к единице. Количество единичных промежутков в разряднике устанавливают из расчета примерно 1 промежуток на 1-2 кВ фазового номинального напряжения разрядника.

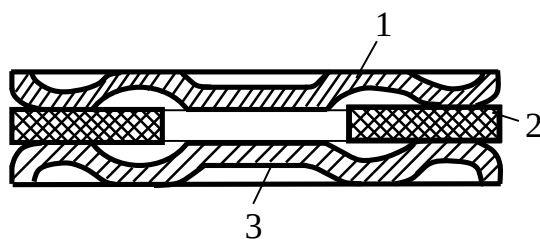


Рисунок 5.6 – Единичный искровой промежуток с неподвижной дугой

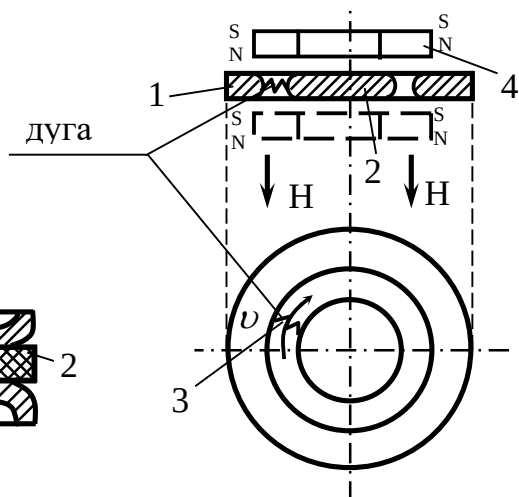


Рисунок 5.7 – Единичный искровой промежуток с вращающейся дугой

Таким образом, дуга сопровождающего тока оказывается разбитой на ряд дуг малой длины, что обеспечивает при токах $I_{сopr}$ до 100 А надежное гашение дуги. Применяются такие промежутки в разрядниках РВП и РВС. При сопровождающих токах свыше 100 А применяются промежутки с подвижной дугой.

Такой промежуток (рис. 5.7) представляет собой зазор между кольцом 1 и диском 2. Дуга 3, горящая между этими электродами, в результате взаимодействия с магнитным полем, создаваемым постоянным магнитом 4, перемещается с большой скоростью по кольцевому зазору, что обеспечивает ее гашение. Указанные промежутки надежно гасят дугу при $I_{сopr}$ до 250...300 А.

Принцип действия искровых промежутков с растягивающейся дугой показан на рис. 5.8. Два электрода 1 располагаются между стенками дугогасительной камеры 2 в магнитном поле Н. в таком поле на дугу 4 сопровождающего тока действует сила F, в результате чего дуга перемещается и растягивается между перегородками 3 камеры 2, стремясь занять конечное положение 4, охлаждается и гаснет. Стенки камеры 2 изготавливаются из дугогасительной керамики. Промежутки с растягивающейся дугой применяются в разрядниках РВТ и РВРД.

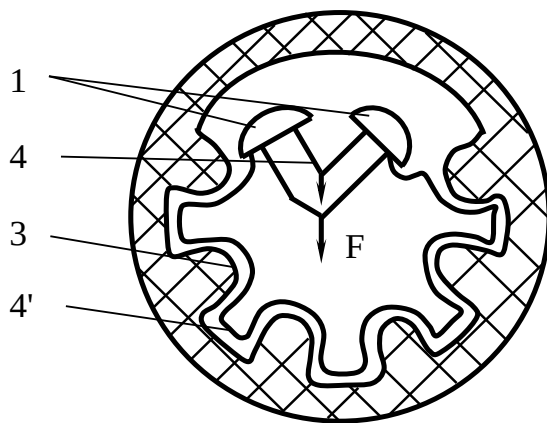


Рисунок 5.8 – Искровой промежуток с растягивающейся дугой

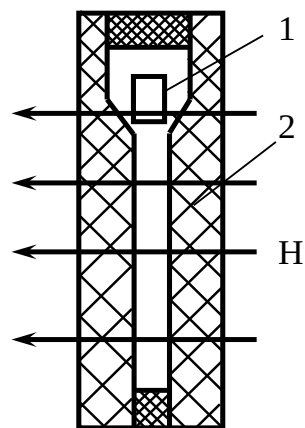


Рисунок 5.9 – Варисторы вентильных разрядников

Для увеличения пробивного напряжения разрядников при промышленной частоте и облегчения гашения дуги сопровождающего тока распределения напряжения по искровым промежуткам должно быть равномерным. Для этого искровые промежутки шунтируют резисторами R (рис. 5.4), сопротивление которых выбирают так, чтобы через них протекал ток, превышающий в несколько раз емкостный ток искровых промежутков.

Рабочие сопротивления (варисторы) r разрядников РВС, РВП изготавливаются из порошка электротехнического карборунда SiC . На поверхности зерен карборунда имеется тонкий запорный слой из окиси кремния SiO_2 .

Удельное сопротивление зерен карборунда невелико – порядка 10^{-2} Ом м, а сопротивление запорного слоя нелинейно зависит от напряженности электрического поля. При малых напряженностях (небольших напряжениях на варисторе) удельное сопротивление запорного слоя составляет $10^4 \dots 10^6$ Ом-м, все приложенное напряжение падает при этом на запорный слой, который и определяет сопротивление варистора.

При повышении напряженности поля сопротивление запорного слоя резко падает, и величина сопротивления варистора начинает определяться сопротивлением собственно карборунда.

Нелинейное сопротивление вентильных разрядников выполняется в виде дисков, состоящих из карборундового порошка и связующего материала. В настоящее время применяются диски из вилита и тервита. Для изготовления вилитовых дисков в качестве связующего применяется жидкое стекло. Это позволяет спекать диски при сравнительно низкой температуре (около 300 С). Тервитовые диски при изготовлении обжигаются, при температуре свыше 1000 С. При этом часть запорных пленок выгорает, что повышает пропускную способность материала, но уменьшает степень нелинейности.

Вентильные разрядники по ГОСТ 16537-70, который устанавливает требования к электрическим характеристикам вентильных разрядников, разделены на четыре группы. К 1 группе отнесены разрядники с наилучшими защитными свойствами, т.е. имеющие наименьшее значение остающегося напряжения. К этой группе относятся разрядники серий РВТ и РВРД. Затем следуют разрядники 2 группы – серии РВМ, разрядники 3 группы – серии РВС и 4 – серии РВП.

Облегченные разрядники серии РВП применяются для защиты изоляции подстанций напряжением 3...10 кВ. они имеют варисторы из дисков диаметром 55 мм, и импульсный ток для них не должен превышать 5 кА.

Разрядники унифицированной серии РВС служат для защиты электрооборудования подстанций и выпускаются в виде элементов на напряжение 15,20,33,35 кВ, причем элемент на 33 кВ предназначен исключительно для комплектования разрядников на более высокие напряжения (110...220 кВ). Пропускная способность разрядников 10 кА (диаметр дисков 100 мм).

Вентильные разрядники с магнитным гашением маркируются на напряжение 3...35 кВ как РВМ, на напряжение 110 кВ и выше, как РВМГ (грозозащитные). Разрядники РВМ применяются, в основном, для защиты изоляции вращающихся машин. На напряжение 3...20 кВ разрядники выпускаются в виде отдельных элементов, на напряжение 35 кВ и выше комплектуются из нескольких элементов. В разрядниках этих серий применены искровые промежутки с магнитным гашением. Блоки единичных искровых промежутков шунтируются нелинейным резистором полукольцевой формы. Применение вилитовых дисков диаметром 150 мм позволило вдвое увеличить пропускную способность разрядников РВМ и РВМГ по сравнению с разрядниками типа РВС.

В новой серии магнитно-вентильных разрядников РВТ (разрядник вентильный токоограничивающий) применены токоограничивающие искровые промежутки с растягивающейся дугой (рис.5.8). Магнитное поле создается катушками, включенными последовательно с искровыми промежутками. За время протекания импульсного тока дуга существенно растянуться не успевает, и сопротивление ее не велико. При протекании сопровождающего тока промышленной частоты дуга вводится в узкую щель разрядника, растягивается, ее сопротивление возрастает, и величина сопровождающего тока ограничивается уже не только сопротивлением рабочего варистора, но и сопротивлением дуги.

Варисторы разрядников РВТ на напряжение 3...10 кВ комплектуется из тервитовых дисков диаметром 70 мм, а разрядников 110...500 кВ – из дисков диаметром 100 мм. Остающееся напряжение разрядников РВТ примерно на 20 % ниже, чем у разрядников серии РВМ.

ОПН выполняется в виде системы керамических резисторов на основе окиси цинка (ZnO) с высокой степенью нелинейности. Металлизированные с торцов диски (например, 4 параллельных колонки из дисков диаметром 28 мм и высотой 8 мм – ОПН 110) размещаются в геометрическом изолирующем корпусе. ОПН обеспечивают ограничение сопровождающего тока до $10^{-4}..10^{-5}$ А при рабочем напряжении сети, обладая достаточно высокой пропускной способностью при перенапряжениях. Уровень ограничения грозовых перенапряжений с помощью ОПН составляет $(2,0...2,2) U_{\phi}$, коммутационных – $(1,68...1,8) U_{\phi}$.

Расчетными величинами при выборе и установке ОПН являются длительность воздействия перенапряжения. В зависимости от длительности воздействия определяется параметр $T_c = \frac{U_n(t)}{U_c}$, где U_c – напряжение на ОПН, которое он должен выдерживать как угодно долго; $U_n(t)$ – перенапряжение заданной длительности. Типичная характеристика $T_c = f[U_n(t)]$ приведена на рис. 5.10.

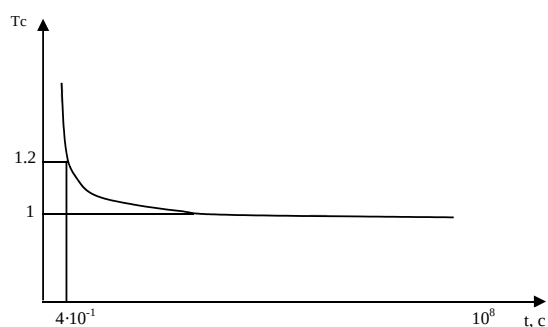


Рисунок 5.10 – Зависимость $T_c = \frac{U_n(t)}{U_c}$

Эта характеристика необходима для корректного выбора уставок релейной защиты и других систем автоматики. Так же расчетной величиной при выборе ОПН является количество импульсов заданной формы и максимальное значение импульсного тока. Соответствующее нормированному остающемуся напряжению $U_{ост}$. Типичная характеристика $U_{опн} = f(I)$ приведена на рис. 5.11.

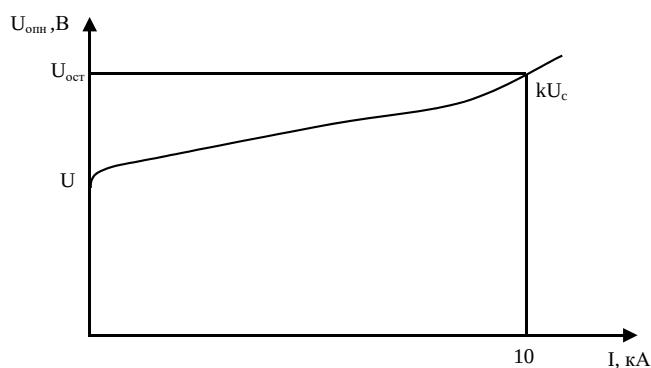


Рисунок 5.11 – Соотношение $U_{ост}$ к U_c в зависимости от импульсного тока

В зависимости от типа и назначения ОПН $K=2\div 4$. При $U_{опн} \leq U_c$, ток протекающий через нелинейный резистор, составляет единицы mA и главной проблемой при эксплуатации ОПН является недопущение возрастания этого тока (разгерметизация и увлажнение конструкции и т.д.).

Методика расчета и выбора ОПН продолжает совершенствоваться, и со временем ОПН должны заменить все виды защитных разрядников.

Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

Указания по выполнению лабораторной работы:

1. Эскиз вентильного разрядника (РВС-6 или РВС-15) с указанием основных размеров.
2. Эскиз трубчатых разрядников (РТВ, РТФ). На эскизах должно быть показано внутреннее устройство разрядников.
3. Эскиз и описание искровых промежутков разрядников типа РВС и РВМ.
4. Описание варисторов вентильных разрядников.
5. Эскиз и описание ОПН (по указанию преподавателя).
6. Построить вольтамперную характеристику разрядника РВС-6, если известно, что $\alpha=0,22$ и $U_p=30000V$ при токе $I_p=5000A$, считая, что напряжение на разряднике изменяется по закону $U_p = CI_p^\alpha$.
7. Выполнить расчет $U_p = f(I_p)$ и $U_{опн} = f(I_{опн})$ для вентильных разрядников разных типов и ОПН с использованием программы ЭВМ (по указанию преподавателя).
8. Выполнить расчет перенапряжения на подстанции по программе (выполняется расчет по отдельной инструкции).

Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;

5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

Контрольные вопросы:

1. Назначение трубчатых и вентильных разрядников.
2. Принцип работы трубчатых и вентильных разрядников.
3. Применение и особенность работы отдельных типов вентильных разрядников (РВП, РВС, РВМГ, РВТ, РВРД, ОПН).
4. Конструкции вентильных и трубчатых разрядников и назначение их отдельных частей.
5. Методика расчета и выбора ОПН.
6. Примеры расчета установки трубчатых, вентильных разрядников и ОПН.

5. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

5.1 Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины

5.1.2 Перечень основной литературы:

1. Бочаров Ю.Н. Техника высоких напряжений [Электронный ресурс] : учебное пособие / Ю.Н. Бочаров, С.М. Дудкин, В.В. Титков. — Электрон. текстовые данные. — СПб. : Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2013. — 265 с. — 978-5-7422-3998-7. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/43976.html>

5.1.3 Перечень дополнительной литературы:

1. Щеглов, Н. В. Современные виды изоляции. Часть 2. Изоляция высоковольтных вводов [Электронный ресурс] : учебное пособие / Н. В. Щеглов. — Электрон. текстовые данные. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2010. — 72 с. — 978-5-7782-1317-3. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/45161.html>

5.2 Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине

1. Методические указания по выполнению практических работ по дисциплине «Техника высоких напряжений».
2. Методические указания по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Техника высоких напряжений».
3. Методические указания по выполнению контрольной работы по дисциплине «Техника высоких напряжений».
4. Методические указания по организации и проведению самостоятельной работы по дисциплине «Техника высоких напряжений».

5.3 Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети Интернет, необходимых для освоения дисциплины

1. <http://www.biblioclub.ru> -ЭБС "Университетская библиотека онлайн"
2. <http://www.iprbookshop.ru/> - Электронно- библиотечная система IPRbooks

Указание по технике безопасности

До начала работы студенты обязаны изучить правила техники безопасности при работе с электроустановками. Об изучении правил техники безопасности и получении инструктажа студенты расписываются в специальном журнале. Студенты, не изучившие правила техники безопасности и не прошедшие инструктаж, к выполнению лабораторных работ не допускаются.

Учебная группа (или подгруппа) разбивается на бригады, число которых указывается преподавателем, а состав бригад комплектуется студентами на добровольных началах. Список группы (подгруппы), разбитой на бригады, староста предоставляет преподавателю, ведущему лабораторные занятия.

Каждая из бригад выполняет лабораторную работу в соответствии с графиком, находящемся в лаборатории.

Перед каждым занятием студент обязан подготовиться к выполнению лабораторной работы по данному методическому пособию и рекомендуемой литературе. Перед началом работы преподаватель проверяет знания студентов по содержанию выполняемой работы. Плохо подготовленные студенты к выполнению лабораторной работы не допускаются.

Работая в лаборатории, необходимо соблюдать следующие правила:

К выполнению лабораторной работы следует приступать только после полного уяснения ее содержания и получения допуска к ней.

2. Начинать работу следует с ознакомления с приборами и оборудованием, применяемыми в данной работе.

3. На лабораторном столе должны находиться только предметы, необходимые для выполнения данной работы.

4. Расположение аппаратуры на рабочем столе должно быть таким, чтобы схема соединений получилась наиболее простой, наглядной и работа с аппаратурой была удобной.

5. Желательно, чтобы схему собирал один из членов бригады, а другие контролировали.

6. При сборке сложных схем следует вначале соединить главную, последовательную цепь, начиная сборку от одного зажима источника тока и заканчивая на другом, а затем уже подключить параллельные цепи.

7. После того, как схема будет собрана, необходимо убедиться в правильной установке движков реостатов, автотрансформаторов и рукояток других регулирующих устройств.

8. Собранная схема обязательно должна быть проверена преподавателем или старшим лаборантом и только с их разрешения может быть включена под напряжение.

9. При включении схемы особое внимание следует обратить на показания амперметров и других измерительных приборов. В случае резкого движения стрелки амперметра к концу шкалы схему необходимо немедленно отключить от источника напряжения.

10. Необходимо бережно относиться к аппаратуре, используемой в работе. Обо всех замеченных неисправностях или повреждениях студент должен немедленно сообщить преподавателю или лаборанту.

11. После выполнения работы студент обязан, не разбирая схемы показать полученные данные преподавателю. Если результаты измерений верны, то преподаватель их подписывает. Эксперимент с неправильными результатами следует повторить.

12. Схему следует разбирать только после ее отключения от сети.

13. Категорически запрещается:

- трогать руками оголенные провода и части приборов, находящиеся под напряжением, даже если оно невелико;

- производить изменения в схеме при подключенном источнике питания;

- заменять или брать оборудование, или приборы с других рабочих мест

- без разрешения преподавателя или лаборанта;

- отходить от приборов и машин, находящихся под напряжением или оставлять схему под напряжением при обработке результатов измерений;

- перегружать приборы током или напряжением, превышающим номинальное значение.

Проверку наличия, подаваемого к схеме или элементам схемы напряжения необходимо производить только контрольной лампочкой или вольтметром, соблюдая правила техники безопасности.

При работе в лаборатории следует строго соблюдать меры предосторожности, так как электрический ток, проходящий через тело человека, величиной в 0,025 А уже является опасным для жизни.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Пятигорский институт (филиал) СКФУ

Методические указания
по выполнению практических работ
по дисциплине «ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ»
для студентов направления подготовки
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Пятигорск 2026 г.

№ п/п		Стр.
	Введение	
1.	Цель и задачи изучения дисциплины	
2.	Оборудование и материалы	
3.	Наименование практических работ	
4.	Содержание практических работ	
4.1	Практическая работа № 1. Электрический разряд в газах. Характеристики электрического поля и общий метод расчета емкости и напряженности электрического поля простейших систем конденсаторов.	
4.2	Практическая работа № 2. Электрический разряд в газах. Расчет плоского, цилиндрического и сферического конденсаторов.	
4.3.	Практическая работа №3. Изоляторы воздушных линий и подстанций. Частные методы расчетов емкости и напряженности сложных электрических полей.	
4.4	Практическая работа №4. Изоляторы воздушных линий и подстанций. Общая характеристика и закономерность разрядов в газовой среде.	
4.5	Практическая работа №5. Внутренняя изоляция электроустановок. Основные формы разрядов в газах и их использование.	
4.6	Практическая работа №6. Испытания изоляции. Измерение сопротивления и емкости изоляции. Перекрывание твердой изоляции и скользящие разряды на поверхности.	
4.7	Практическая работа №7. Контроль диэлектрических потерь и измерение параметров частичных разрядов. Контроль повышенным напряжением. Испытания изоляции отдельных видов оборудования. Контроль изоляции контактной сети. Тепловой и электрический пробой.	
4.8	Практическая работа №8. Измерение высоких напряжений. Перенапряжения в электрических сетях. Атмосферные перенапряжения. Расчет заземляющих устройств.	
4.9	Практическая работа №9. Распространение волн перенапряжений. квазистационарные и коммутационные перенапряжения. Защита от перенапряжений. Расчет сопротивления растеканию тока промышленной частоты.	
5	Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины	

- 5.1 Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины
- 5.2 Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине
- 5.3 Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети Интернет, необходимых для освоения дисциплины

Введение

Практические занятия создают оптимальные дидактические условия для деятельностного освоения студентами содержания и методологии изучаемой дисциплины. Практические занятия занимают преимущественное место при изучении общепрофессиональных и профессиональных дисциплин. Практические занятия проводятся с целью выработки практических умений и приобретения навыков в решении задач, отработки упражнений, выполнении чертежей, производстве расчётов и т.п.

Целью практических занятий является формирование практических умений – профессиональных (выполнять определённые действия, операции, необходимые в последующем в профессиональной деятельности) или учебных, необходимых в последующей учебной деятельности по общепрофессиональным и профессиональным дисциплинам.

Библиографический список содержит сведения о справочной литературе и дополнительных изданиях, необходимых для углубленного изучения отдельных вопросов.

1. Цель и задачи изучения дисциплины

Основными целями дисциплины являются: формирование у студентов стройной и устойчивой системы знаний о фундаментальных закономерностях зажигания и развития электрических разрядов в диэлектрических средах, механизмах пробоя диэлектриков при воздействии сильных электрических полей, видах изоляции высоковольтного оборудования и методах контроля ее состояния, способах получения и измерения высоких напряжений, природе возникновения перенапряжений и способов защиты от них.

В результате освоения данной дисциплины обеспечивается достижение целей основной образовательной программы «Электроэнергетика и электротехника»; приобретенные знания, умения и навыки позволят подготовить выпускника:

- способного к расчету, анализу и проектированию электроэнергетических элементов, объектов и систем с использованием современных средств автоматизации проектных разработок;
- научно-исследовательской деятельности, в том числе в междисциплинарных областях, связанной с математическим моделированием процессов в электроэнергетических системах и объектах, проведением экспериментальных исследований и анализом их результатов;
- к самостоятельному обучению и освоению новых знаний и умений для реализации своей профессиональной карьеры.

2. Оборудование и материалы

Аппаратные средства: переносной ноутбук, проектор, доска магнитно-маркерная.

Учебная аудитория для проведения учебных занятий, оснащена оборудованием и техническими средствами обучения.

3. Наименование практических работ

Для заочной формы обучения предусмотрены следующие практические работы: Практическая работа № 2. Электрический разряд в газах. Расчет плоского, цилиндрического и сферического конденсаторов – 2 часа, практическая подготовка – 2 часа; Практическая работа №3. Изоляторы воздушных линий и подстанций – 2 часа.

№ Темы дисциплины	Наименование тем дисциплины, их краткое содержание	Объем часов	Из них практическая подготовка, часов
5 семестр			

1	Практическая работа № 1. Электрический разряд в газах. Характеристики электрического поля и общий метод расчета емкости и напряженности электрического поля простейших систем конденсаторов. Изучить метод расчета емкости и напряженности электрического поля простейших систем конденсаторов.	2	
1	Практическая работа № 2. Электрический разряд в газах. Расчет плоского, цилиндрического и сферического конденсаторов. Изучить основные методы расчета плоского, цилиндрического и сферического конденсаторов.	2	2
2	Практическая работа №3. Изоляторы воздушных линий и подстанций. Частные методы расчетов емкости и напряженности сложных электрических полей. Изучить методы расчетов емкости и напряженности сложных электрических полей.	2	
2	Практическая работа №4. Изоляторы воздушных линий и подстанций. Общая характеристика и закономерность разрядов в газовой среде. Изучить характеристику и закономерность электрических разрядов.	2	2
3	Практическая работа №5. Внутренняя изоляция электроустановок. Основные формы разрядов в газах и их использование. Изучить основные формы разрядов в газах и их применение на производстве.	2	
4	Практическая работа №6. Испытания изоляции. Измерение сопротивления и емкости изоляции. Перекрытие твердой изоляции и скользящие разряды на поверхности. Изучить понятия перекрытия изоляции, скользящие разряды и перенапряжения на воздушных линиях.	2	
5	Практическая работа №7. Контроль диэлектрических потерь и измерение параметров частичных разрядов. Контроль повышенным напряжением. Испытания изоляции отдельных видов оборудования. Контроль изоляции контактной сети. Тепловой и электрический пробой. Изучить условия возникновения тепловых и электрических пробоев.	2	
8	Практическая работа №8. Измерение высоких напряжений. Перенапряжения в электрических сетях. Атмосферные перенапряжения. Расчет заземляющих устройств. Приобретение навыков расчета ЗУ.	2	

9	Практическая работа №9. Распространение волн перенапряжений. квазистационарные и коммутационные перенапряжения. Защита от перенапряжений. Расчет сопротивления растеканию тока промышленной частоты. Получение навыков расчета сопротивления растекания тока промышленной частоты.	2	
	Итого за 5 семестр:	18	4
	Итого:	18	4

4. Содержание практических работ

Практическая работа № 1. Электрический разряд в газах. Характеристики электрического поля и общий метод расчета емкости и напряженности электрического поля простейших систем конденсаторов.

Цель: Изучить метод расчета емкости и напряженности электрического поля простейших систем конденсаторов.

Основы теории:

Напряжённость электрического поля (Е В/м) есть векторная величина, определяемая отношением силы, действующей в поле на электрический заряд, к величине заряда. Под действием напряжённости может происходить пробой или перекрытие изолирующей среды.

Вектор напряжённости электрического поля на границе раздела двух изолирующих сред при переходе в смежную среду преломляется, раскладываясь на нормальную (E_n) и тангенциальную (E_t) составляющие.

Потенциал электрического поля (ф в) является скалярной величиной. Точки электрического поля имеют положительный, отрицательный или нулевой потенциалы.

Положительный потенциал данной точки электрического поля равен энергии, которую приобретает единичный положительный заряд при его перемещении внешними силами из точки с нулевым потенциалом в данную точку против действия сил электрического поля.

Нулевым потенциалом условно обладают точки, удалённые в бесконечность от заряда или заземлённые.

Отрицательный потенциал характеризует расход энергии поля на перемещение единичного положительного заряда из точки с нулевым потенциалом в данную точку по направлению действия сил электрического поля.

Точки электрического поля, имеющие одинаковый потенциал, образуют эквипотенциальные поверхности.

Разность потенциалов двух точек электрического поля называется напряжением U между этими точками и измеряется в вольтах:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = \Delta\varphi$$

Из определения потенциала как энергии единичного заряда, внесённого в данную точку поля, следует, что разность потенциалов между двумя точками поля $\Delta\varphi$ есть прира-

щение или убыль этой энергии. Для заряда, по величине отличного от единицы, это приращение энергии можно рассматривать как работу ΔA , произведенную силой qE на отрезке пути Δa .

При совпадении направления действия силы qE с направлением перемещения заряда работа отрицательна, т. е. производится за счёт сил поля, а при несовпадении — работа положительна, так как производится за счёт внешних сил:

$$-A = qE\Delta a$$

Отсюда может быть получена математическая связь между потенциалом и напряжённостью:

$$-d\varphi = -\frac{dA}{a} = E da$$

Или

$$E = -\frac{d\varphi}{da} [\text{В/м}]$$

Используя зависимость (1), дадим новое определение напряжённости: напряжённость электрического поля есть скорость убывания (знак минус) потенциала по направлению силовых линий поля.

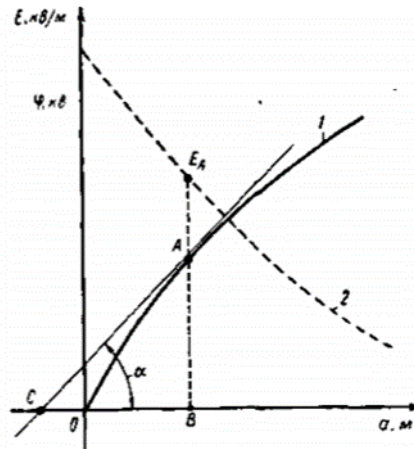


Рисунок 1.1 – Графическая связь между потенциальной кривой и кривой напряжённости

Пусть изменение потенциала между какими-либо точками электрического поля изображено графически (рис. 1.1). В этом случае величина напряжённости электрического поля, выраженная зависимостью 1), приобретает геометрический смысл и может быть определена, как тангенс угла наклона $\operatorname{tg} \alpha$ касательной к потенциальной кривой 1 в точке касания A, с учётом масштабов потенциала и перемещения там(мм.). Математически напряжённость электрического поля для точки A (на кривой 2) выразится

$$E = \left| \frac{d\varphi}{da} \right| = \lim \left| \frac{\Delta\varphi}{\Delta a} \right| = \lim \frac{m_\varphi AB}{m_a BC} = \frac{m_\varphi}{m_a} \operatorname{tg} a$$

$$\operatorname{tg} a = \frac{AB}{BC}, \quad AB = \frac{\Delta\varphi}{m_\varphi}, \quad BC = \frac{\Delta a}{m_a}$$

Допустим, что характер изменения потенциала в изолирующей среде задан графически. Тогда, используя формулу, по точкам строим кривую изменения напряжённости электрического поля.

С другой стороны, из соотношения имеем $d\varphi = -E da_1$, откуда по заданной аналитической зависимости изменения напряжённости электрического поля $E = f(a)$ получим потенциал в

любой точке электрического поля, суммируя произведения напряжённости электрического поля на бесконечно малые приращения координаты движущейся точки на участке от бесконечности до заданной:

$$\varphi_a = - \int_{\infty}^a E da = \int_a^{\infty} E da [\text{В}]$$

В соответствии с зависимостью (3) дадим потенциалу новое определение.

Потенциал в заданной точке электрического поля есть линейный интеграл напряжённости в пределах от бесконечности до заданной точки поля.

Градиент потенциала (Г в/м) — характеристика электрического поля, численно равная напряжённости электрического поля, отличающаяся от нее только противоположным знаком.

Градиент есть вектор, определяющий скорость нарастания потенциала в направлении против сил поля:

$$G = \operatorname{grad} \varphi = -\vec{E} = \frac{d\varphi}{da} [\text{В/м}]$$

Диэлектрическая проницаемость (в ф/м) — основная характеристика электрических свойств изолирующего материала, физически характеризующая интенсивность процессов поляризации в среде диэлектрика, происходящих под действием внешнего электрического поля. Математически она может быть представлена произведением двух величин:

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon' [\text{В/м}]$$

где $\epsilon_0 = 8,886 \cdot 10^{-12}$ [ф/м] — электрическая постоянная, установленная опытным путем;

ϵ' — относительная диэлектрическая проницаемость материала (величина безразмерная).

Значения относительных диэлектрических проницаемостей для различных материалов даны в П-1 *.

Электрическое смещение (D к/м²)—характеристика, определяющая действие электрического поля на диэлектрик — есть векторная величина, равная произведению вектора напряженности электрического поля в рассматриваемой точке на диэлектрическую проницаемость среды:

$$D = E\varepsilon \text{ [к/м}^2\text{]}$$

Электрическое смещение представляет собой плотность электрических зарядов на поверхности заряженного тела либо заряд, индуцируемый на каждом квадратном метре проводящей поверхности, внесенной в электрическое поле нормально к его силовым линиям.

Электрическая емкость (С ф) — понятие, применяемое к конструкциям, представляющим собой проводящие тела (электроды), разделенные слоем диэлектрика. Конструкции, использованные для накопления или сохранения зарядов, называются конденсаторами.

Если электроды конденсатора соединить с источником напряжения, то они приобретут соответствующие равные по величине и противоположные по знаку потенциалы:

$$U = \varphi_1 - (-\varphi_2) = 2\varphi$$

По мере протекания процесса поляризации в диэлектрике на поверхности электродов накапливаются заряды. Опыт показывает, что между величиной накопившегося заряда Q и величиной напряжения U между электродами существует связь, зависящая от геометрических размеров конденсатора и рода диэлектрика. Эту связь с количественной стороны характеризует емкость C .

Емкость есть отношение заряда к напряжению:

$$C = \frac{Q}{U}$$

Единицей емкости в системе СИ является фарада (ф). Так как эта величина практически очень велика, то в расчетах используют ее дольные единицы (см. П-2).

Расчетам емкости и напряженности электрического поля в ТВН придается исключительно важное значение, так как большинство высоковольтных конструкций состоит из проводящих поверхностей, разделенных слоем диэлектрика.

$$C = \frac{I * 10^6}{U 2\pi f} \text{ [мкф]}$$

Для измерения емкости используются мостовые схемы различной конструкции. Расчет емкости может быть произведен по результатам измерения тока и напряжения при заданной частоте

Если расчет емкости производится в процессе конструирования изделия, то сложная форма проводящих поверхностей приводится к геометрически правильной системе: плоскость—плоскость, цилиндр — цилиндр, сфера — сфера, для которых можно установить единую математическую последовательность расчета емкости и напряженности. Исходным соотношением такого расчета является теорема Гаусса*.

Теорема Гаусса: поток вектора напряженности электрического поля сквозь замкнутую поверхность равен заряду, заключенному в части пространства, ограниченного этой поверхностью, деленному на величину диэлектрической проницаемости исследуемой среды.

Математически теорема Гаусса выражается зависимостью

$$\oint E dS = \frac{Q}{\epsilon_0 \epsilon}$$

где Q — заряд, к;

E — напряженность электрического поля, в/м;

$\epsilon_0 \epsilon'$ — диэлектрическая проницаемость среды, ф/м.

При расчетах целесообразно использовать эквипотенциальные поверхности S_a , которые с одной стороны геометрически правильны, а с другой выбраны так, что напряженность электрического поля во (Всех точках неизменна. Это позволяет вынести величину напряженности за знак интеграла. Части поверхности, не пересекаемые потоком вектора напряженности электрического поля, например торцевые части цилиндрической поверхности, следует исключить из рассмотрения.

Электрического поля и величиной заряда, называемое теоремой Гаусса.

1. Применяя теорему Гаусса, мысленно ограничим один из электродов заданной системы замкнутой эквипотенциальной поверхностью, для которой выразим математическую связь между напряженностью электрического поля, зарядом и диэлектрической проницаемостью среды:

$$E \oint dS = \frac{Q}{\epsilon}$$

так как

$$\oint dS = S_a$$

То

$$E = \frac{Q}{\epsilon S_a}$$

2. Используя соотношения (3) и (9), установим, что напряжение между электродами математически выражается через определенный интеграл вектора напряженности электрического поля по пути убывания потенциала (знак минус) вдоль направления силовых линий:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = - \int_l^2 E da = - \frac{Q}{\varepsilon} \int_l^2 \frac{da}{S_a} [\text{В}]$$

Здесь положительно заряженному электроду присвоен индекс 1. Пользуясь формулой (6), согласно которой емкость есть отношение заряда к напряжению, и зависимостью (10), получим после перемены пределов интегрирования соотношение, определяющее в общем виде емкость рассматриваемой конструкции:

$$C = \frac{\varepsilon}{\int_2^l \frac{da}{S_a}}$$

В соответствии с изложенной последовательностью расчета емкости одним из промежуточных действий было определение напряженности (9), однако полученная зависимость не может быть практически использована, так как величина заряда Q обычно не задается.

Для получения практически пригодной формулы расчета напряженности электрического поля любой точки между электродами, следует, рассчитав емкость конденсатора по формуле (11) и зная напряжение, приложенное к электродам, выразить в зависимости (9) заряд как произведение емкости на напряжение:

$$E_x = \frac{CU}{\varepsilon S_x} [\text{В/м}]$$

где C — емкость конденсатора;

$S_x = S_a$ — эквипотенциальная поверхность, проведенная через точку с искомой напряженностью электрического поля, м^2 ;

U — напряжение, действующее между электродами, в;

ε — диэлектрическая проницаемость среды, ф/м.

Задания:

Задание №1

Определить электрическое смещение в точке электрического поля напряженностью 10 кВ/см, если изолирующей средой является воздух.

Задание №2

Определить величину связанного заряда, индуктированного на проводящей пластинке в 1 см^2 , внесенной в электрическое поле перпендикулярно силовым линиям. Напряженность электрического поля 12 кВ/см. Изолирующей средой является трансформаторное масло с относительной диэлектрической проницаемостью, равной 2,5.

Задание №3

Определить среднюю напряженность электрического поля на участке протяженностью 0,4 мм, если разность потенциалов между точками, ограничивающими участок, 600 В.

Задание №4

Потенциалы электродов изолированного от земли конденсатора равны ± 2000 В. Определить напряжение, действующее между его выводами.

Задание №5

Определить величину заряда конденсатора емкостью 2 мкФ, если напряжение между его выводами 100 В.

Задание №6

Плоский конденсатор с воздушной изоляцией имеет емкость 100 пФ и заряжен до напряжения 2 кВ. Определить напряженность электрического поля между его электродами, имеющими площадь 625 см².

Задание №7

Одиночная сфера в воздухе имеет емкость 20 пФ и заряжена до напряжения 30 кВ. Определить напряженность электрического поля у поверхности сферы, если ее радиус 20 см.

Контрольные вопросы:

1. Почему проводящие тела имеют эквипотенциальные поверхности?
2. Перечислить известные способы графического и аналитического выражения напряженности электрического поля.
3. Как по заданному графику потенциала построить график напряженности электрического поля?
4. Как определить пределы линейного интеграла для расчета напряжения по напряженности электрического поля?
5. Какая форма условной поверхности, охватывающей заряд, будет наиболее рациональной при использовании теоремы Гаусса?
6. Почему зависимость, полученная для расчета напряженности электрического поля через заряд, оказывается практически непригодной?

7. Как пересчитать емкость, выраженную в фарадах, в пикофарады?
8. Что такое электрическое смещение?
9. Какова величина относительной диэлектрической проницаемости воды и проводников?
10. Что показывает и что характеризует величина относительной диэлектрической проницаемости?
11. В какой из двух сред при той же напряженности электрического поля будет больше электрическое смещение — в фарфоре или слюде?
12. В чем заключается закон преломления вектора напряженности электрического поля на границе раздела двух изолирующих сред и как практически он используется?

Практическая работа № 2. Электрический разряд в газах. Расчет плоского, цилиндрического и сферического конденсаторов.

Цель: Изучить основные методы расчета плоского, цилиндрического и сферического конденсаторов.

Основы теории:

Для расчета емкости и напряженности электрического поля между электродами конденсатора воспользуемся схемой рис. 3 и вышеизложенной последовательностью расчета.

Емкость конденсатора определится из зависимости

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S_a}{a}$$

В том случае, если напряжение, приложенное к конденсатору, задано, можно получить формулу для расчета напряженности электрического поля в изоляции

$$E = \frac{Q}{\varepsilon S_a} = \frac{UC}{\varepsilon S_a} = \frac{U \varepsilon S_a}{\varepsilon S_a a} = \frac{U}{a} \text{ [кВ/см]}$$

Изменение потенциала и напряженности в слое диэлектрика можно изобразить графически.

Расчет емкости и напряженности электрического поля в изоляции слоистого конденсатора производится согласно двум основным положениям:

а) -напряжение, приложенное к внешним обкладкам конденсатора, равно сумме напряжений, приходящихся -на каждый слой:

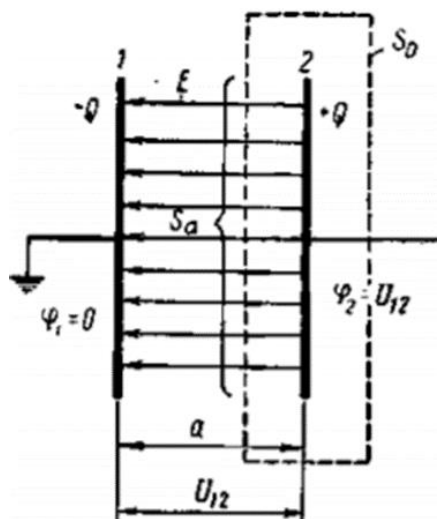


Рисунок 3-1--Расчетная схема плоского конденсатора:

S_0 -условная замкнутая поверхность;

S_a -активная часть замкнутой поверхности

б) электрическое смещение и заряд в плоскости любого слоя постоянны

$$D = E_1 \varepsilon_1 = E_2 \varepsilon_2 = E_n \varepsilon_n$$

$$Q = CU = C_1 U_1 = C_2 U_2 = C_n U_n$$

Расчетные формулы емкости двух и трехслойного конденсатора имеют вид:

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

$$C = \frac{C_1 C_2 C_3}{C_1 C_2 + C_1 C_3 + C_2 C_3}$$

Кроме того, из равенства зарядов следует:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{C_2}{C_1}$$

Напряжения между смежными слоями плоского и любого другого конденсатора распределяются обратно пропорционально емкостям этих слоев.

Для вывода расчетной формулы напряженности электрического поля в диэлектрике плоского конденсатора используем зависимости, откуда для двухслойного конденсатора получим:

$$U = E_1 a_1 + E_2 a_2 = E_1 a_1 + E_1 \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} a_2 = E_1 \left(\frac{a_1 \varepsilon_2 + a_2 \varepsilon_1}{\varepsilon_2} \right)$$

$$E_1 = \frac{U \varepsilon_2}{a_1 \varepsilon_2 + a_2 \varepsilon_1}$$

Зависимость можно видоизменить

$$E_1 = \frac{U}{a_1} \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_2 + \frac{a_2 \varepsilon_1}{a_1}} \right) = \frac{U}{a_1 \left(1 + \frac{\varepsilon_1 S a_2}{a_1 \varepsilon_2 S} \right)} = \frac{U}{a_1 \left(1 + \frac{C_1}{C_2} \right)}$$

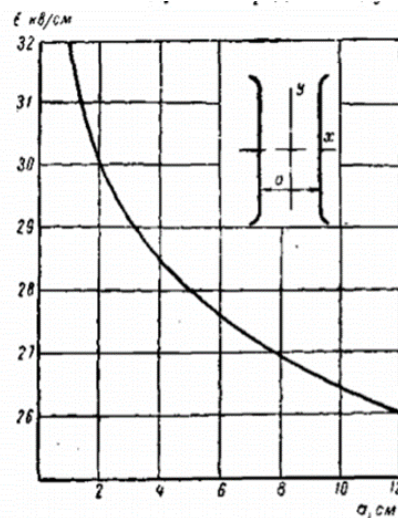


Рисунок 2.2 – Опытная характеристика зависимости пробивной

прочности воздуха от расстояния между плоскими электродами при нормальных атмосферных условиях

Регулирование напряжения «а слое конденсатора можно осуществлять подбором его толщины и величины относительной диэлектрической проницаемости-материала.

Опыт показывает, что величина средней пробивной напряженности воздушной среды между электродами плоского конденсатора зависит при прочих равных условиях от расстояния между электродами (рис.2.2). Это объясняется нарушением однородности поля у краев электродов.

Поле цилиндрического конденсатора плоскопараллельное и характеризуется осевой симметрией, причем эквипотенциальные поверхности представляют собой коаксиальные цилиндры.

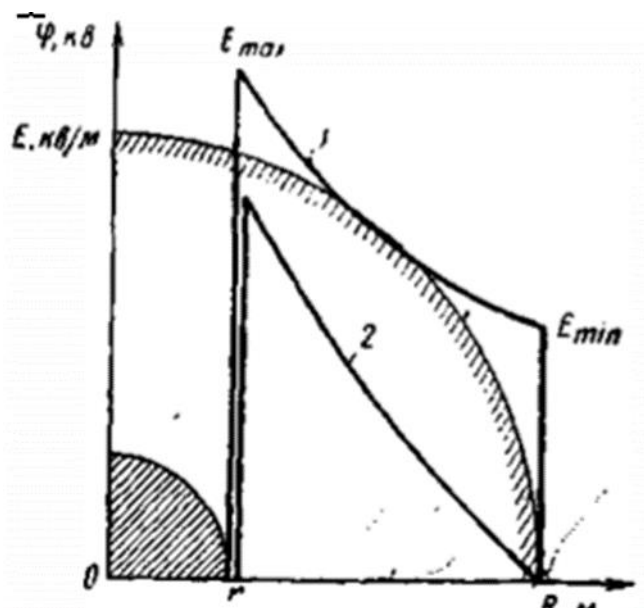


Рисунок 2.3 – Изменение напряженности (1) и потенциала (2) в слое изоляции цилиндрического конденсатора

Поле цилиндрического конденсатора плоскопараллельное и характеризуется осевой симметрией, причем эквипотенциальные поверхности представляют собой коаксиальные цилиндры.

Последовательность расчета:

1. В соответствии с теоремой Гаусса:

$$E_x = \frac{Q}{\varepsilon_0 \varepsilon_2 \pi r_x l} [\text{В/см}]$$

Переменная величина r_x в знаменателе зависимости определяет гиперболический закон изменения напряженности электрического поля.

2. Используя зависимость, выразим напряжение, приложенное к конденсатору, через напряженность электрического поле E_x :

$$U = - \int_R^r E_x dx = - \frac{Q}{\varepsilon_0 \varepsilon 2\pi r_x l} \int_R^r \frac{dx}{r_x}$$

откуда

$$U = \frac{Q}{\varepsilon_0 \varepsilon 2\pi l} \ln \frac{R}{r} [\text{В}]$$

3. В соответствии с определением емкости как отношения заряда к напряжению имеем

$$C = \frac{2\pi \varepsilon_0 \varepsilon l}{\ln \frac{R}{r}} [\text{Ф}]$$

При замене выражения заряда через, произведение емкости и напряжения после соответствующих преобразований получим уравнение для напряженности электрического поля, пригодное для практических расчетов:

$$E_x = \frac{U}{2.3 x \lg \frac{R}{r}} [\text{В/см}]$$

В большинстве случаев важны максимальная и минимальная величины напряженности электрического поля, получаемые из общей зависимости:

$$E_{max} = \frac{U}{2.3 x \lg \frac{R}{r}} [\text{В/см}]$$

$$E_{min} = \frac{U}{2.3 R \lg \frac{R}{r}} [\text{В/см}]$$

Для расчета характеристики изменения потенциала в слое изоляции воспользуемся формулами, предположив, что потенциал уменьшается при изменении координаты точки от x до R , получим

$$\varphi_x = - \int_r^x E_x dx = - \frac{U}{2.3 \lg \frac{R}{r}} \int_r^x \frac{dx}{x} = \frac{U}{\lg \frac{R}{r}} \lg \frac{R}{x}$$

Характеристики изменения потенциала и напряженности электрического поля вдоль радиуса цилиндрического конденсатора приведены на рис. 2.4, Напряженность электрического поля у поверхности с меньшим радиусом имеет максимальное значение.

Таким образом, если вблизи внутреннего электрода материал напряжен до предела, то у внешней поверхности он недогружен.

Математическое исследование зависимости на минимум позволяет выбрать наиболее рациональные радиусы, при которых изоляция загружена более равномерно и имеет

минимальную толщину. Для анализа берут первую производную от знаменателя в выражении и приравнивают ее нулю

$$\frac{d}{dr} \left(r \ln \frac{R}{r} \right) = \frac{d}{dr} (r \ln R - r \ln r) = \ln R - \ln r - 1 = 0$$

Откуда

$$\ln \frac{R}{r} = 1$$

Т.е

$$\frac{R}{r} = e = 2.718$$

Максимальная напряженность электрического поля вблизи поверхности внутреннего цилиндра минимальна, если отношение радиусов внешнего и внутреннего цилиндров равно основанию натурального логарифма ($e=2,718$).

$$E_{max} = \frac{U}{r \ln \frac{R}{r}} = \frac{U}{r \ln e} = \frac{U_0}{r} [\text{кВ/см}]$$

Пусть цилиндрический конденсатор состоит из трех различных слоев изоляции, внутренние радиусы которых r_1, r_2, r_3 , а наружный r_4 . Такую конструкцию можно представить как три последовательно соединенных конденсатора C_1, C_2 и C_3 , емкость каждого из которых определяется формулой

$$C_n = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon 2\pi l}{\ln \frac{r_{n+1}}{r_n}}$$

Напряженность электрического поля цилиндрического конденсатора со слоистой изоляцией на границе раздела двух смежных сред меняет свою величину скачкообразно.

Напряженность электрического поля в пределах слоя изменяется по гиперболической кривой, а в целом образует пилообразную кривую (рис. 7) с разной величиной «пиков» напряженности электрического поля.

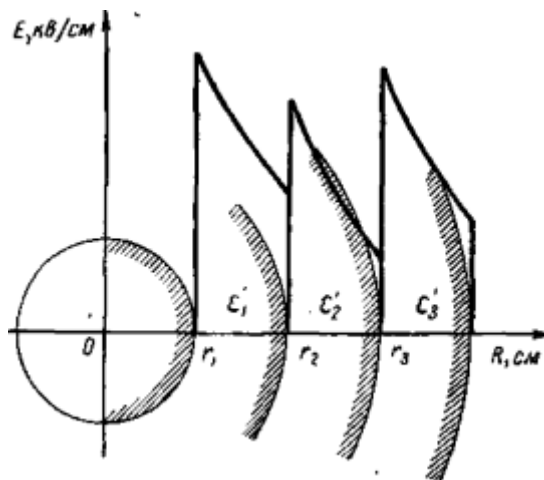


Рисунок 2.4 – Изменение напряженности электрического поля

в изоляции многослойного цилиндрического конденсата

Для расчета напряженности электрического поля в слоях многослойного конденсатора пользуются формулой:

$$E_x = \frac{U}{x \ln \frac{r_{x+1}}{r_x} \left(\frac{C_x}{C_1} + \frac{C_x}{C_2} + \frac{C_x}{C_3} + \dots + \frac{C_x}{C_n} \right)}.$$

где C_x – емкость слоя, в котором определяется напряженность электрического поля;

r_x – внутренний радиус исследуемого слоя;

r_{x+1} – внешний радиус исследуемого слоя.

Например, для первого слоя трехслойного цилиндрического конденсатора напряженность электрического поля в любой точке с радиусом x определяется из выражения

$$E_1 = \frac{U}{x \ln \frac{r_2}{r_1} \left(\frac{C_1}{C_1} + \frac{C_1}{C_2} + \frac{C_1}{C_3} \right)}.$$

Сферический конденсатор в высоковольтных конструкциях встречается сравнительно редко. В большинстве случаев его форма только приближается к сферической или является ее частью. Примером служит конструкция подвесного изолятора в части между полусферической шапкой и пестиком. Иногда в ТВН используются одиночные сферы, для которых вторым электродом бесконечно большого радиуса служит земля или стены помещения.

Электрическое поле между обкладками сферического конденсатора обладает сферической симметрией.

Последовательность расчета:

1. В соответствии с теоремой Гаусса

$$E_x = \frac{Q}{\varepsilon 4\pi r_x^2}.$$

2. Используя зависимость (10), выразим напряжение, приложенное к электродам, через напряженность электрического поля:

$$U = - \int_R^{r_1} E_x dr = - \frac{Q}{\varepsilon 4\pi} \int_R^{r_1} r_x^{-2} dr = \frac{-Q}{\varepsilon 4\pi} \left[-\frac{1}{r_1} - \left(-\frac{1}{R} \right) \right] = \frac{Q(R - r_1)}{\varepsilon 4\pi R r_1}.$$

3. В соответствии с определением емкости как отношения заряда к напряжению имеем

$$C = \frac{4\pi\varepsilon R r_1}{R - r_1} [\Phi].$$

Используя выражения (38), (6) и (40), получим расчетную формулу напряженности электрического поля в произвольной точке

$$E_x = \frac{Q}{\varepsilon 4\pi r_x^2} = \frac{U 4\pi \varepsilon R r_1}{(R - r_1) \varepsilon 4\pi r_x^2} = U \frac{R r_1}{r_x^2 (R - r_1)} [\text{кВ/см}].$$

При расчете точек потенциальной кривой в пространстве между сферами условимся, что наружная сфера заземлена, тогда потенциал в любой точке среды радиуса r_x получим из соотношения

$$\varphi_x = \int_{r_1}^R E_x dr = U \frac{R r_1}{R - r_1} \int_{r_1}^R \frac{dr}{r_x^2} = U \frac{r_1 (R - r_x)}{r_x (R - r_1)}.$$

Зависимости (41) и (42) графически изображены на рис. 2.5.

В практических расчетах используются значения максимальной и минимальной напряженностей электрического поля, получаемые из зависимости (41) с текущими радиусами внутренней и наружной сфер:

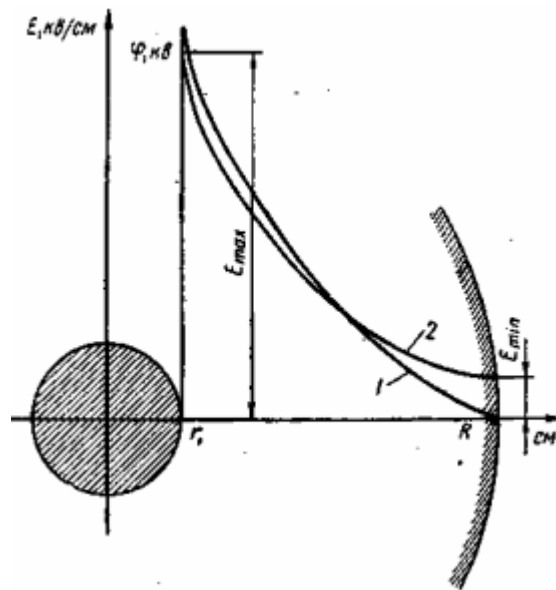


Рисунок 2.5 – Потенциальная кривая (1) и характеристика изменения напряженности электрического поля (2) в среде сферического конденсатора

Предположим, что радиус внешней сферы конденсатора останется неизменным, а внутренний радиус плавно увеличится от r_1 до R , тогда значение максимальной напряженности электрического поля изменится по гиперболической кривой, имеющей точку минимума. Эта закономерность имеет практический интерес, так как при соотношении радиусов, соответствующих точке перегиба, обеспечивается наиболее полное использование изоляции.

Математически координату точки перегиба кривой максимальной напряженности электрического поля получают, по формуле (43), приравняв нулю первую производную от знаменателя дроби, откуда

$$r_1 = \frac{R}{2},$$

или

$$E_{max} = \frac{4U}{R}.$$

Как уже говорилось, одиночную сферу, достаточно удаленную от заземленных частей, представляют как сферический конденсатор с радиусом $R = \infty$. В этом случае расчетные формулы (40) и (43) примут вид:

$$C = 4\pi\epsilon'\epsilon_0 r_1 [\text{ф}],$$

$$E_{max} = \frac{U}{r_1} [\text{кВ/см}].$$

Задания:

Задание №1

Для измерения напряжения 110 кВ применена схема емкостного делителя, состоящая из двух последовательно соединенных конденсаторов C_1 и электростатического вольтметра на напряжение 10 кВ, шунтированного конденсатором емкостью $C_2 = 100$ пф. Определить емкость каждого из конденсаторов C_1 если емкость вольтметра $C_v = 20$ пф

Задание №2

Плоский конденсатор с воздушной изоляцией и дисковыми электродами с закругленными краями имеет расстояние между электродами 2 см. Определить напряженность электрического поля в изоляции, если приложенное напряжение равно 40 кВ. Расчет повторить для случая, когда между электродами том же расстоянии введена стеклянная пластинка толщиной 1 см с относительной диэлектрической проницаемостью, равной 6.

Одиночная сфера с радиусом r_x см расположена в воздушной среде. Выразить емкость одиночной сферы в пикофарадах.

Задание №3

Определить емкость одножильного маслонаполненного кабеля на 110 кВ, длиной 1000 м, с внешним диаметром его полый жилы 22,7 мм и наружным диаметром бумажной изоляции 46,7 мм при относительной диэлектрической проницаемости 3,5.

Задание №4

Плоский воздушный конденсатор с расстоянием между пластинами $a = 0,5$ см заряжен до напряжения $U_0 = 10$ кВ. Определить изменение напряжения между электродами, если развести пластины на $a_1 = 5$ см, предположив, что заряд при этом не изменит своей величины.

Проходной цилиндрический изолятор имеет сечение токоведущего стержня 4 см^2 . Изоляция — текстолит ($E_{\text{пр}} = 80$ КВ/см). Напряжение между стержнем и фланцем 140 кВ. Коэффициент запаса прочности $K=1,4$. З

1. Определить внутренний радиус крепящего фланца.
2. Произвести расчет радиусов стержня и фланца, исходя из минимальной толщины слоя изоляции, при сохранении прочих заданных условий.

Задание №5

Определить напряжение на выводах трехслойного плоского конденсатора, если напряженности электрического поля в его слоях 20 кВ/см; 10 кВ/см; 5 кВ/см при толщинах слоев, соответственно равных 2 , 4 и 6 мм.

Задача № 6

Определить напряженности электрического поля в слоях плоского трехслойного конденсатора, заряженного до напряжения 10 кВ, если емкости его слоев соответственно равны 6 ; 3 ; $1,5$ мкФ при толщинах слоев $1,2$ и 4 мм

Задание №7

Одножильный кабель имеет радиус свинцовой защитной оболочки, равный 10 см, радиус токоведущей жилы — 1 см. Определить потенциалы в толще его изоляции для точек с радиусами 1 , 2 , 4 , 6 и 10 см, если напряжение, приложенное между жилой и оболочкой, равно 100 кВ, а защитная оболочка заземлена.

Задание №8

При конструировании кабеля задан радиус его токоведущей жилы 5 мм. Определить радиус его наружной защитной оболочки и запас прочности для изоляции, если напряжение, приложенное к кабелю, -30 кВ, а пробивная прочность материала 30 кВ/мм.

Задание №9

Одиночная сфера радиусом 10 см опущена в бак с трансформаторным маслом, имеющим относительную диэлектрическую проницаемость 2,5 и заряжена в таком состоянии до 30 кВ. Определить напряженность электрического поля у поверхности сферы и ее потенциал при извлечении ее из масла.

Задание №10

Построить по точкам с радиусами 3, 6, 12, 20 и 30 см потенциальную и градиентную характеристики в поле сферического конденсатора, заряженного до напряжения 20 кВ, если радиус внешнего электрода 30 см, внутреннего 3 см.

Задание №11

К обкладкам сферического конденсатора приложено напряжение 100 кВ. Определить радиусы внешнего и внутреннего электродов при условии наименьшей толщины изоляции между сферами и наименьшей величиной, равной 20 кВ/см у поверхности внутреннего электрода.

Контрольные вопросы:

1. От каких геометрических параметров и как зависит емкость плоского конденсатора?
2. В чем опасность воздушных включений между слоями многослойного конденсатора?
3. Какими параметрами следует задаться при расчете емкости плоского конденсатора?
4. Почему средняя пробивная напряженность электрического поля воздуха уменьшается при увеличении расстояния между электродами?
5. Как устраняется влияние краевого эффекта у плоских и цилиндрических электродов?
6. Как изменяется емкость плоского конденсатора при постепенном заполнении трансформаторным маслом воздушного промежутка между электродами?
7. Как регулировать напряженность электрического поля в слоях многослойного плоского конденсатора?
8. Как выглядят графики потенциала и напряженности электрического поля трехслойного плоского конденсатора, у которого средний слой пробит, а один из электродов заземлен?

9. Опишите устройство цилиндрического конденсаторного ввода.
10. Какое соотношение соблюдается между напряженностями электрического поля на границе раздела двух смежных слоев?
11. По какому математическому закону изменяется напряженность электрического поля в однородном слое цилиндрического конденсатора?
12. Как располагают материалы с различными величинами диэлектрической проницаемости при выравнивании значения максимальной напряженности электрического поля в слоях цилиндрического конденсатора?
13. Как располагают материалы с различными величинами диэлектрической проницаемости при выравнивании значения максимальной напряженности электрического поля в слоях цилиндрического конденсатора?
14. Как изменяется емкость цилиндрического воздушного конденсатора при возникновении короны у центрального электрода?
15. Почему при расчете изоляции цилиндрического конденсатора по условиям ее оптимального использования иногда приходится центральный электрод изготавливать полым?
16. При каких соотношениях между радиусами цилиндрических электродов максимальная напряженность электрического поля минимальна?
17. Как определяется емкость одиночной сферы?

Практическая работа №3. Изоляторы воздушных линий и подстанций. Частные методы расчетов емкости и напряженности сложных электрических полей.

Цель: Изучить методы расчетов емкости и напряженности сложных электрических полей.

Основы теории:

Пусть два цилиндра с равными и разноименными зарядами расположены параллельно друг другу на расстоянии, по сравнению с которым их радиусы пренебрежительно малы (например, два провода линии электропередачи). Так как радиусы малы, можно считать, что заряды сосредоточены не на поверхности, а вдоль геометрических или так называемых электрических осей проводов.

Рассмотрим электрическое поле в контрольной точке 1 рис. 10, расположенной на расстояниях a и b от соответствующих осей A и B .

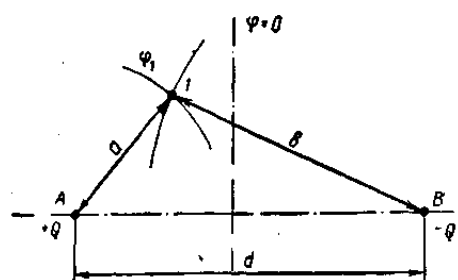


Рис. 10. Схема расположения электрических осей

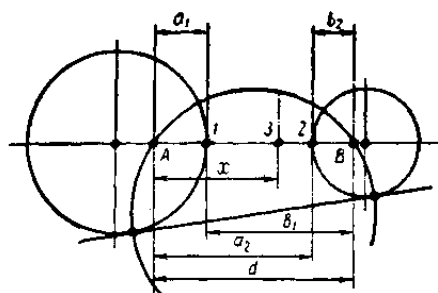


Рисунок 3.1 – Графическое определение положения электрических осей двух заряженных цилиндров

Применив к электрическому полю точки 1 положение 1 для расчета сложных систем, получим

$$\varphi_1 = \varphi'_1 + \varphi''_1,$$

где φ'_1 — потенциал условной цилиндрической поверхности в точке 1 от действия положительного заряда на оси A

$$\varphi_1' = - \int_{\infty}^a E dr = \frac{Q}{\varepsilon 2\pi l} \ln \frac{\infty}{a};$$

φ_1'' — потенциал в точке 1 от действия отрицательного заряда на оси В;

$$\varphi_1'' = \int_{\infty}^b E dr = \frac{-Q}{\varepsilon 2\pi l} \ln \frac{\infty}{b},$$

где l — длина заряженной оси;

a, b — радиусы условных цилиндрических поверхностей.

Таким образом, результирующий потенциал определится из зависимости

$$\varphi_1 = \frac{Q}{\varepsilon 2\pi l} \ln \frac{b}{a} = aQ,$$

где $a = \frac{\ln \frac{b}{a}}{\varepsilon 2\pi l}$ — потенциальный коэффициент.

Формулу можно применить и к цилиндрам, радиусами которых не пренебрегают. В этом случае предварительно следует аналитически или графически определить положение электрических осей (рис. 3.1).

Электрические оси двух разноименно заряженных цилиндров находятся в точках пересечения прямой, соединяющей их геометрические центры, и вспомогательной окружности, с диаметром, равным отрезку между точками касания касательной, проведенной к поверхностям рассматриваемых цилиндров.

Пусть задано расположение двух параллельных цилиндров и определено положение их электрических осей, в этом случае проводящие поверхности цилиндров оказываются эквипотенциальными поверхностями поля двух заряженных осей. Возьмем на линии центров две контрольные точки 1 и 2, определяющие расстояние между цилиндрами, и найдем в них потенциалы:

$$\varphi_1 = \frac{Q}{\varepsilon 2\pi l} \ln \frac{b_1}{a_1},$$

$$\varphi_2 = \frac{Q}{\varepsilon 2\pi l} \ln \frac{b_2}{a_2},$$

где b_1 и b_2 — расстояния от отрицательно заряженной оси В до соответствующих точек;

a_1 и a_2 — расстояния от положительно заряженной оси А до соответствующих точек.

Действующее напряжение между цилиндрами равно разности потенциалов между рассматриваемыми точками.

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{Q}{\varepsilon 2\pi l} \ln \frac{b_1 a_2}{a_1 b_2},$$

откуда в соответствии с определением емкости имеем

$$C = \frac{\varepsilon 2\pi}{\ln \frac{b_1 a_2}{b_2 a_1}} [\phi / \text{м}].$$

Для расчета напряженности электрического поля, созданного зарядами цилиндров, рассмотрим точки поля, лежащие на линии, соединяющей центры цилиндров, так как напряженности электрических полей на этой линии имеют наибольшие значения и определяются алгебраической суммой напряженностей электрических полей, создаваемых каждым из зарядов в отдельности:

$$E = E_A + (-E_B).$$

Напряженность электрического поля в любой из точек линии центров получим из теоремы Гаусса

$$E_x = \frac{Q}{\varepsilon 2\pi l} \left(\frac{1}{x} + \frac{1}{d-x} \right).$$

Используя выражение для потенциала в любой точке поля, найдем потенциал для точки 3, находящейся на расстоянии x от электрической оси А:

$$\varphi_x = \varphi_3 = \frac{Q}{\varepsilon 2\pi l} \ln \frac{d-x}{x},$$

где $d = a_1 + b_1 = a_2 + b_2$ — расстояние между центрами электрических осей.

Напряженность электрического поля для точки 3 на линии центров между цилиндрами определится как первая производная от потенциала

$$E_3 = -\frac{d\varphi_3}{dx} = \frac{-Q}{\varepsilon 2\pi l} \cdot \frac{d}{dx} [\ln(d-x) - \ln x] = \frac{Q}{\varepsilon 2\pi l} \left[\frac{1}{x} + \frac{1}{d-x} \right].$$

Из выражения напряженности электрического поля можно найти ее максимальное значение, для чего следует за координату точки взять радиус цилиндра наименьшего диаметра, т. е, принять за x координату a_2 , тогда

$$E_{\max} = \frac{Q}{\varepsilon 2\pi l} \left(\frac{1}{a_2} + \frac{1}{d-a_2} \right).$$

Выразив в выражении заряд через емкость и напряжение, получим зависимость, пригодную для практических расчетов:

$$E_{\max} = U \frac{\frac{1}{a_2} + \frac{1}{d - a_2}}{\ln \frac{b_1 a_2}{b_2 a_1}}$$

Этот случай характеризует электрическое поле двухпроводных линий с небольшим диаметром проводов по сравнению с расстоянием между проводами, поэтому считают, что заряды расположены вдоль геометрических осей.

Задается напряжение и расстояние между проводами D_{12} ; изолирующей средой является воздух.

Двухпроводная линия кроме емкости между проводами C_{12} , имеет емкость каждого из проводов относительно земли C_{11} и C_{22} , называемую частичной.

Совокупность частичных емкостей образует общую емкость, которая определяется как отношение заряда на проводах к напряжению, действующему между ними (рис. 4.1, а):

$$C = C_{12} + \frac{C_{11}C_{22}}{C_{11} + C_{22}} \text{ при } C_{11} = C_{22},$$

$$C = C_{12} + \frac{C_{11}}{2}.$$

Различают еще рабочую емкость провода (рис. 3.2, б), которую определяют как отношение заряда на проводе к его потенциалу в нормальном режиме работы. Для расчета рабочей емкости надо знать эквивалентную емкость между проводами и поверхностью нулевого потенциала

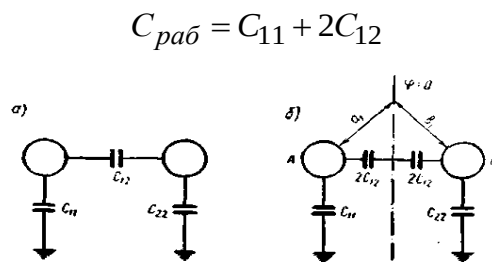


Рисунок 3.2 – Схема для расчета частичных емкостей двухпроводной линии: а — для расчета емкости линии; б — для расчета рабочей емкости провода

Расчет частичных емкостей производится на основании уравнений Максвелла, связывающих потенциалы с зарядами через потенциальные коэффициенты [Л-9].

Из анализа электрического поля между двумя заряженными осями следует, что точки, для которых расстояния от зарядов A и B равны, образуют поверхность нулевого потенциала. Поэтому электрическое поле между цилиндрами и землей, являющейся поверхностью нулевого потенциала, можно рассматривать как поле между цилиндрами и их

зеркальными отображениями. Это положение носит название правила зеркального отображения. Применение уравнений Максвелла и правила *зеркального отображения* рассмотрено в [Л-9] и в задачах.

Для электрического поля двух проводов над землей можно рассчитывать только емкость C_{12} , так как из-за больших расстояний проводов от земли емкости C_{11} и C_{22} малы. Для расчета емкости между проводами используем зависимость (48), в которой за точки 1 и 2 примем точки пересечения образующих цилиндров с линией, соединяющей центры проводов. Тогда, пренебрегая смещением электрических осей, имеем:

$$C = \frac{\varepsilon 2\pi l}{\ln \frac{b_1 a_2}{b_2 a_1}} = \frac{\varepsilon_0 \pi l}{\ln \frac{D_{12}}{r}}.$$

$$b_1 = a_2 = D_{12},$$

$$a_1 = b_2 = r,$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0,$$

или после некоторого упрощения

$$C = \frac{12}{\lg \frac{D_{12}}{r}} n\phi / \text{м}.$$

Для расчета максимальной напряженности электрического поля вблизи поверхности любого из проводов используем выражение; произведя в нем соответствующую замену величин и пренебрегая достаточно малой величиной $\frac{1}{D_{11}}$, имеем

$$E_{\max} = U \frac{\frac{1}{D_{12}} + \frac{1}{r}}{2 \ln \frac{D_{12}}{r}} = \frac{U}{r 2 \cdot 2,3 \lg \frac{D_{12}}{r}}.$$

Одиночный провод над землей

Этот случай характеризует передачу электроэнергии по схеме провод — земля в контактной сети электроподвижного состава, в передачах постоянного тока. Для расчета емкости и напряженности электрического поля, воспользуемся правилом зеркального отображения. При этом следует учесть, что если провод по отношению к земле имел потенциал φ , то после введения в расчет зеркального отображения провода потенциал и расстояние между проводами удваиваются.

Для расчета емкости между проводом и его зеркальным отображением воспользуемся формулой, а для получения емкости C_{11} удвоим полученный результат.

Таким образом, из зависимости

$$C_{11} = \frac{2\pi\epsilon_0 l}{\ln \frac{2h}{r}}.$$

Для расчета напряженности электрического поля вблизи поверхности провода используем выражение. Откуда, удваивая заданный потенциал и считая его за U_0 , имеем

$$E_{\max} = \frac{U_0}{2,3r \lg \frac{2h}{r}}.$$

Две сферы равного диаметра.

Данная система представляет собой распространенный в ТВН случай использования шарового разрядника. Электрическое поле между сферами близко к равномерному. Неравномерность учтена коэффициентом неравномерности y_1 — для изолированных шаров и y_0 — для заземленного шара (см. П-3), Для указанных случаев максимальная напряженность электрического поля определяется зависимостями:

$$E_{\max} = \frac{U}{a} y_1, \quad)$$

$$E_{\max} = \frac{U}{a} y_0.$$

Коэффициенты неравномерности поля зависят от отношения расстояния между сферами к их радиусу и в пределах 0—1,5 определяются из зависимостей

$$y_1 = 0,9 + 0,45 \frac{a}{r},$$

$$y_0 = \frac{1}{2} \left[\frac{a}{r} + \sqrt{\left(\frac{a}{2} \right)^2 + 4} \right].$$

В П-4 и 5 приведены величины пробивных напряжений между сферами различных диаметров.

Емкость между сферическими электродами равного диаметра в воздушной среде определяется по полученной опытным путем зависимости

$$C = \frac{\epsilon_0 \pi a}{y_1 - 1} [\phi].$$

где a — расстояние между сферами, см.

Задания:

Задание №1

Два заряженных цилиндра диаметром 2 см и длиной в 1 м расположены в воздухе параллельно. Расстояние между осями цилиндров 100 см. Определить емкость между цилиндрами, пренебрегая влиянием земли. Для решения воспользоваться формулой считая, что геометрические и электрические оси цилиндров совпадают.

Задание №2

Определить емкость между проводами двухпроводной телеграфной линии протяженностью 100 км при расстоянии между проводами 40 см, радиусе провода 2 мм. Влиянием земли на емкость провода пренебречь. Заряд проводов считать расположенным вдоль геометрической оси провода.

Задание №3

Определить пробивное напряжение между двумя изолированными шарами с радиусами 1 см, если расстояние между шарами 3 см, а значение пробивной напряженности электрического поля 30 кВ.

Задание №4

Определить емкость провода и напряженность электрического поля вблизи поверхности с радиусом 6 мм, протянутого на уровне 2 м над землей. Потенциал провода равен 20 кв. Повторить этот расчет для провода, находящегося на высоте 20 см от земли при прочих равных условиях. Емкость рассчитывать на единицу длины провода.

Задание №5

Два провода А-95 диаметром по 14 мм расположены на высоте 10 м над землей горизонтально и на расстоянии 3 м друг от друга. Определить частичную емкость C_{12} между проводами, емкость каждого из проводов $C_{11} = C_{22}$ относительно земли, рабочую емкость, т. е. емкость провода относительно земли и нейтрали, а также суммарную емкость между проводами линии. Расчет произвести в $\phi/\text{км}$ линии.

Задание №6

Определить пробивное напряжение между одиночной сферой, расположенной в воздухе, и заземленной плоскостью, если $E_{пр}=30 \text{ кВ/см}$, радиус сферы 50 см, а расстояние до плоскости 40 см.

Задание №7

Определить: а) емкость между шаровыми электродами равного диаметра, находящимися в воздухе, если радиус их 10 см, а расстояние между ними 5 см, б) емкость между шаром и плоскостью при тех же условиях. В каждом случае один из электродов заземлен.

Задание №8

Определить максимальную напряженность электрического поля и емкость между шаровыми изолированными электродами равных диаметров, если подводимое напряжение 100 кв. макс., радиусы равны 12,5 см, расстояние между сферами 16 см.

Контрольные вопросы:

1. Как можно объяснить увеличение неравномерности электрического поля шарового разрядника при заземлении одной из его сфер?
2. В каких пределах можно изменять расстояние между сферами шарового разрядника, сохраняя электрическое поле равномерным или близким к равномерному?
3. В чем заключается правило зеркального отображения?
4. На основании какого геометрического построения может быть найдено положение центров электрических осей двух заряженных цилиндров?
5. В чем заключается особенность выражения для потенциальных коэффициентов точек, принадлежащих поверхности нулевого потенциала?
6. На основании какого геометрического построения может быть найдено положение центров электрических осей двух заряженных цилиндров?
7. В чем заключается особенность выражения для потенциальных коэффициентов точек, принадлежащих поверхности нулевого потенциала?
8. Какое практическое применение имеет система из двух сфер?
9. Какие меры предосторожности и почему следует принять при работе монтеров на одной обесточенной цепи двухцепных линий электропередачи?
10. Поясните принцип осуществления «емкостного отбора» мощности от высоковольтной линии электропередачи?

11. Как изменится формула для рабочей емкости провода двухпроводной линии передачи при заземлении одного из проводов?

12. Сравните между собой рабочую емкость и емкость линии для двухпроводной системы. Какая из указанных емкостей больше?

Практическая работа №4. Изоляторы воздушных линий и подстанций. Общая характеристика и закономерность разрядов в газовой среде.

Цель: Изучить характеристику и закономерность электрических разрядов.

Основы теории:

В нормальных условиях, для которых принято атмосферное давление в 760 мм рт. ст., температура 293° К (20° С) и содержание влаги 11 г/м³, воздух, являющийся смесью электрически нейтральных газов, представляет собой диэлектрик с объемным сопротивлением, равным бесконечности.

Ток сквозной проводимости через такой диэлектрик практически невозможен. Идеальным диэлектриком мог бы оказаться абсолютный вакуум, однако даже при технически достижимом разрежении в 10⁻⁶ мм. рт. ст. сохраняются еще достаточно большое количество газовых молекул и условия для образования заряженных частиц.

При воздействии на газовый промежуток электрического поля с достаточной напряженностью газ теряет свои изолирующие свойства и становится проводящим в узком канале или в определенной зоне.

Процесс кратковременной потери газом диэлектрических свойств под действием приложенного к газовому промежутку напряжения называется электрическим пробоем газа.

Величина средней напряженности электрического поля, при которой возникает пробой, называется пробивной напряженностью $E_{пр}$. Пробой -газовой среды объясняется рядом процессов, из которых основными являются процессы ударной ионизации, поверхностной ионизации, термоионизации и фотоионизации.

Процесс ударной ионизации, при котором в объеме газа происходит образование заряженных частиц за счет кинетической энергии соударяющихся электронов и нейтральных частиц. Протекание процесса ударной ионизации зависит от длины свободного пробега λ

заряженной частицы, которая определяет число столкновений частиц $\frac{1}{\lambda}$ — на единицу длины газового промежутка, что в свою очередь зависит от плотности газовых частиц в объеме, т. е. от давления газа p и величины A , характеризующей размеры сталкивающихся частиц. Математически эту зависимость можно выразить формулой

$$\frac{1}{\lambda} = A_p$$

Не каждое столкновение приведет к отрыву электрона с внешней орбиты нейтральной газовой частицы. Доля успешных столкновений зависит от постоянно действующей величины напряженности электрического поля и ионизационных свойств самого газа.

Ток в газовом промежутке в процессе ударной ионизации определяется формулой

$$I = I_0 e^{\alpha a},$$

где $I_0 = ng$ — ток, вызванный действием внешнего ионизатора.

По Тоундсену, который первый предложил количественную теорию разряда в газах, процесс ударной ионизации характеризуется величиной коэффициента ударной ионизации

$$a = A p e^{\frac{-U_{\text{и}}}{\lambda E}},$$

где $U_{\text{и}}$ — потенциал ионизации газа.

Коэффициентом ударной ионизации называется величина, определяющая число успешных соударений (приводящих к расщеплению газовой молекулы на электрон и положительный ион), на 1 см пути движения электрона вдоль поля. При напряженностях электрических полей, близких к пробивным, и давлении, близком к нормальному, величина α для воздуха составляет 10-15 см⁻¹.

Процесс поверхностной ионизации, при котором за счет кинетической энергии положительных ионов газа, бомбардирующих поверхность катода, происходит отрыв электронов. Эти электроны насыщают газовый промежуток и активно участвуют в процессе объемной ионизации.

Число электронов, освобожденных при бомбардировке одним положительным ионом с поверхности катода, принято называть коэффициентом поверхностной ионизации γ .

Величина коэффициента поверхностной ионизации зависит от рода газа, в котором формируется пробой, и от материала катода с учетом состояния его поверхности. Особую роль поверхностная ионизация играет при разрядах в сильно разреженной среде и в вакууме. При низких давлениях воздуха для катода, выполненного из железа $\gamma = (0,02—0,04)$, т. е. на каждые 100 соударений освобождаются с поверхности катода только 2—4 электрона.

Процесс термоионизации и фотоионизации, при которых образование заряженных частиц происходит за счет местного разогрева поверхности электродов или отдельных участков газовой среды, а также за счет квантов электромагнитной энергии, излучаемых в объеме газа при переходе возбужденных атомов в нормальное состояние.

Таким образом, пробой газа и любая другая форма газового разряда связана с движением в электрическом поле имеющихся и вновь образующихся электрических зарядов

(электронов и ионов обоих знаков). Давление газа, температура, влажность и форма электродов, среди которых формируется пробой, определяют не только физические формы разряда, но и величины электрических характеристик пробивной и начальной напряженностей.

Под электрической прочностью воздуха или газа понимают напряжение $U_{пр}$ или величину средней напряженности электрического поля $E_{пр}$, при которой происходит пробой. Наибольшее влияние на величину пробивной напряженности электрического поля оказывает форма электродов, так как она определяет собой степень равномерности электрического поля в момент приложения напряжения. С течением времени поле искажается за счет объемных зарядов — малоподвижных положительных ионов газа, поэтому пробой формируется не сразу, а ступенями.

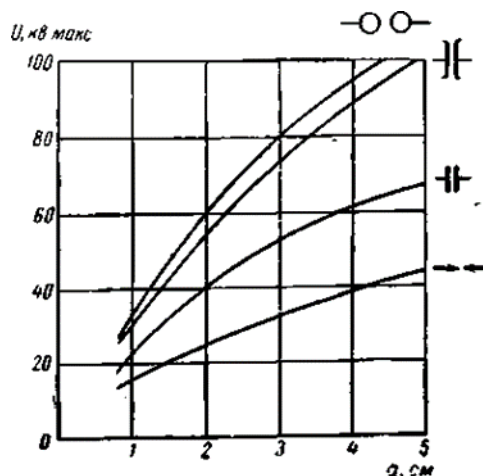


Рисунок 4.1 – Зависимость пробивного напряжения воздушного промежутка от формы электродов и расстояния между ними

Из опытных характеристик рис. 4.1, снятых при переменном токе и расстояниях до 1—5 см между электродами различной формы, следует, что

наибольшей прочностью обладает газовый промежуток между симметричными электродами шар — шар или плоскими электродами типа Роговского.

Наименьшую прочность, имеет газовый промежуток между электродами игла — плоскость, который при прочих равных условиях обладает несколько большей емкостью, чем промежуток между иглами или стержнями.

Отсюда следует, что при одинаковых расстояниях между электродами прочность промежутка тем больше, чем более равномерно электрическое поле.

Для всех материалов опытом установлены значения электрической прочности (см. П-6). Под этим термином понимают величину средней пробивной напряженности электрического поля материала $E_{пр}$ (кв макс./мм или кв действ./мм). Для воздуха в условиях строго

однородного или равномерного электрического поля эта величина при нормальных атмосферных условиях близка к 30 кв макс./см. В случаях неравномерного поля следует говорить только о средней величине пробивной прочности, которая при большой удаленности электродов снижается до 4,6—2,6 кв макс./см (см. П-7). Во всех случаях определения пробивной прочности рекомендуется пользоваться расчетными кривыми или таблицами, при их отсутствии можно применять эмпирические формулы. В расчетах следует учитывать как форму электродов, так и род тока — постоянный, переменный, импульсный, а также наличие заземления одного из электродов.

Заземление одного из электродов всегда снижает прочность газового промежутка из-за перераспределения линий силового поля, увеличивающего напряженность у поверхности изолированного электрода.

Значительное увеличение прочности газового промежутка наблюдается при переходе от длительных воздействий напряжения на импульсные. Это кажущееся упрочнение объясняется тем, что формирование разряда не может произойти мгновенно. Чем меньше время воздействия напряжения, тем прочнее оказывается промежуток. Упрочнение изоляции оценивается коэффициентом импульса $\beta = 1,2—1,8$.

Под коэффициентом импульса понимают отношение амплитуды импульсного разрядного напряжения к статическому разрядному напряжению.

Опыт показывает, что пробивное напряжение воздуха при расстояниях между стержнями до 30 см изменяется по кривой, близкой к параболической, а при больших расстояниях — по линейной зависимости.

Это объясняется влиянием коронного разряда вблизи острия и объемных зарядов, существенно выравнивающих электрическое поле, поэтому при расстояниях в пределах от 100 до 200 см можно пользоваться полуэмпирическими зависимостями, предложенными Ротом и Вайкером:

для переменного тока частотой 50 гц:

если электроды изолированные

$$U_{np} = 15 + 3,8 \cdot a \quad \text{кв действ.,}$$

если один электрод заземлен:

$$U_{np} = 15 + 3,75 \cdot a \quad \text{кв действ.,}$$

для импульса положительной полярности

$$U_{np} = 75 + 5,56 \cdot a \quad \text{кв макс.,}$$

для импульса отрицательной полярности

$$U_{np} = 110 + 6 \cdot a \quad \text{кв макс.,}$$

В соответствии с зависимостями можно оценить величину пробивного напряжения воздушного промежутка (а, см) между элементами электроустановки, условно принимая их за стержни и обеспечивая этим некоторый запас прочности. Для расчета пробивной прочности промежутка (а, м) между электродами стержень — стержень при $1 < a < 4$ м используется полуэмпирическая зависимость

$$U_{np} = (1,45\sqrt{a} - 0,93)10^3 \quad \text{кв макс.,}$$

обеспечивающая точность в пределах $\pm 2,5\%$ (см. Л-18). Для промежутка стержень — плоскость при $a \leq 9$ м применяется зависимость

$$U_{np} = (1,62\sqrt[3]{a} - 1,1)10^3 \quad \text{кв макс.,}$$

обеспечивающая точность в пределах $\pm 5\%$, В П-8, 9, 10 приведены опытные данные для расчета пробивной прочности воздушных промежутков для расстояний $1 < a < 8$.

Рост температуры и снижение атмосферного давления относительно величин, принятых за нормальные, приводят к уменьшению плотности газовых частиц в промежутке между электродами, что способствует образованию пробоя. Это учитывается главным образом в районах, возвышенных над уровнем моря.

Коэффициент относительной плотности воздуха

$$\delta = \frac{0,386p}{273 + t}$$

где p — давление, мм рт. ст.;

t — температура, $^{\circ}\text{C}$.

Пробивное напряжение прямо пропорционально коэффициенту δ :

$$U_{\delta} = U_0 \delta.$$

С увеличением влажности электрическая прочность газового промежутка возрастает, так как взвешенные частицы влаги связывают движущиеся электроны, уменьшая их подвижность. Влажность или весовое количество водяных паров, содержащихся в единице объема воздуха, зависит от температуры. Для каждой температуры существует определенный предел влажности.

Отношение фактически содержащейся влаги к ее предельной величине называется относительной влажностью $f\%$. За нормальную влажность воздуха принята величина 65% , что соответствует содержанию 11 г воды в кубическом метре воздуха. Изменение пробивного напряжения газа относительно нормальных условий учитывается коэффициентом K (см. П-11).

Приближенно для частоты 50 гц и напряжения пробоя 141 кв макс и выше поправочный коэффициент К может быть определен по формуле

$$K = 1,15 - 0,15 \frac{f}{11},$$

где f — фактическая влажность воздуха.

Таким образом, пробивная прочность газового промежутка с учетом давления, температуры и влажности определяется из зависимости

$$U_{np} = U_{np} \frac{\delta}{K},$$

где U_{np} — пробивное напряжение промежутка при условиях, принятых за нормальные.

Задания:

Задание №1

Определить число электронов, ежесекундно достигающих анода, если в воздушном промежутке между электродами созданы условия для ударной ионизации. Число электронов, ежесекундно покидающих катод, 2, коэффициент ударной ионизации равен 11.

Задание №2

Расстояние между токоведущими выводами трансформатора типа ТДЦГ 90000/110 равно 120 см. Определить кратность перенапряжения, при котором происходит перекрытие этого промежутка, и коэффициент его импульсной прочности.

Задание №3

При полевых испытаниях изоляции линии электропередачи на высоте 1000 м над уровнем моря использован шаровой разрядник, одна из сфер которого заземлена. Определить пробивное напряжение и максимальную напряженность электрического поля у поверхности шаров, если диаметр сфер 25 см, расстояние между шарами 6 см, давление воздуха 660 мм рт. ст., температура воздуха 17° С, содержание влаги 20 г/м³.

Задание №4

Воздушный промежуток в 1 см между плоскими электродами характеризуется давлением 760 мм рт. ст. и напряженностью электрического поля 29 кВ/см. Определить число электронов, достигающих анода, если с катода отрывается 1 эл/сек, а в промежутке происходит процесс ударной ионизации.

Задание №5

Трансформатор на 220 кВ установлен в непосредственной близости от разъединителя (заземленная плоскость). Определить минимально допустимое расстояние между трансформатором и разъединителем, если по условиям возможных перенапряжений выбран четырехкратный запас прочности этого промежутка при нормальных атмосферных условиях. Для решения воспользоваться зависимостью.

Задание №6

К газовому промежутку, заключенному между двумя электродами, приложено напряжение, достаточное для возникновения разряда. Определить число электронов, покидающих каждую секунду катод под действием лучей кварцевой лампы, если ток в цепи 1 мкА, заряд каждого электрона $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, длина промежутка 2 см, а коэффициент ударной ионизации 10.

Задание №7

Определить пробивные напряжения между двумя изолированными стержнями, удаленными друг от друга в воздухе на расстояния 120, 220, 800 см. Содержание влаги 20 г/м³, температура воздуха 30° С и давление 740 мм рт. ст.

Задание №8

Определить пробивное напряжение для воздушного промежутка в 120 см, заключенного между изолированным и заземленным стержневыми электродами, при $\delta=0,945$ и коэффициенте, учитывающем влажность $K=0,91$. На промежуток поочередно воздействует положительный и отрицательный импульсы.

Задание №9

Пробивное напряжение газового промежутка с неоднородным полем при влажности 8,5 г/м³ составило 141 кВ макс. Какова прочность этого промежутка в условиях нормальной влажности? Поправочный коэффициент принять по ГОСТ 1516—60 (см. П-12) и рассчитать по аналитической формуле.

Контрольные вопросы:

1. Что представляют собой коэффициенты объемной и поверхностной ионизации?
2. Какой разряд принято называть самостоятельным и каковы условия его возникновения?

3. Почему увеличение содержания влаги в газе повышает электрическую прочность газового промежутка
4. Каким соотношением связаны между собой диаметры сфер разрядника и пределы измеряемых им напряжений?
5. Пояснить роль полярности в формировании разряда между электродами игла — плоскость.
6. Почему при равных условиях промежутки стержень — стержень оказывается прочнее промежутка стержень — плоскость?
7. Какой характер имеет зависимость коэффициента объемной ионизации от давления газа?
8. Что характеризует собой коэффициент импульсной прочности?
9. Что характеризует собой коэффициент импульсной прочности?
10. Что такое электрический барьер и какова его роль в упрочнении газового промежутка?

Практическая работа №5. Внутренняя изоляция электроустановок. Основные формы разрядов в газах и их использование.

Цель: Изучить основные формы разрядов в газах и их применение на производстве.

Основы теории:

В технике высоких напряжений газовая среда служит изолирующим материалом, например, при расположении проводов линий электропередачи в воздухе, между электродами воздушных конденсаторов, в искровых промежутках разрядников и т. д. При этом возникновение ионизационных процессов в воздухе является нежелательным явлением. С другой стороны, работа ряда аппаратов основана на различных формах газового разряда.

Таковыми аппаратами являются трубчатые разрядники, использующие дуговой разряд; установки по очистке дымовых газов на электростанциях, использующие коронный разряд; высоковольтные газосветные трубки с холодным катодом, использующие тлеющий разряд; установки по электроискровой обработке металлов, использующие искровой разряд; установки по окраске изделий - в электрическом поле, использующие тихий разряд и т. д.

Физическая форма газового разряда зависит от совокупности; целого ряда факторов: давления и температуры газа, напряженности и конфигурации электрического поля, мощности источника, плотности тока и расстояния между электродами.

Тлеющий разряд возникает как устойчивая форма газового разряда при давлениях порядка 10—20 мм рт. ст. Этот разряд характеризуется малой плотностью тока 20—50 мА/см² большим перепадом напряжения вблизи электродов 200—400 В.

При тлеющем разряде имеет место переход электрона с удаленной орбиты на орбиту, лежащую ближе к ядру и обладающую поэтому меньшей энергией. Избыток энергии излучается атомом в пространство в виде порции энергии ΔA , называемой квантом или фотоном, величину которой можно выразить как разность энергетических уровней двух орбит: A_1 и A_2 в электронвольтах, т. е.

$$\Delta A = A_2 - A_1$$

Тлеющий разряд в газосветной трубке является источником лучистой энергии или света. Явление холодного свечения газа называется электролюминесценцией.

Видимый свет представляет собой электромагнитные колебания с определённым диапазоном частот или длин волн, Для измерения длин световых волн удобно пользоваться специальной единицей λ , называемой ангстремом и равной 10^{-8} см.

Из физики известно, что пучок солнечного света разлагается стеклянной призмой на лучи различных цветов, образуя спектр. Каждому цвету соответствуют определённые

длины волн. Красному цвету, например, соответствуют электромагнитные колебания с длинами волн в пределах 6300—7700 А.

Расчетом можно установить цвет, соответствующий излучению, воспользовавшись соотношением

$$\lambda = \frac{k}{\Delta A} = \frac{2 \cdot 10^{-8}}{\Delta A}$$

где λ - длина волны излучения, А;

к- Расчётный коэффициент ($2 \cdot 10^{-8}$);

ΔA -энергия излучения, эв.

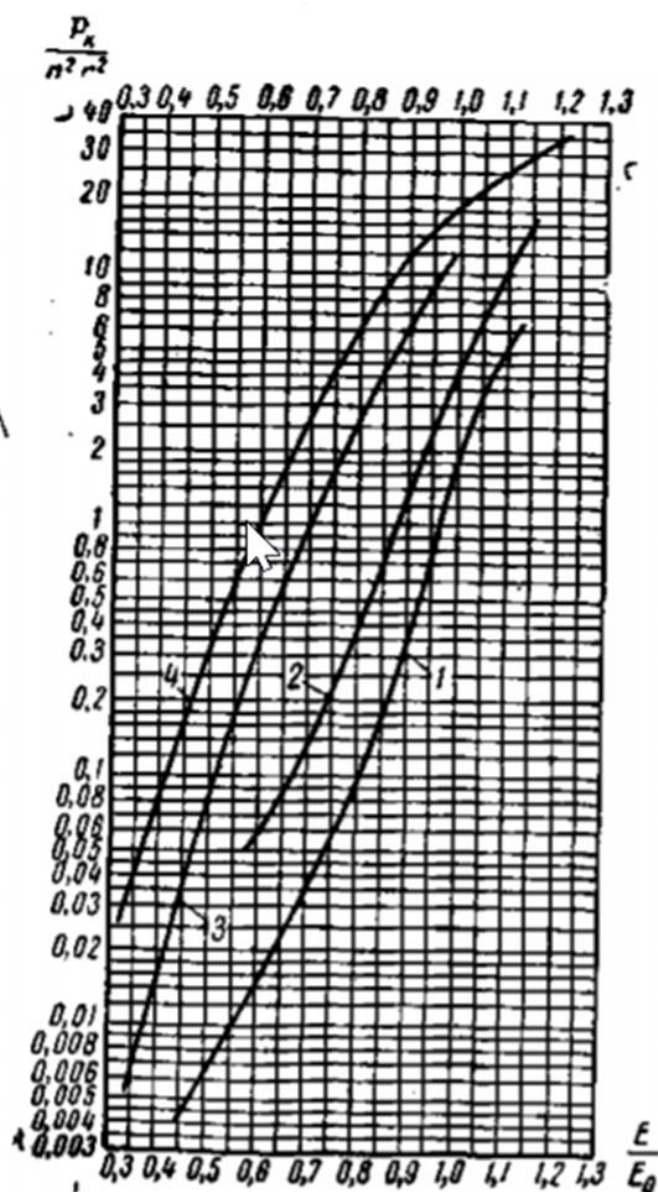


Рисунок 5.1 – Обобщённые характеристики потерь мощности на корону для различных элементов погоды: — хорошая погода; 2 — снег; 3 — дождь; 4 — наморозь

Коронным разрядом, или просто короной, называется один из видов электрического разряда в газовой или воздушной среде, возникающей, в частности, у поверхности проводов воздушных линий электропередачи и у поверхности любых электродов с малым радиусом кривизны под действием рабочего напряжения.

Коронный разряд при большом расстоянии между проводами и, следовательно, при небольшой величине средней напряженности электрического поля не приводит к перекрытию промежутка и может существовать длительно. Корона сопровождается свечением вблизи поверхности провода, характерным потрескиванием, образованием озона и высокочастотными помехами. Появление короны свидетельствует о резкой неравномерности электрического поля и о наличии у поверхности тренирующего электрода напряженности электрического поля, достаточной для возникновения процесса объёмной и поверхностной ионизации, называемой критической $E_{кр}$.

Возникновение короны приводит к существенному выравниванию электрического поля в зоне ее действия.

В большинстве случаев корона рассматривается как вредное явление, так как она приводит к дополнительным потерям активной мощности $P_{кор}$ и энергии.

Кроме того, корона создает радиопомехи и вредно действует на изоляцию органического происхождения.

Положительную роль корона играет при возникновении грозových перенапряжений, снижая амплитуду и крутизну электромагнитных волн. Корона используется в установках по очистке дымовых газов, в установках по разделению эмульсии, в электростатических генераторах, где коронирующий электрод используется для передачи зарядов на движущуюся ленту, и т. д.

В ТВН наиболее распространённым является расчёт потерь мощности на корону для линий электропередачи. При этом последовательно определяются

а) критическая или начальная напряженность электрического поля, соответствующая появлению общей короны;

б) напряженность электрического поля, создающаяся под действием рабочего напряжения линии;

в) среднегодовые потери активной мощности на корону, расчет которых производится по аналитическим зависимостям или с использованием обобщенных характеристик для каждого элемента погоды, полученных на основе произведенных измерений {рис. 16}.

Расчет по обобщенным характеристикам. Начальная напряженность электрического поля, соответствующая появлению короны, зависит от давления воздуха, температуры и состояния поверхности провода и аналитически определяется зависимостью:

$$E_{0\delta} = 30,3m\delta \left(1 + \frac{0.3}{\sqrt{r^2}}\right) \text{ кв макс/см},$$

где r - радиус провода, см;

P - атмосферное давление, мм рт.ст.;

c - температура, °C;

m -коэффициент негладкости, равный 0,82 для витых проводов.

При $\delta=1$ начальная напряженность электрического поля для проводов марки АС-240, АС-300 и АС-400 соответственно равна 31,9, 31,6 и 31,1 кв макс/см.

Рабочая напряженность электрического поля вблизи одиночных проводов линии определяется зависимостью

$$E_{max} = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 r} = \frac{\sqrt{2}UC_n}{\sqrt{3} 2\pi\epsilon_0 r} = 0.0147 \frac{UC_n}{r} [\text{кв макс/см}]$$

где U — действующее значение линейного напряжения, кв;

C_n — рабочая емкость рассматриваемой фазы, пф/м.

Используя значение среднегодовой плотности воздуха для заданной местности (для Московской области 1,04) и определив начальную напряженность электрического поля провода, следует сравнить ее со средним значением рабочей напряженности проводов линии, полученным из зависимости

$$E_{cp.max} = \frac{1}{3} (E_{1max} + E_{2max} + E_{3max})$$

При $E_{cp.max} \leq 0.5 E_{cp}$ производить расчет потерь на корону не требуется

При $E_{cp.max} \leq 0.9 E_{cp}$ потери на корону очень велики.

Установив необходимость произведения расчетов потерь на корону, следует воспользоваться обобщёнными характеристиками потерь мощности для различной погоды (ясно, снег, дождь, изморозь). Указанные характеристики графически определяют функциональную зависимость

$$\frac{P_k}{n^2 r^2} = F\left(\frac{E}{E_0}\right)$$

где n — число проводов в фазе расщепленной линии;

r — радиус провода.

Среднегодовые потери мощности на корону трехфазной линии определяются суммированием потерь по фазам при всех видах погоды по формуле

$$P_k = \frac{n^2 r^2}{8760} \left\{ \left[F_x \left(\frac{E_1}{E_0} \right) + F_x \left(\frac{E_2}{E_0} \right) + F_x \left(\frac{E_3}{E_0} \right) \right] \delta_{cp}^2 T_x + \left[F_d \left(\frac{E_1}{E_0} \right) + F_d \left(\frac{E_2}{E_0} \right) + F_d \left(\frac{E_3}{E_0} \right) \right] T_d \right. \\ \left. + \left[F_c \left(\frac{E_1}{E_0} \right) + F_c \left(\frac{E_2}{E_0} \right) + F_c \left(\frac{E_3}{E_0} \right) \right] T_c \right. \\ \left. + \left[F_{из} \left(\frac{E_1}{E_0} \right) + F_{из} \left(\frac{E_2}{E_0} \right) + F_{из} \left(\frac{E_3}{E_0} \right) \right] T_{из} \right\} \text{ кВт/км},$$

где F_x , F_d , F_c , $F_{из}$ — обобщенные зависимости потерь на корону в хорошую погоду, при дожде, снеге и изморози.

В линии с горизонтальным расположением проводов $E_1 = E_3$.

При приближительных расчетах погоду можно разделить на ясную, считая, что она составляет для средней полосы 80% 68 (7000 ч) и дождь 20% (1760 ч) от числа часов в году. В этом случае расчетная формула значительно упрощается;

$$P_k = \frac{n^2 r^2}{8760} \left\{ \left[F_x \left(\frac{E_1}{E_0} \right) 2 + F_x \left(\frac{E_2}{E_0} \right) \right] \delta_{cp}^2 T_x + \left[F_d \left(\frac{E_1}{E_0} \right) 2 + F_d \left(\frac{E_2}{E_0} \right) \right] (T_d + T_c + T_{из}) \right\}$$

Расчет рабочей емкости трехфазной транспонированной линии с горизонтальным расположением проводов без тросов

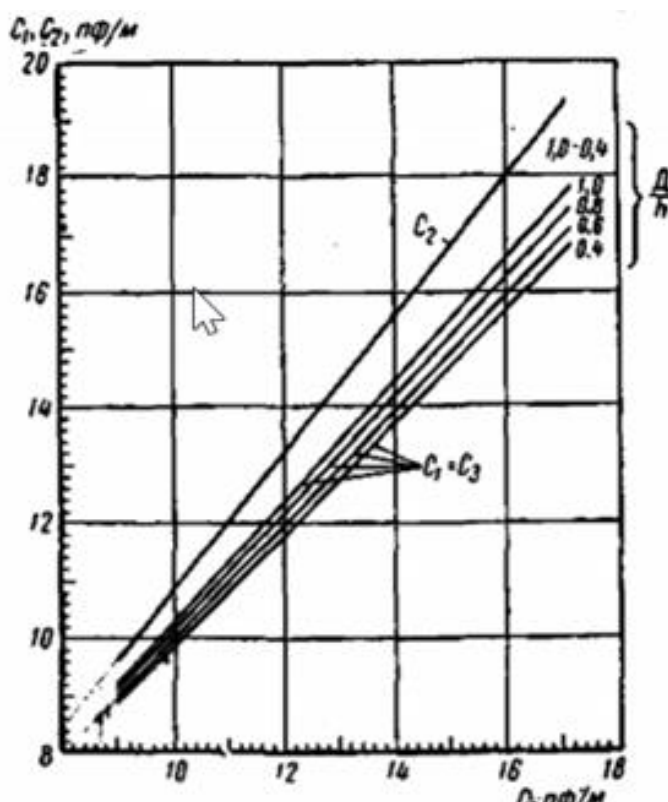


Рисунок 5.2 – Рабочие емкости линии электропередачи с горизонтальным расположением проводов: N — средняя высота провода над землей; D — расстояние между фазами; C_2 — емкость средней фазы; C — средняя емкость транспонированной линии без учета земле; $C_1 = C_3$ емкость крайних фаз трехфазной линии

Значение для рабочей емкости крайних фаз $C_1=C_3$ для различных $\frac{D}{h}$ и средней фазы C_2 может быть определено непосредственно по кривым (рис. 5.2), где по оси абсцисс отложена величина средней рабочей емкости C для всей линии, определяемая зависимостью

$$C = \frac{24.13}{\lg \frac{1.26D}{r}}$$

При отсутствии кривых расчет тех же емкостей может быть произведен аналитически через взаимные:

$$a_{ik} = \frac{\ln \frac{D_{ik}}{D_{ik}}}{2\pi\epsilon_0}$$

и собственные

$$a_{ik} = \frac{\ln \frac{D_{ik}}{D_{ik}}}{2\pi\epsilon_0}$$

потенциальные коэффициенты и уравнения Максвелла, где h_i — средняя высота подвеса провода над землей, определяемая из формулы

$$h_1 = h_0 - \frac{2}{3}f$$

где h_0 — высота подвеса провода на промежуточной опоре;

f — стрела провеса провода в пролете;

D_{ik} — расстояние между проводом (i) и его зеркальным отображением (k)

Уравнение Максвелла, связывающие потенциалы и заряды, имеют вид:

$$\varphi_1 = a_{11}Q_1 + a_{12}Q_2 + a_{13}Q_3$$

$$\varphi_2 = a_{21}Q_1 + a_{22}Q_2 + a_{23}Q_3$$

$$\varphi_3 = a_{31}Q_1 + a_{12}Q_2 + a_{13}Q_3$$

Для горизонтального расположения проводов справедливы следующие равенства:

$$a_{11} = a_{22} = a_{33}$$

$$a_{12} = a_{21} = a_{23} = a_{32}$$

$$a_{13} = a_{31}$$

Решив приведенную систему уравнений относительно зарядов, получим:

$$Q_1 = \beta_{11}\varphi_1 + \beta_{12}\varphi_2 + \beta_{13}\varphi_3$$

$$Q_2 = \beta_{21}\varphi_1 + \beta_{22}\varphi_2 + \beta_{23}\varphi_3$$

где β_{ii} -коэффициенты емкости;

β_{ik} -коэффициенты электростатической индукции.

Эти коэффициенты могут быть выражены через потенциальные коэффициенты, полученные на основе общей зависимости [Л-16]:

$$\beta_{ik} = \frac{(-1)^{i+k} M_{ki}}{\Delta}$$

$$\beta_{11} = \frac{a_{22}a_{33} - (a_{23})^2}{\Delta} \quad \beta_{22} = \frac{a_{11}a_{33} - (a_{13})^2}{\Delta}$$

$$\beta_{33} = \frac{a_{11}a_{22} - (a_{12})^2}{\Delta} \quad \beta_{12} = \frac{a_{13}a_{23} - a_{22}a_{33}}{\Delta}$$

$$\beta_{31} = \beta_{13} = \frac{a_{12}a_{23} - a_{13}a_{22}}{\Delta} \quad \beta_{23} = \beta_{32} = \frac{a_{13}a_{12} - a_{23}a_{11}}{\Delta}$$

$$\Delta = a_{11}[a_{22}a_{33} - (a_{23})^2] - a_{12}(a_{12}a_{23} - a_{13}a_{22}) - a_{13}(a_{13}a_{32} - a_{12}a_{23})$$

где Δ — определитель системы уравнений (68а) (см. П-29);

M_{ki} — минор, полученный вычеркиванием из определителя k -й строки и i -го столбца.

Рабочие емкости фаз находят по уравнениям:

$$C_1 = \beta_{11} + \beta_{12} + \beta_{13} - \frac{3}{2}(\beta_{12} - \beta_{13})$$

$$C_2 = \beta_{22} + \beta_{21} + \beta_{23} - \frac{3}{2}(\beta_{21} + \beta_{23})$$

$$C_3 = \beta_{33} + \beta_{31} + \beta_{32} - \frac{3}{2}(\beta_{31} - \beta_{32})$$

В соответствии с Правилами устройства электроустановок (ПУЭ) для линий электропередач ПО и 220 кВ корона устраняется применением проводов сечением не меньше, чем у АС-50 и АС-240, поэтому потери на корону учитываются для указанных сечений только в высокогорных районах, а для обычных районов — начиная с 330 кВ и более. Потери на корону не должны, превышать 2—5% от активных потерь в самом проводе. При дожде потери в линиях электропередач напряжением 500 кВ могут достигать 50—100 кВт/км, при гололеде 10—15 кВт/км, в хороших условиях 0.1—0,5 кВт/км.

В качестве примера рассмотрим широко известную, формулу Пика. Потери отнесены к одному проводу на 1 км длины трёхфазной линии с симметрично расположенными проводами, а напряжение принято фазное действующее:

$$\Delta P_k = \frac{241}{\delta} (f + 25) \sqrt{\frac{r}{D}} (U_\phi - U_0)^2 10^{-5} \text{ кВт/км}$$

где f — частота переменного тока, Гц;

δ — относительная плотность воздуха;

r — радиус провода, см;

D — расстояние между проводами, см;

U_0 — условное напряжение, называемое критическим и определяемое из зависимости.

$$U_0 = E_0 r \ln \frac{D}{r}$$

или из формулы

$$U_0 = 21,2 \delta m_1 m_2 r \ln \frac{D}{r} \text{ кв действ.},$$

где $m_1 = (0,98—0,83)$ — коэффициент негладкости провода;

$m_2 = 0,8$ — коэффициент ненастной погоды.

Критическое линейное напряжение может быть получено из выражения

$$U_0 = 84,6 m_1 m_2 \delta r \lg \frac{D}{r} \text{ кв действ.},$$

Потери на корону наступают при равенстве линейного или фазного напряжения линии, соответствующему критическому линейному или фазному напряжению, и возрастают при увеличении действительного напряжения над критическим.

При расположении проводов в горизонтальной плоскости корона на крайних проводах возникает при напряжениях на 6 % больших, а на среднем проводе на 4% меньших критического, определяемых по зависимостям.

Потери на корону во всех трех проводах при частоте переменного тока 50 Гц определяются из выражения:

$$\Delta P_k = \frac{0,18}{\delta} \sqrt{\frac{r}{D}} (U - U_0)^2 \text{ [кВт/км]}$$

где U и U_0 — соответствующие линейное и критическое напряжения.

Таким образом, расчет проводов линии на корону сводится к определению критического напряжения и установлению наличия или отсутствия короны из соотношения:

при $U < U_0$ потерь на корону нет;

при $U > U_0$ потери имеют место.

После чего по формуле производят расчет величины потерь на корону.

Эффективным средством снижения потерь на корону является применение расщепленных проводов на два, три и даже четыре провода в каждой фазе.

Эквивалентный радиус расщепленного провода можно получить из формулы:

$$r_{\text{экв}} = \sqrt[n]{r_0 a^{n-1}} \text{ [см]}$$

где r_0 — радиус одиночного провода;

n — число проводов в расщепленной фазе;

a — расстояние между проводами в расщепленной фазе, см.

Большое практическое применение имеет расчет короны для системы, состоящей из двух коаксиальных цилиндров, т. е. имеющих совмещенные оси. В одних случаях, когда

конструкция представляет собой цилиндрический конденсатор, задачей расчета является недопустимость возникновения короны, в другом случае, например в установках по очистке дымовых газов, используется именно эффект короны.

Для расчета напряженности электрического поля, при которой между цилиндрами возникает устойчивая корона, используется зависимость

$$E_k = 31\delta \left(1 + \frac{0,308}{\sqrt{r\delta}}\right) \text{ кв макс./см}$$

Расчет критического напряжения, при котором у поверхности внутреннего цилиндра создается критическая напряженность электрического поля, производится по формуле:

$$U_k = E_k \ln \frac{R}{r} [\text{кв. макс}]$$

где R, r — соответственно радиусы внешнего и внутреннего цилиндров.

Приведенные зависимости по своей структуре близки к формулам (65—70).

Дуговой разряд является одной из форм самостоятельного разряда, т. е. разряда, происходящего без воздействия внешних ионизаторов на газовый промежуток. Дуговой разряд характеризуется большой плотностью тока (250—500 а/см²) в свободной и 6—18 ка/см³ в обдуваемой дуге, высокой температурой газа 5000—10 000° К в центральной зоне дугового столба и очень малой величиной напряженности электрического поля 15—50 в/см, при которой поддерживается устойчивая ионизация газа в промежутке.

Дуговой разряд при нормальном атмосферном давлении сопровождается интенсивным световым и тепловым излучением.

С увеличением тока напряжение на участке дуги падает, так как рост тока приводит к увеличению сечения канала дуги и к усилению процессов термоионизации газа и термоэлектронной эмиссии с поверхности раскаленного катода.

Одновременно с процессом ионизации в газовом промежутке происходит и деионизация, т. е. нейтрализация зарядов, способствующая охлаждению дуги.

Для расчета напряжения, обеспечивающего поддержание дуги в воздушном промежутке длиной $l \gg 100$ см при нормальном давлении, предложена зависимость

$$U_{\text{дуги}} = 62 + l \left(11.4 + \frac{32.6}{i} \right) \text{ В,}$$

где i — ток в канале дуги, а;

l — длина дуги, см.

При переменном токе создавшаяся дуга может погаснуть при переходе тока через нулевое значение или повторно зажечься. Это зависит от скорости восстановления электрической прочности E_t промежутка и роста напряженности электрического поля, создаваемого восстанавливающимся напряжением E. Дуга гаснет, если $E_t > E$.

Быстрое увеличение прочности дугового промежутка наблюдается при горении дуги в узких щелях или при интенсивном перемешивании раскаленной плазмы с холодным газом. Этот принцип нашел применение в конструкциях трубчатых разрядников и высоковольтных выключателях с воздушным и масляным дутьем.

В высоковольтных линиях электропередачи дуга может появиться после искрового перекрытия линейной изоляции под действием волны грозового перенапряжения. Через созданный дуговой канал замыкается высокочастотный ток колебательного контура, образованного емкостью провода и индуктивностью контура. При переходах этого тока через нулевое положение ионизация промежутка поддерживается рабочим напряжением, и дуга может восстановиться.

Скорость нарастания прочности промежутка, в котором горела дуга, зависит от ее длины, величины тока молнии, конструкции линейной изоляции, вдоль которой произошел разряд, а также от атмосферных условий.

В электрических системах напряжением до 35 кВ включительно нейтраль сети изолирована и дуговое замыкание на землю и приводит к отключению линии защитой. В таких сетях дуга может существовать длительно и для ее гашения необходимо принимать специальные меры.

Наиболее распространенным средством борьбы с дугой является кратковременное отключение линий или компенсация емкости проводов индуктивностями, включенными в нейтраль питающих сеть трансформаторов.

Открытой дугой называют электрическую дугу в воздухе, не подвергающуюся никаким специальным воздействиям, ускоряющим процесс ее угасания.

Дуга может возникнуть между концевыми вертикальными или горизонтальными электродами (рис. 18.1, а, б) либо между протяженными горизонтальными или вертикальными электродами (рис. 18.1, в, г). Удлинение дуги может произойти от действия ветра, восходящих конвекционных потоков воздуха или под действием электродинамических сил самой дуги. Основным фактором самопроизвольного угасания дуги является ее длина. Длина дуги, при которой она безусловно гас* нет, при данной величине тока, называется критической.

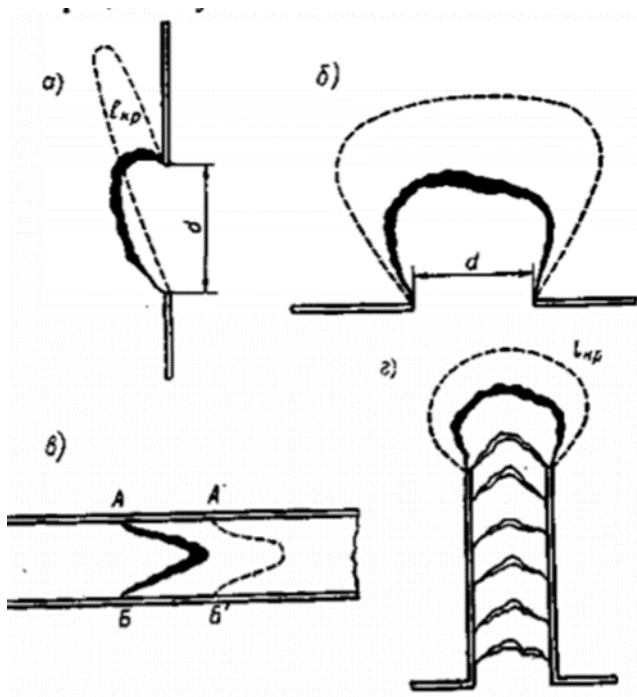


Рисунок 5.3 – Схемы горения электрической дуги в воздухе: а — вертикальные электроды, б — горизонтальные электроды, в — горизонтальные протяженные электроды, г — вертикальные протяженные электроды

При оценке условий успешного угасания открытой дуги существенное значение имеют форма и расположение электродов.

При вертикальном расположении электродов критическая длина дуги может быть в пять, а при горизонтальном расположении в двадцать раз длиннее расстояния между ее опорными точками. Отсюда можно сделать вывод: горизонтальная дуга гаснет значительно легче дуги, горящей между вертикальными электродами.

При увеличении длины дуги увеличивается отвод от нее энергии в виде тепловых и световых излучений. Дуга гаснет — когда отводимая энергия станет больше подводимой. Ток, устанавливающийся в момент баланса энергий, называется критическим током дуги.

Критический ток составляет 20—40% от начальной величины тока короткого замыкания.

Средняя напряженность электрического поля в столбе дуги при начальных токах 100—1000 А определяется при достижении ею критической длины из соотношения

$$E_{cp} = \frac{U}{l_{kp}} [2 - 3]$$

Критическая длина дуги зависит от тока короткого замыкания, т. е. от величины сопротивления цепи. При этом между током короткого замыкания, напряжением и критической длиной дуги существует определенная связь:

а) для чисто активного сопротивления в цепи

$$l_{(R)кр} = \frac{l_{к.з}^n U}{C} \cdot \frac{n^n}{n + 1^{n+1}}$$

б) для цепи, содержащей только реактивное сопротивление,

$$l_{(x)кр} = \frac{l_{к.з}^n U}{C} \cdot \frac{n^{\frac{n}{2}}}{n + 1^{\frac{n+1}{2}}},$$

где C — постоянная величина, равная 100 для значений токов 500—6000 А;

n — постоянная, равная 0,25 для токов в тех же пределах.

После подстановки данных величин имеет для критической длины дуги и критического тока следующие зависимости:

Для сети с активным сопротивлением

$$l_{(x)кр} = 0,08 U I_{к.з}^{0,25}$$

$$l_{(x)кр} = 0,2 I_{к.з}$$

для сети с реактивным сопротивлением

$$l_{(x)кр} = 0,1 U I_{к.з}^{0,25}$$

$$l_{(x)кр} = 0,45 I_{к.з}$$

где $I_{к.з}$ — действующее значение тока короткого замыкания, а.

Выше было отмечено, что (напряженность в канале дуги равна 2—3 кв/м, более точно ее определяют из зависимости

$$E = 12,5 + 34 I^{-0,4} \text{ В/см}$$

где I — амплитуда тока короткого замыкания, А.

При эксплуатации линий чаще всего возникают однофазные замыкания проводов на землю, при этом дуга горит между проводом и элементом заземленной опоры. При пофазном отключении с помощью АПВ поврежденной линии дуга должна погаснуть, однако через ионизированный канал продолжают протекать емкостные токи оставшихся под напряжением проводов (рис. 19).

Эти токи замедляют деионизацию промежутка, на котором в момент отрыва дуги восстанавливается напряжение V_x , определяемое из соотношения (79).

Предположим, что при отключении поврежденной фазы дуга в точке замыкания на землю погасла, и, следовательно, ее сопротивление стало близким к бесконечности. Тогда можно написать зависимости для напряжений двух образующихся контуров (фаза 3—2 — земля) и (фаза 1—2 — земля):

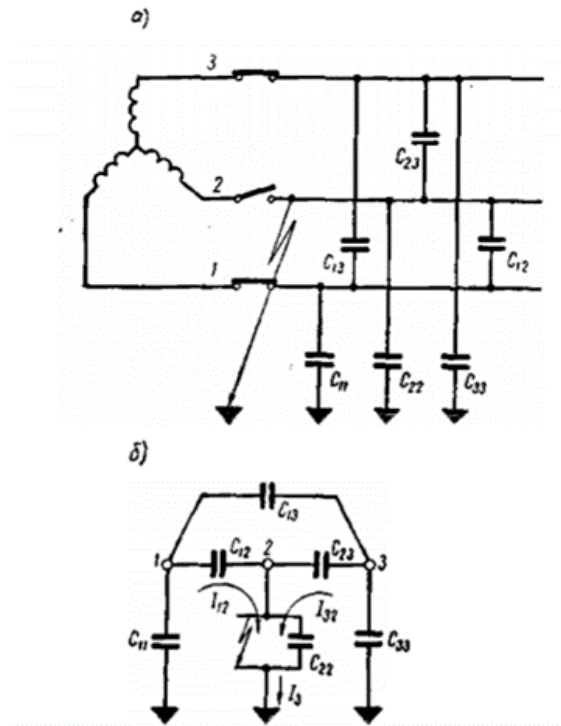


Рисунок 5.4 – Схема сети с по фазным АГТВ C_e) и схема протекания емкостных токов при обрыве дуга в выключателе (б)

$$\left. \begin{aligned} U_{\phi(3)} &= U_{32} + U_x \\ U_{\phi(1)} &= U_{12} + U_x \end{aligned} \right\}$$

где U_{32} и U_{12} — напряжения на емкостях C_{32} и C_{12}

U_x — искомое восстанавливающееся напряжение на участке погасшей дуги, кв.

действ.

Так как

$$U_{32} = \frac{I_{32}}{\omega C_{32}}$$

$$U_{12} = \frac{I_{12}}{\omega C_{12}}$$

$$U_x = \frac{I_{32}}{\omega C_{23}}$$

и полагая, что $C_{32}=C_{12}$ и $I_2=I_{32}+I_{12}$, из зависимости (78) получим

$$U_{\phi(3)} + U_{\phi(1)} = U_{32} + U_{12} + 2U_x = \frac{I_{32} + I_{12}}{\omega C_{32}} + 2U_x =$$

$$= \frac{I_3}{\omega C_{32}} + 2U_x = \frac{U_x \omega C_{32}}{\omega C_{32}} + 2U_x,$$

Откуда

$$U_{\phi} = U_x \left(\frac{C_{22}}{C_{23}} + 2 \right)$$

полагая, что

$$\frac{C_{22}}{C_{23}} \approx 5$$

окончательно имеем

$$U_x = 0.14 U_{\phi}$$

Считая, что в контуре действует только реактивное сопротивление, можно, задаваясь величиной вероятного остаточного тока, соответствующего глухому (металлическому) замыканию фазы на землю, на каждые 100 линии оценить критическую длину дуги, используя соотношение

$$l_{(x)кр} = 0.1 U_x I_{к.з}^{0.25}$$

Токи замыкания на землю принимаются равными 2 А для 110 кВ, 4 А для 220 кВ и 10 А для 500 кВ.

Предположив, что дуга горела вдоль гирлянды линейных изоляторов с длиной К, можно установить факт самопогасания дуги из условия $l_{(x)кр} < \lambda$ при осуществлении пофазного отключения линии с помощью АПВ

Задания:

Задание №1

Определить среднегодовые потери активной мощности на корону для линии напряжением 525 кВ, выполненной проводом 2ХАСУ-240/300, если продолжительность ясной погоды T_x — 7000 ч, а ненастной погоды T_d = 1760 ч. 83 Расположение проводов горизонтальное с расстоянием между ними 10,5 м. Средняя высота подвеса провода 13 м, шаг расщепления 30 см, относительная плотность воздуха — 1. Радиус провода 1,12 см. Расчет произвести с помощью обобщенных характеристик.

Задание №2

Линия электропередачи длиной 100 км выполнена на металлических опорах с гирляндами изоляторов 12хП-4,5, имеющих длину 2 м. В результате атмосферного перенапряжения произошло перекрытие гирлянды. Установить по критической длине дуги условие ее горения или самопогасания, если после отключения поврежденной фазы линии с рабочим напряжением 230 кВ остаточный ток емкостной проводимости равен 4 А. В расчете учитывается только реактивное сопротивление. Соотношение между частичными емкостями проводов смежных фаз и фазы на землю принять равным 0,2.

Задание №3

Устройство по очистке дымовых газов котельной состоит из системы цилиндрических труб диаметром 16 см. По оси каждой из этих труб натянут цилиндрический провод с диаметром 4 мм. Определить критическую напряженность электрического поля и критическое напряжение, при которых появится общая корона, если относительная плотность воздуха 0,92.

Задание №4

Для воздушной линии электропередачи трехфазного тока с линейным напряжением 115 кВ применены провода М-70 с расчетным диаметром 10,6 мм. Провода расположены равнобедренным треугольником с расстоянием между ними 400 см. Коэффициент негладкости 0,85, относительная плотность воздуха 1, частота тока 50 Гц. Определить, во сколько раз увеличатся потери мощности на корону в линии при ненастной погоде (коэффициент погоды 0,80) по сравнению с потерями при ясной погоде.

Задание №5

Линия электропередачи протяженностью 100 км с рабочим напряжением 115 кВ сооружена на металлических опорах с гирляндами изоляторов 7хП-4,5, общей длиной 126 см. В результате атмосферного перенапряжения произошло перекрытие одной из гирлянд. Установить условие горения или самопогасания дуги, если после отключения поврежденной фазы остаточный емкостный ток равен 2а, а соотношение между частичными емкостями $\frac{C_{22}}{C_{23}} = 5$

Задание №6

Определить критическое напряжение и максимальную напряжённость электрического поля на поверхности провода линии передачи с номинальным напряжением 220 кв. Провода марки АС-300 расположены в горизонтальной плоскости с расстоянием между ними 7 м. Погода ясная, атмосферные условия нормальные, (коэффициент негладкости витого провода 0,85, диаметр провода 24,2 мм.

Контрольные вопросы:

1. Что следует понимать под критической длиной дуги и под критическим током дугового разряда?

2. Как влияет расположение электродов и их конструкция на условия самопогасания открытой дуги?

3. При каких условиях имеет место самопогасание открытой дуги переменного тока при однофазном замыкании на землю?

4. Какое влияние на восстановление прочности промежутка оказывает ширина щели, в которой горела дуга

Практическая работа №6. Испытания изоляции. Измерение сопротивления и емкости изоляции. Перекрывание твердой изоляции и скользящие разряды на поверхности.

Цель: Изучить понятия перекрывания изоляции, скользящие разряды и перенапряжения на воздушных линиях.

Основы теории:

Твердая высоковольтная изоляция, разделяющая токоведущие части, имеет ограниченные размеры и заключена в изолирующую среду, которой является воздух или трансформаторное масло.

Под действием разности потенциалов между проводящими частями во всех изолирующих средах устанавливается электрическое поле. Вектор напряженности этого электрического поля в каждой точке можно условно разложить по отношению к поверхности раздела на составляющие E_n и E_t . Первый из этих векторов направлен перпендикулярно к разделяющей поверхности, а второй — по касательной.

Используя аналогию с преломлением световых лучей, можно доказать, что при переходе вектора напряженности из одной среды в другую он подчиняется закону преломления.

Если граница раздела двух изолирующих сред не расположена нормально к силовым линиям электрического поля, то вектор напряженности электрического поля испытывает при переходе в смежную среду преломление так, что отношение угла падения α_1 к углу преломления α_2 равно отношению относительных диэлектрических проницаемостей соприкасающихся сред. При этом тангенциальные составляющие преломляющегося и преломленного векторов равны между собой $E_{1t} = E_{2t}$, а нормальные составляющие подчиняются соотношению:

$$\frac{E_{2n}}{E_{1n}} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2}$$

Нормальная составляющая вектора напряженности электрического поля является причиной сквозного пробоя изоляции, а тангенциальная — причиной разряда вдоль поверхности. Завершенная форма последнего называется перекрыванием изоляции. Перекрывание не приводит к разрушению изоляции и только временно нарушает ее изолирующие свойства. Достаточная для перекрывания напряженность электрического поля зависит от

формы и состояния поверхности диэлектрика, степени ее загрязненности, увлажнения и неравномерности электрического поля.

Для перекрытия изоляции в условиях неравномерного поля величина средней напряженности электрического поля 0,1—0,2 кВ/мм может оказаться достаточной, а в равномерном — 0,6—0,8 кВ/мм и более. Если перекрытие происходит вдоль поверхности I, то напряжение перекрытия определится зависимостью

$$U_{\text{пер}} = \int_0^1 E_t dl = E_{t(\text{ср})} l$$

Конструктор, изменяя форму поверхности изоляции, может, в зависимости от ее назначения, предопределить форму разряда, направляя его по пути пробоя или перекрытия.

На рис. 6.1 приведены контуры изоляторов, перекрытие которых затруднено.

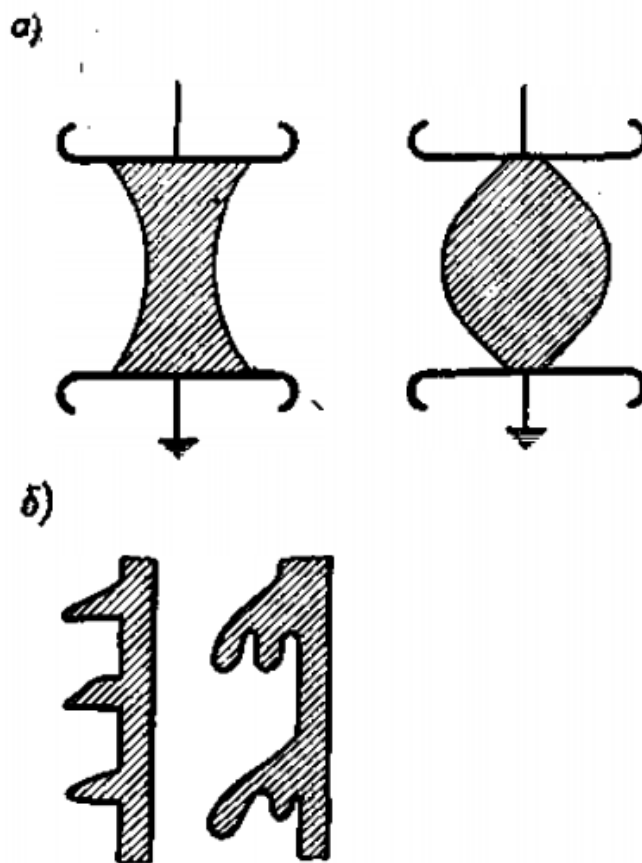


Рисунок 6.1 – Примеры форм трудно перекрываемых поверхностей изоляторов

В линиях, находящихся под кратковременным перенапряжением, перекрытие гирлянд наступает при напряжении в 1,5—2 раза меньшем пробивного. Таким образом, перекрытие технически используется как своеобразное средство защиты изоляции от пробоя.

При достаточно больших расстояниях между электродами или при наличии искусственно развитой поверхности, затрудняющей перекрытие, разряд вдоль поверхности может принять устойчивую форму скользящего разряда.

Скользкий разряд в этих случаях предшествует перекрытию, сопровождается короной у электродов и имеет вид прорастающих кистей или искровых побегов, оставляющих на поверхности органической изоляции следы в виде выжженных борозд.

Рассмотрим явления, происходящие при поверхностном и скользком разрядах. Пусть задан воздушный промежуток между двумя плоскими электродами, пробивная прочность которого определена. Введем в промежуток фарфоровый или стеклянный цилиндр, пробивная прочность которого значительно выше прочности воздушного зазора. Казалось бы, что при этом прочность промежутка между электродами увеличится.

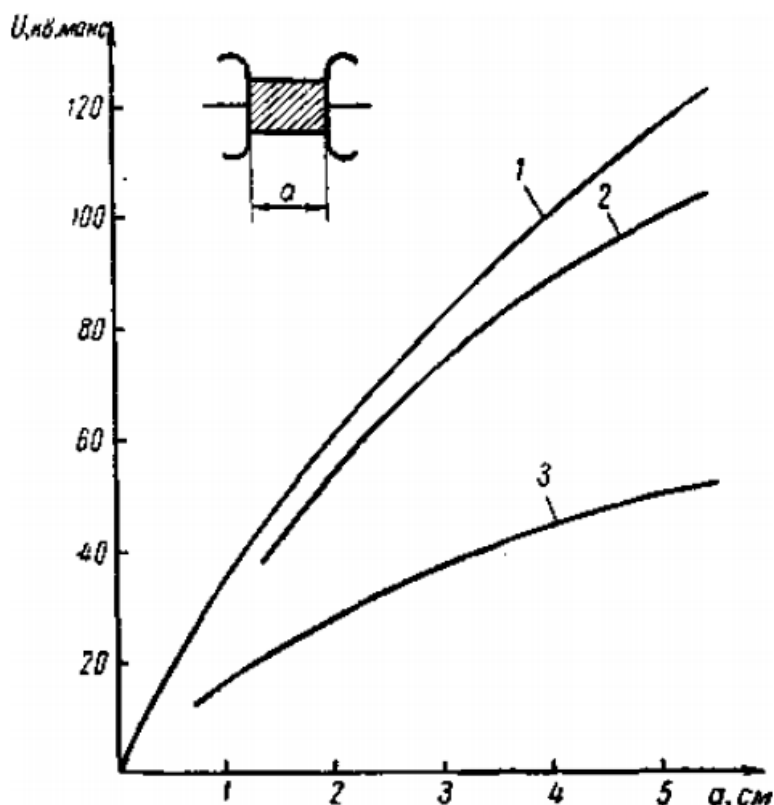


Рисунок 6.2 – Разрядные напряжения между плоскими электродами: 1- по воздуху; 2 — по поверхности фарфора 3 — по поверхности стекла

Опыт, однако, показывает, что разряд по поверхности твердого диэлектрика наступает при напряжении, меньшем первоначально заданного, так как присутствующие в воздухе положительные и отрицательные ионы перераспределяются в объеме. Отрицательные ионы связываются поверхностью твердой изоляции, а положительные располагаются в виде облака над слоем отрицательных ионов. Под действием нормальной составляющей вектора напряженности электрического поля эти ориентированные слои стремятся сблизиться, резко увеличивая напряженность поля у поверхности изолятора. При наличии влаги процесс усиливается, а при импульсном воздействии ослабевает.

Если в описанном опыте фарфор заменить стеклом, парафином или другими материалами, то, в зависимости от адсорбирующей способности этих материалов, напряжение, необходимое для перекрытия или возникновения скользящих разрядов, будет изменяться.

Представлены опытные характеристики разрядных напряжений воздуха и вдоль поверхностей стекла и парафина, заключенных между жесткими электродами.

Исследованиями установлено, что поверхность твердого диэлектрика, покрытая адсорбированными отрицательными ионами, является по отношению к ионному облаку своеобразной обкладкой конденсатора, что позволило ввести понятие удельной поверхностной емкости C_0 ф/см²

В результате многочисленных опытов установлено, что напряжение, при котором начинается скользящий разряд, зависит от величины этой емкости:

$$U_{ск} = \frac{1,36 \cdot 10^{-4}}{C_0^{0,44}} \text{ кв действ}$$

Здесь C_0 — поверхностная удельная емкость, определяемая для цилиндрических тел зависимостью

$$C_0 = \frac{C}{2\pi r_2 l} = \frac{\varepsilon 2\pi l}{2\pi r_2 l \ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{\varepsilon}{r_2 \ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{\varepsilon 7,7 \cdot 10^{-14}}{D \lg \frac{D}{d}} [\text{ф/см}^2]$$

где D и d - соответственно наружный и внутренний диаметры цилиндрического изолятора, см.

Задания:

Задание №1

Определить напряжение возникновения скользящих разрядов для цилиндрического изолятора с наружным диаметром 7 см, диаметром токоведущей части 3 см и относительной диэлектрической проницаемостью изоляции 5,5.

Задание №2

Цилиндрический диск из гетинакса толщиной 0,2 см и диаметром 6 см зажат между стержневыми электродами. Определить напряжение пробоя и перекрытия и дать заключение о возможности осуществления пробоя в воздушной среде, если напряженность электрического поля перекрытия принята 4,5 кВ/см, а пробоя — 20 кВ/мм.

Задание №3

Конденсаторный ввод имеет десять слоев бакелитовой изоляции толщиной 3 мм со станнолиевыми прокладками между слоями. Определить напряжение возникновения скользящих разрядов вдоль ввода, если относительная диэлектрическая проницаемость изоляции 4,5, а напряжение между слоями распределяется поровну.

Задание №4

Цилиндрический проходной изолятор имеет три слоя изоляции: бакелитовую, масляную и фарфоровую. Электрические емкости отдельных слоев соответственно равны $10 \cdot 10^{-14}$ ф/см², $20 \cdot 10^{-14}$ ф/см² и 10^{-18} . Определить, при каком напряжении между фланцем и токоведущим стержнем появится скользящий разряд по поверхности.

Задание №5

Образец слоистой изоляции с диэлектрическими проницаемостями слоев, равными 3 и 8, помещен в равномерное электрическое поле с напряженностью в 10 кВ/см. Вектор этой напряженности пересекает линию раздела (рис. 6.2) под углом 45°. Определить нормальную и тангенциальную составляющие напряженности электрического поля в каждом из слоев.

Контрольные вопросы:

1. Объясните разницу в понятиях: пробой, перекрытие и скользящий разряд. 90
2. Почему внешняя поверхность изоляторов для наружной установки делается ребристой?
3. Сформулируйте определение поверхностной емкости применительно к цилиндрическому изолятору.
4. Сформулируйте основные положения закона преломления вектора напряженности электрического поля.
5. Поясните, почему затруднено перекрытие изоляторов, имеющих развитую или вогнутую форму?
6. Как следует поставить опыт пробоя подвесного изолятора, если известно, что перекрытие по поверхности изолятора в воздухе наступает при напряжении, значительно меньшем пробивного?
7. Какое влияние на величину напряжения перекрытия может оказать покрытие полупроводящей глазурью поверхности изолятора?

Практическая работа №7. Контроль диэлектрических потерь и измерение параметров частичных разрядов. Контроль повышенным напряжением. Испытания изоляции отдельных видов оборудования. Контроль изоляции контактной сети. Тепловой и электрический пробой.

Цель: Изучить условия возникновения тепловых и электрических пробоев.

Основы теории:

Под пробоем твердого диэлектрика понимают местное разрушение изоляции, происходящее под действием сил электрического поля.

В отличие от пробоя жидкой или газовой среды, в которых нарушение изолирующих свойств является временным состоянием, при пробое твердой изоляции проводящий канал в ней сохраняется и после снятия напряжения.

Многочисленные опыты показывают, что в твердой изоляции могут быть две формы пробоя: электрический и тепловой.

Электрический пробой наступает в тот момент, когда нормальная составляющая вектора напряженности электрического поля достигает предельного для данной изоляции значения.

Величины средней пробивной напряженности электрического поля для наиболее употребительных изоляционных материалов приведены в П-6.

Признаками электрического пробоя являются:

- а) постоянство пробивного напряжения независимо от температуры диэлектрика;
- б) отсутствие видимого нагрева изоляции дугой в месте пробоя при быстром снятии напряжения;
- в) малая длительность времени, необходимая для формирования пробоя;
- г) зависимость величины пробивного напряжения от формы электродов, т. е. от степени неоднородности поля;
- д) независимость амплитуды пробивного напряжения от частоты и рода тока.

При изменении толщины диэлектрика, находящегося в неравномерном электрическом поле, величина пробивного напряжения определяется из квадратичной зависимости [Л-2]:

$$U_{\text{пр}(2)} = U_{\text{пр}(1)} \sqrt{\frac{a_2}{a_1}}$$

где $U_{\text{пр}(2)}$ — пробивное напряжение, определенное опытным путем, для образца произвольной толщиной a_1 ;

$U_{\text{пр}(1)}$ — пробивное напряжение для образца толщиной.

Напряжение электрического пробоя может быть рассчитано, исходя из табличных значений пробивной напряженности, по формулам для определения напряженности электрического поля в конденсаторах простейших конструкций. Например, для конденсатора цилиндрической конструкции справедлива зависимость:

$$U_{\text{пр}} = E_{\text{пр}} r \cdot 2,3 \lg \frac{R}{r}$$

где $E_{\text{пр}}$ находится по П-б,

Если твердый диэлектрик подвергнуть длительному воздействию напряжения, величина которого недостаточна для электрического пробоя, но близка к ней (85—90%), то в нем под действием токов сквозной проводимости будет выделяться тепло, отвод которого затруднен. Под действием местного разогрева структура диэлектрика изменяется, проводимость возрастает и прогрессирующий нагрев вызывает прожигание или оплавление изоляции. Пробой такой формы называется тепловым пробоем.

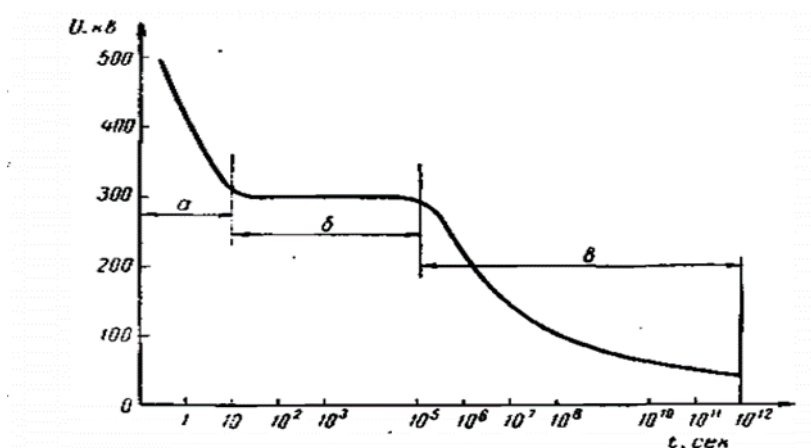


Рисунок 7.1 — Характеристика пробивного напряжения для твердой изоляции: а — область импульсного пробоя; б — область электрического пробоя; в — область теплового пробоя

Напряжение, при котором происходит тепловой пробой, зависит от физических свойств самого диэлектрика, его структуры, наличия в нем неоднородностей и от внешних условий отвода тепла.

При профилактических испытаниях изоляции повышенным напряжением появление теплового пробоя нежелательно, поэтому длительность испытания ограничивается одной или пятью минутами.

Представлена вольтсекундная характеристика пробоя твердой изоляции (электрокартон) и выделены области теплового и электрического пробоев. Формулы для расчета напряжения, вызывающего тепловой пробой, предложены академиками В. А. Фоком и Н. Н. Семеновым [Л-9] и рассматриваются в курсе «Электроматериалы».

Напряжение, при котором наступает тепловой пробой твердых диэлектриков при воздействии постоянного тока, оказывается несколько больше напряжения переменного тока, так как в последнем случае имеют место диэлектрические потери, вызывающие дополнительный разогрев материала.

В толще твердых слоистых материалов могут оказаться воздушные включения, в которых при повышенном напряжении развивается ионизационный процесс, способствующий пробоем.

Задания:

Задание №1

Тангенс угла диэлектрических потерь изоляторного фарфора при 0°C составил 0,8%, а при температуре 83°C — 1,6%. Определить коэффициент возрастания потерь, если они изменяются по экспоненциальному закону.

Задание №2

Потери мощности в бакелитовой изоляции при температуре 50°C равны $6 \cdot 10^{-12}\text{ Вт/см} \cdot \text{В}^2$ а при температуре 90°C возросли до $30 \cdot 10^{-12}\text{ Вт/см} \cdot \text{В}^2$. Определить коэффициент возрастания потерь в диэлектрике

Задание №3

Определить пробивное напряжение изоляции одножильного кабеля с диаметром жилы 15,3 мм и толщиной изоляции 10 мм, если пробивная напряженность электрического поля для изоляции равна 300 кВ/см.

Задание №4

Определить пробивное напряжение для электрокартона толщиной 1,5 мм, если известно, что при испытании в условиях неравномерного поля образец толщиной 0,8 мм пробивается при напряжении 3,5 кВ.

Задание №5

Определить напряжение теплового пробоя для цилиндрического бакелитового изолятора, имеющего радиус токоведущего стержня 2,0 см и наружный радиус изоляции 3 см. Частота тока 50 Гц, относительная диэлектрическая проницаемость 4,5, тангенс угла диэлектрических потерь 0,04, коэффициент возрастания потерь 0,045, удельная теплопроводность бакелита $1,5 \cdot 10^{-3}$ Вт/см • град, коэффициент теплопередачи от электродов к воздуху 0,001 Вт/см²*град.

Контрольные вопросы:

1. Какое влияние оказывает влага на величину напряжения, при котором возникают скользящие разряды?
2. В справочных таблицах приводятся данные пробивной прочности изоляции при одноминутном испытании. Как объяснить указание на продолжительность испытания?
3. Почему величина напряжения теплового пробоя зависит от частоты и температуры диэлектрика?
4. Чем объясняется изменение коэффициента перед корнем в формулах теплового пробоя?
5. При каких условиях теплового баланса происходит переход от электрического пробоя к тепловому?
6. Почему в газовом и жидком диэлектриках после пробоя восстанавливаются изолирующие свойства, а в твердом нет?
7. Как будет меняться средняя пробивная напряженность электрического поля твердого диэлектрика при увеличении его толщины?

Практическая работа №8. Измерение высоких напряжений. Перенапряжения в электрических сетях. Атмосферные перенапряжения. Расчет заземляющих устройств.

Цель: Приобретение навыков расчета ЗУ.

Основы теории:

Безопасность обслуживающего персонала, нормальная работа аппаратов и защита высоковольтных установок от перенапряжений невозможна без создания заземляющих устройств.

В зависимости от назначения различают:

- а) рабочее заземление, к которому относят заземление нейтралей трансформаторов, дугогасящих катушек и аппаратов, определяющих общий режим работы электроустановки;
- б) заземление безопасности, к которому относят заземление кожухов приборов и аппаратов;
- в) грозозащитное заземление, к которому относят заземление тросов и стержневых молниеотводов, опор и разрядников.

Основу заземляющего устройства составляют заземлители, т. е. металлические элементы, находящиеся непосредственно в грунте, и заземляющие провода (спуски), доступные для осмотра.

Основными характеристиками заземляющего устройства являются сопротивление R_3 растеканию тока промышленной частоты и сопротивление R_3 и растеканию импульсных токов грозового разряда.

Величина нормированного сопротивления растеканию тока промышленной частоты находится в пределах 0,5—25 ом.

Исследования показывают, что характер распределения тока в почве зависит от его частоты, удельного сопротивления грунта, линейных размеров и взаимного расположения заземлителей.

При расчетах заземления используются формулы, определяющие величину сопротивления растеканию тока применительно к заданной форме заземлителя.

Электрический ток, растекаясь в почве в момент поражения установки грозовым разрядом или при пробое изоляции токоведущих частей, создает вдоль своего пути падение напряжения, которому соответствуют определенные потенциалы на поверхности земли. При этом точки поверхности, расположенные на расстоянии 20 м и более от заземлителя или места замыкания на землю, практически имеют нулевой потенциал.

Наивысшим или полным потенциалом U_n будут обладать все точки, имеющие металлическую связь с заземлителем.

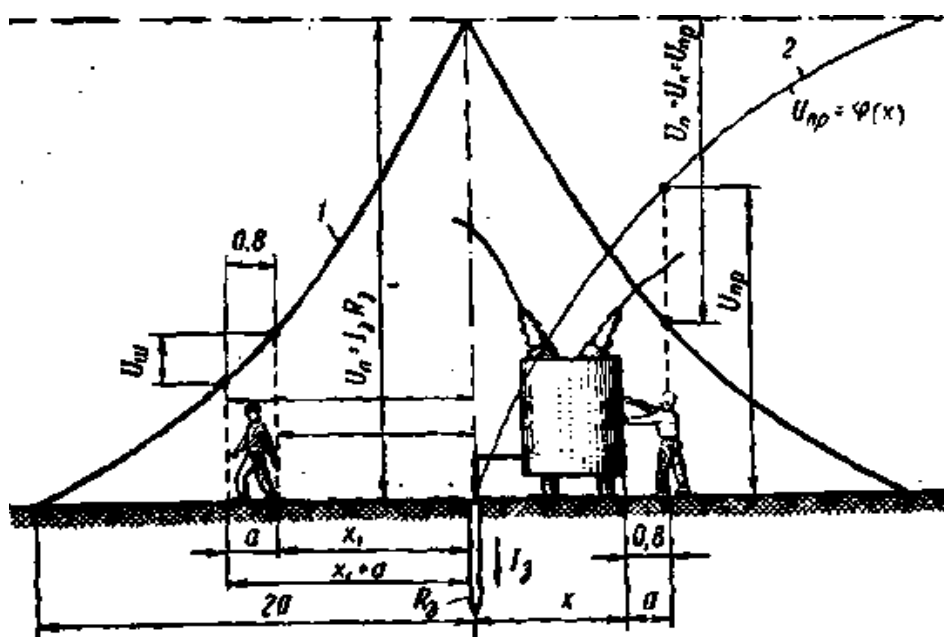


Рисунок 8.1 – Потенциальная характеристика (1) и напряжение прикосновения при одиночном стержневом заземлителе (2)

Отношение полного потенциала к величине тока, протекающего через заземлитель, определяет собой сопротивление растеканию тока данного заземления

$$R_z = \frac{U_n}{I_z}$$

где U_n — полный потенциал, кв,

I_z — ток-в заземлителе, ка.

На рис. 8.1 показано распределение потенциала на поверхности земли или потенциальная характеристика (1) для одиночного стержневого заземлителя.

Полный потенциал и характеристика распределения напряжения по радиусу от оси заземлителя определяют собой важные величины с точки зрения безопасности обслуживающего персонала:

1) шаговое напряжение U_n , под которым подразумевают ту наибольшую разность потенциалов, которую имеют ступни человека, оказавшиеся на расстоянии 0,8 м друг от друга по радиусу от центра заземлителя;

2) напряжение прикосновения U_{np} , т. е. наибольшее напряжение между поверхностью заземленного аппарата (к которому в момент разряда может прикасаться человек) и точками поверхности земли на расстоянии 0,8 м.

Расчет заземляющего устройства носит поверочный характер в том случае, когда схема заземления задана или носит чисто расчетный характер, когда по заданной величине нормированного сопротивления создается его схема.

Во всех случаях при расчете необходимой величиной является удельное сопротивление грунта ρ Ом·см, причем наиболее желательными являются результаты непосредственных измерений. Примерные величины удельных сопротивлений грунтов даны в П-14. Величины удельных сопротивлений подвержены сезонным изменениям, причем наибольшее влияние оказывают влажность, температура, степень промерзания, наличие солей.

Чем глубже расположен заземлитель, тем стабильнее оказывается сопротивление грунта и лучше условия для растекания тока, поэтому заземлители располагают так, чтобы верхняя кромка вертикальных заземлителей или уровень горизонтальных находились на глубине 0,5—1,0 м от поверхности, а ниже — от 3 до 20 м.

Чтобы исключить вероятность повышения удельного сопротивления, в расчетах используется удельное сопротивление, полученное непосредственным измерением $\rho_{\text{ном}}$ на данном участке, умноженное на коэффициент сезонности ψ , учитывающий возможность высыхания грунта:

$$\rho_{\text{расч}} = \rho_{\text{изм}} \psi$$

Приближенное значение коэффициента сезонности принимается 1,4—1,8 для горизонтальных заземлителей, уложенных на глубине 0,5 м, и 1,2—1,4 для вертикальных заземлителей длиной 2—3 м, причем, если во время измерения удельного сопротивления земля сухая, то принимается меньшее значение, а если почва влажная — большая величина.

Задания:

Задание №1

Стержневой трубчатый заземлитель диаметром 5 см и длиной 2 м забит в грунт, имеющий расчетное удельное сопротивление $1 \cdot 10^4$ Ом·см. Определить величину сопротивления растеканию токов в статическом режиме для случая, если заземлитель забит до уровня земли, и для случая его заглубления на 0,5 м.

Задание №2

Кольцевой заземлитель выполнен из троса диаметром 1 см и заглублен в грунт на 0,5 м. Расчетная величина удельного сопротивления грунта $2 \cdot 10^4$ Ом·см. Диаметр кольца 12 м. Определить сопротивление заземлителя без учета связей.

Задание №3

Металлическая опора высоковольтной линии рис. 8.2 имеет монолитный железобетонный фундамент, металлический каркас которого может быть принят за полусферу с радиусом 1 м. Расчетная величина удельного сопротивления грунта в месте заложения фундамента $0,5 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Определить сопротивление заземления, полный потенциал опоры и шаговое напряжение для стандартного шага 0,8 м, если ток разряда молнии, поражающего опору, 100 кА, а шаговое напряжение определяется между точками поверхности земли, удаленными на 2 и 2,8 м от центра заземлителя.

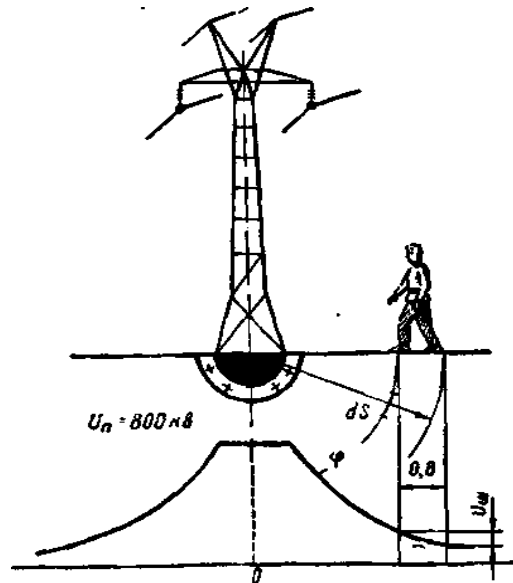


Рисунок 8.2

Контрольные вопросы:

1. Что называется шаговым напряжением и от каких параметров зависит его величина?
2. Что называется напряжением прикосновения и от каких параметров зависит его величина?
3. С помощью каких средств можно снизить величину напряжения прикосновения?
4. Для каких грунтов целесообразно применять протяженные горизонтальные заземлители?

Практическая работа №9. Распространение волн перенапряжений. квазистационарные и коммутационные перенапряжения. Защита от перенапряжений. Расчет сопротивления растеканию тока промышленной частоты.

Цель: Получение навыков расчета сопротивления растекания тока промышленной частоты.

Основы теории:

При конструировании заземляющих устройств, как правило, используются стандартные элементы: трубы, уголкового или полосового стали, стальные провода и тросы.

Для всех этих элементов выведены расчетные формулы сопротивления растеканию тока промышленной частоты, учитывающие линейные размеры элементов и глубину их заложения;

а) для трубы диаметром d или уголкового стали с шириной полки b и длиной l без заглубления в грунт верхней кромки

$$R_0 = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d}$$

б) для трубы или уголкового стали, заглубленных в грунт на глубину t от поверхности земли до середины элемента

$$R'_0 = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t+l}{4t-l} \right)$$

в) для троса диаметром d , заложеного в грунт на глубину t и имеющего вид протяженного заземлителя

$$R_{\tilde{0}} = \frac{2,3\rho}{2\pi l} \lg \frac{l^2}{dt}$$

г) для полосового стали или круглого провода в виде кольца с диаметром D и заглублением в грунт на t :

$$R_{\tilde{a.п}} = \frac{2,3\rho}{2\pi^2 D} \lg \frac{8\pi D^2}{dt};$$

$$R_{к.п.0} = \frac{2,3\rho}{2\pi^2 D} \lg \frac{4\pi D^2}{dt};$$

д) для полосового стали шириной b , заложеной в грунт на глубину t , при общей длине полосы l :

$$R_{\Pi} = \frac{2,3\rho}{2\pi l} \lg \frac{2l^2}{dt}$$

Примечание. Для стержневых заземлителей используются трубы или уголкового сталь длиной 2—3 м, с диаметром или шириной полки 35—70 мм, а для полосовых заземлителей — полосовая сталь толщиной не менее 4 мм и сечением не менее 100 мм³.

Величины сопротивлений растеканию тока промышленной частоты для стержневого и полосового заземлителей даны в П-15. и П-16.

Требования, предъявляемые к заземляющему устройству а отношении величины сопротивления (0,5—10 ом, см. П-17), в большинстве случаев не могут быть удовлетворены одиночным заземлителем.

Практически для получения приемлемых величин сопротивления создают сложный заземлитель, состоящий из n параллельно соединенных одиночных заземлителей. Можно было бы предположить, что общее сопротивление такого сложного заземлителя будет в n раз меньше сопротивления каждого элемента, что в случае их однотипности соответствовало бы формуле

$$R_{\text{сисò}} = \frac{R_3}{n}$$

На самом деле, при использовании сложного заземлителя поля растекания токов с отдельных электродов перекрывают друг друга и сопротивление всего заземлителя оказывается больше предполагаемого. Увеличение сопротивления сложных заземлителей учитывается коэффициентом использования η .

Значения коэффициентов использования зависят от конструктивного выполнения сложного заземлителя и для горизонтальных и вертикальных заземлителей приведены в приложениях П-18 и П-19.

Расчетная формула для сложного заземлителя из полосовых однотипных заземлителей с учетом взаимного экранирования имеет вид:

$$R_{\text{сисò}} = \frac{R_{\text{âп}}}{n\eta}$$

Для сложного заземлителя, состоящего из n вертикальных электродов и объединяющих их горизонтальных,

$$R_{\text{сисò}} = \frac{R_{\text{â}} \frac{R_{\text{г}}}{n}}{\frac{R_{\text{г}}}{n} + R_{\text{â}}} \cdot \frac{1}{\eta_{\Sigma}}$$

где η_{Σ} —принимается для конкретной схемы всего заземлителя (см. П-20).

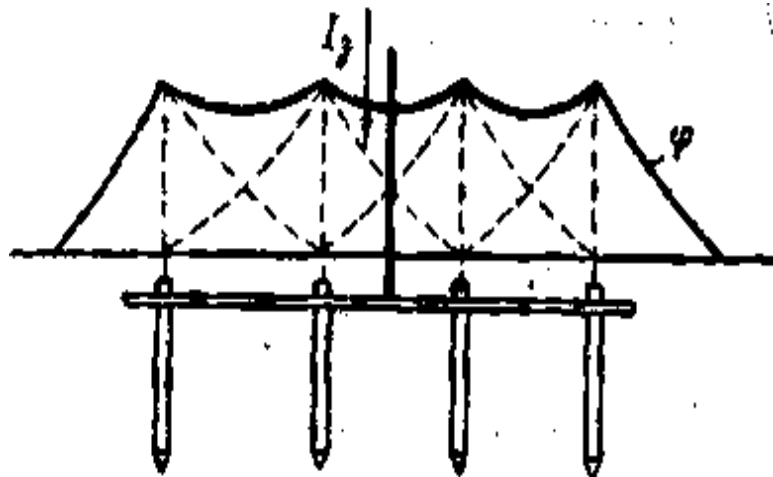


Рисунок 9.1 – Характер потенциальной кривой для сложного заземлителя

Не менее важным следствием использования сложных заземлителей в высоковольтных установках, кроме снижения общего сопротивления, является повышение потенциала на участках между электродами. Общее выравнивание потенциала (см. рис. 9.1) значительно снижает шаговое напряжение и напряжение прикосновения в зоне наиболее вероятного нахождения обслуживающего персонала.

Задания:

Задание №1

Горизонтальный двухлучевой заземлитель с подводом тока в среднюю точку и длиной каждого луча 10 м, проложен в грунте с удельным сопротивлением, измеренным в сухую погоду, $1 \cdot 10^4$ Ом·см. Определить сопротивление заземляющего устройства в импульсном режиме, если ток молнии принят равным 100 кА. Заземлитель выполнен из стального прута диаметром 1 см. Глубина заложения заземлителей стандартная, равная 0,5 м.

Задание №2

Кольцевой заземлитель, выполненный из полосовой стали шириной 4 см и толщиной 2,5 мм, имеет диаметр 4 м и заложен на глубине 0,5 м от поверхности. Расчетная величина удельного сопротивления грунта принята $2 \cdot 10^4$ Ом·см. Кольцо замкнуто и имеет три связи, расположенные под углом 120° . Определить сопротивление заземлителя, если ток грозового разряда, поступающий в точку соединения связей, принят 40 кА. Проводимостью связей пренебрегаем.

Задание №3

Полосовой заземлитель выполнен из троса диаметром 1 см и длиной 17,5 м. Определить сопротивление растеканию тока промышленной частоты, если удельное сопротивление грунта (расчетное) принято $1 \cdot 10^4$ Ом·см.

Контрольные вопросы:

1. Изложите последовательность расчета импульсного сопротивления заземления при протекании токов грозового разряда.
2. Можно ли с определенностью сказать, что сопротивление заземления в импульсном режиме меньше его сопротивления токам промышленной частоты?

5. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

5.1 Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины

5.1.2 Перечень основной литературы:

1. Бочаров Ю.Н. Техника высоких напряжений [Электронный ресурс] : учебное пособие / Ю.Н. Бочаров, С.М. Дудкин, В.В. Титков. — Электрон. текстовые данные. — СПб. : Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2013. — 265 с. — 978-5-7422-3998-7. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/43976.html>

5.1.3 Перечень дополнительной литературы:

1. Щеглов, Н. В. Современные виды изоляции. Часть 2. Изоляция высоковольтных вводов [Электронный ресурс] : учебное пособие / Н. В. Щеглов. — Электрон. текстовые данные. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2010. — 72 с. — 978-5-7782-1317-3. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/45161.html>

5.2 Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине

1. Методические указания по выполнению практических работ по дисциплине «Техника высоких напряжений».
2. Методические указания по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Техника высоких напряжений».
3. Методические указания по выполнению контрольной работы по дисциплине «Техника высоких напряжений».
4. Методические указания по организации и проведению самостоятельной работы по дисциплине «Техника высоких напряжений».

5.3 Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети Интернет, необходимых для освоения дисциплины

1. <http://www.biblioclub.ru> -ЭБС "Университетская библиотека онлайн"
2. <http://www.iprbookshop.ru/> - Электронно- библиотечная система IPRbooks

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Пятигорский институт (филиал) СКФУ

Методические указания
по выполнению контрольной работы
по дисциплине «ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ»
для студентов направления подготовки
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Пятигорск 2026 г.

Содержание

№ п/п		Стр.
	Введение	
1.	Цель, задачи и реализуемые компетенции дисциплины	
2.	Формулировка задания и ее объем	
3.	Общие требования к написанию и оформлению работы	
4.	Рекомендации по выполнению задания	
5.	План-график выполнения задания	
6.	Критерии оценивания работы	
7.	Порядок защиты работы	
8	Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины	
8.1	Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины	
8.2	Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине	
8.3	Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети Интернет, необходимых для освоения дисциплины	

Введение

Одним из основных видов занятий по курсу дисциплины «Техника высоких напряжений» является выполнение контрольной работы. Предлагаемые в методическом указании задания охватывают весь основной материал курса и соответствуют утвержденной программе.

1. Цель, задачи и реализуемые компетенции дисциплины

Основными целями дисциплины являются: формирование у студентов стройной и устойчивой системы знаний о фундаментальных закономерностях зажигания и развития электрических разрядов в диэлектрических средах, механизмах пробоя диэлектриков при воздействии сильных электрических полей, видах изоляции высоковольтного оборудования и методах контроля ее состояния, способах получения и измерения высоких напряжений, природе возникновения перенапряжений и способов защиты от них.

В результате освоения данной дисциплины обеспечивается достижение целей основной образовательной программы «Электроэнергетика и электротехника»; приобретенные знания, умения и навыки позволят подготовить выпускника:

– способного к расчету, анализу и проектированию электроэнергетических элементов, объектов и систем с использованием современных средств автоматизации проектных разработок;

– научно-исследовательской деятельности, в том числе в междисциплинарных областях, связанной с математическим моделированием процессов в электроэнергетических системах и объектах, проведением экспериментальных исследований и анализом их результатов;

– к самостоятельному обучению и освоению новых знаний и умений для реализации своей профессиональной карьеры.

При выполнении контрольной работы реализуются следующий перечень планируемых результатов обучения по дисциплине

Код, формулировка компетенции	Код, формулировка индикатора	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций, индикаторов
ПК-1 Способен участвовать в проектировании систем электроснабжения	ИД-ЗПК-1 Обосновывает выбор параметров электрооборудования систем электроснабжения, учитывая технические ограничения	Знает основные физические явления, механизмы воздействия электромагнитных полей высокого напряжения на изоляцию в различных условиях эксплуатации. Умеет обосновывать выбор параметров электрооборудования систем электроснабжения объектов, учитывая технические ограничения и условия эксплуатации.

		Владет навыками выбора параметров электрооборудования систем электропитания объектов, учитывая технические ограничения и условия эксплуатации.
--	--	--

2. Формулировка задания и ее объем

Задание №1

Высоковольтная линия электропередач (ВЛ) с номинальным напряжением U и волновым сопротивлением $Z_{\text{пр}} = 300$ Ом расположена в зоне грозовой деятельности.

Импульсная прочность изоляции ВЛ равна $U_{\text{и}}$, высота металлической опоры и высота подвеса провода равна h , стрела провеса провода равна f , индуктивность единицы длины опоры $L_0 = 0,5 \cdot 10^{-6}$ Гн/м, импульсное сопротивление заземления опоры $R_3 = 10$ Ом.

Требуется определить величину перенапряжения на ВЛ, кратность перенапряжения и вероятность перекрытия изоляции во время разряда молнии с амплитудой I_m и длительностью нарастания (фронта) косоугольной волны тока равной $\tau_{\text{ф}} = 10^{-6}$ с:

- при ударе молнии в опору;
- при ударе молнии в провод;
- при ударе молнии на расстоянии «а» от ВЛ.

Значения всех переменных параметров для соответствующих вариантов приведены в табл. 1.1 и 1.2.

Таблица 1.1 – Исходные данные к расчету задачи №1

Показатели	Вариант (предпоследняя цифра шифра)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Напряжение линии, U , кВ	10	35	110	35	10	110	10	35	110	10
Импульсная прочность изоляции линии $U_{\text{и}}$, кВ	120	3501	650	350	120	650	120	350	650	120
Высота подвеса провода h , м	10	12	16	14	11	18	10	15	18	11
Стрела провеса провода f , м	1,5	2	3	2,5	2	4	1,8	3,5	4,5	1,8
Амплитуда тока молнии I_m , кА	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Расстояние от места удара молнии до ВЛ «а», м	5	7,5	10	12	13	14	15	18	19	20

Задание №2

Для защиты объекта с шириной «а», длиной «в» и высотой «h» от прямых ударов молнии с амплитудой I_m и временем нарастания фронта $t_f=10-6$ с установлен одиночный молниеотвод. Глубина нижнего конца фундамента молниеотвода от поверхности земли $h_{\phi}=3,2$ м, ширина фундамента $a_{\phi}=0,8$ м, удельное сопротивление земли ρ , Ом·м. Схема расположения молниеотвода и защищаемого объекта приведена на рис. 2.1.

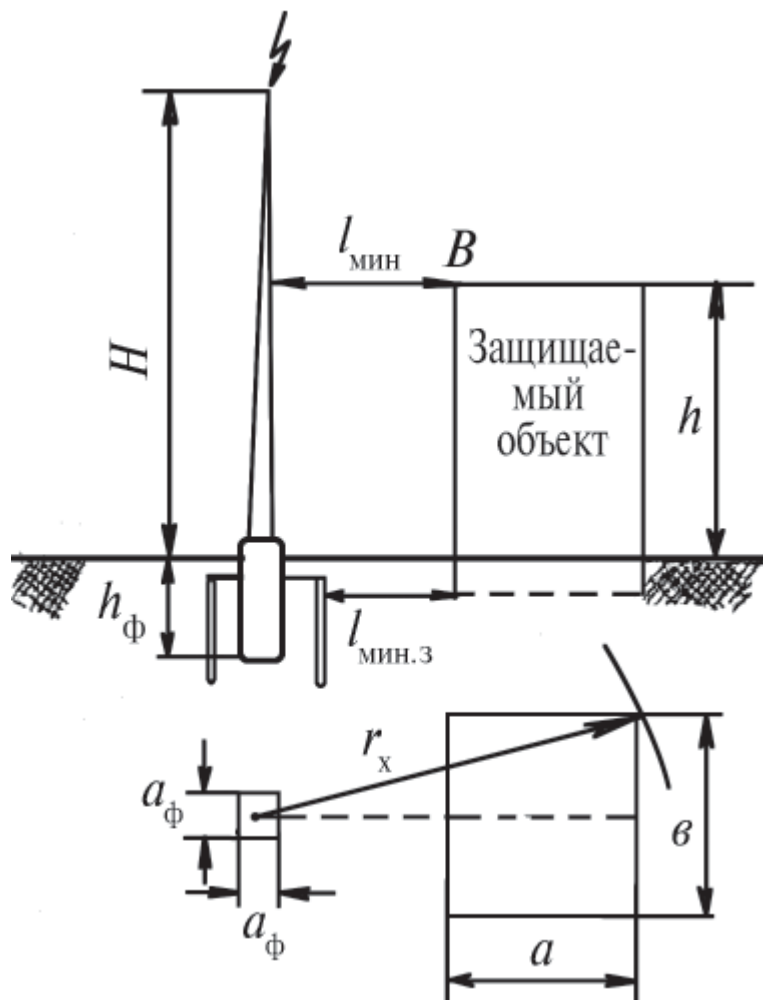


Рисунок 2 – Схема расположения молниеотвода и защищаемого объекта

1. Рассчитать устройство заземления молниеотвода, состоящее из естественного заземлителя (фундамента молниеотвода) и искусственного заземлителя из условий, что допустимое импульсное сопротивление устройства заземления R_z не должно превышать 10 Ом. Начертить эскиз контура заземления совместно с защищаемым объектом.

2. Рассчитать минимально допустимые расстояния от молниеотвода до защищаемого объекта, радиус зоны защиты r_x на высоте объекта h и высоту молниеотвода H . На эскизе показать сечение зоны защиты стержневого молниеотвода. Значения соответствующих переменных параметров для различных вариантов задания приведены в табл. 2.

3. В расчетно-пояснительной записке привести условие задачи исходные данные выбранного варианта. Нарисовать схему расположения молниеотвода и защищаемого объекта.

4. Рассчитать импульсное сопротивление фундамента молниеотвода. Импульсный коэффициент для сопротивления фундамента вне зависимости от сопротивления грунта принять $\delta_{\text{иф}} = 0,8$, а глубина нижнего конца фундамента $t = h_{\text{ф}}$.

5. Рассчитать необходимое импульсное сопротивление искусственного заземлителя.

6. Рассчитать импульсное сопротивление, состоящее из двух горизонтальных полос и по неравенству сделать вывод о достаточности этого сопротивления.

7. Если неравенство не выполняется, изменяя количество или длину труб продолжить расчет импульсного сопротивления искусственного заземлителя до тех пор, пока не будет выполняться неравенство (2.9).

8. Рассчитать минимально допустимые расстояния от молниеотвода до защищаемого объекта радиус зоны защиты r_x на высоте объекта h по формуле и высоту молниеотвода H по формуле. При расчете по формуле принять, что $L_0 = 1 \cdot 10^{-6}$ Гн/м, $\alpha_{\text{ср}}$ вычислить.

9. Начертить эскиз контура заземления совместно с защищаемым объектом.

10. На эскизе показать сечение зоны защиты стержневого молниеотвода и взаимное расположение защищаемого объекта и искусственных заземлителей.

Таблица 2 – Исходные данные для расчета задачи №2

Показатели	Вариант (предпоследняя цифра шифра)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Амплитуда тока молнии $I_m, \text{кА}$	5,0	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Удельное сопротивление грунта $\rho, \text{Ом}\cdot\text{м}$	100	200	500	200	100	200	500	200	100	500
Ширина объекта $a, \text{м}$	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,2	4,4	4,6	4,8
Длина объекта $b, \text{м}$	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0
Высота объекта $h, \text{м}$	12	11	10	9,5	9,0	10,5	12,5	11,5	8,5	8,0

Задание №3

Определить число изоляторов в поддерживающей гирлянде промежуточной опоры по удельной нормированной длине пути утечки. ЛЭП проходит на высоте менее 1000 м над уровнем моря, остальные необходимые данные и варианты заданий приведены в табл.3

Таблица 3 – Исходные данные для расчета задачи №3

Показатели	Вариант (предпоследняя цифра шифра)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Номинальное напряжение линии, кВ	110	220	330	500	750	110	220	330	500	750
Тип опоры	ж/б	ж/б	ж/б	мет	мет	ж/б	ж/б	ж/б	мет	мет
Степень загрязнения атмосферы	1	2	3	4	4	4	3	2	1	2
Тип изолятора	ПС70Е	ПС120Б	ПС160Д	ПС210В	ПС300В	ПС70Е	ПС70Е	ПС120Б	ПС160Д	ПС160Д
Диаметр тарелки D, мм	255	255	280	300	320	255	255	255	280	280
Строительная высота H, мм	127	146	170	195	195	146	146	146	170	170
Длина пути утечки L_{II} , мм	303	320	370	370	390	303	320	370	370	390

Задание №4

Внутренняя изоляция высоковольтного оборудования состоит из двух слоев, имеющих в установившемся режиме соответственно сопротивление утечки R_1 , R_2 и емкости слоев C_1 и C_2 .

Требуется по характеру изменения тока абсорбции и значению сопротивления изоляции в исходном состоянии изоляции и при уменьшении сопротивления первого слоя в 100 раз ($0,01R_1$) дать заключение о качестве изоляции и определить допустимость степени увлажнения.

Тангенс угла диэлектрических потерь при температуре $T_0 = 20^\circ\text{C}$ равен — $\text{tg}\delta_0$; коэффициент, характеризующий температурную зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от температуры, равен — α .

Требуется рассчитать и построить графики зависимости тангенса диэлектрических потерь и мощности потерь в диэлектрике при изменении температуры от 20°C до 100°C и приложении переменного напряжения $U = 10$ кВ с частотой 50 Гц. Значения всех переменных параметров для соответствующих вариантов приведены в табл. 4.

Таблица 4 – Исходные данные для расчета задачи №4

Показатели	Вариант (предпоследняя цифра шифра)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R_1, 10^6, \text{Ом}$	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190
$C_1, 10^{-6}, \text{Ф}$	3,6	3,4	3,2	3,0	2,8	2,6	2,4	2,2	2,0	1,8
$R_2, 10^6, \text{Ом}$	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
$C_2, 10^{-6}, \text{Ф}$	36	34	30	32	28	26	24	22	20	18
$\text{tg}\delta_0, 10^{-3}$	4,0	3,8	3,6	3,4	3,2	3,0	2,8	2,6	2,4	2,2
$\alpha, 10^{-3}, ^\circ\text{C}^{-1}$	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

3. Общие требования к написанию и оформлению работы

Основные требования к работе

При выполнении и оформлении контрольной по ГОСТу надо учитывать общие требования, которые предъявляются к работе:

- студент должен придерживаться заданной тематики;
- запрещено менять тему самостоятельно без обращения к преподавателю;
- при оформлении работы нужно учитывать нормы и ГОСТы;
- контрольная выполняется на основании не менее семи источников, выбранных автором;
- работа должна быть авторской, в ней должны содержаться собственные выводы студента;
- текст контрольной должен иметь объем не менее 7 листов.

Оформление по ГОСТу текста контрольной

Когда работа выполнена, ее необходимо привести в соответствующий вид согласно ГОСТам:

- контрольную набирают в Word или другом текстовом редакторе с аналогичным функционалом;
- при наборе нужно использовать шрифт Times New Roman;
- интервал между строк — полуторный;
- размер шрифта — 14;
- текст выравнивается по ширине;
- в тексте делают красные строки с отступом в 12,5 мм;
- нижнее и верхнее поля страницы должны иметь отступ в 20 мм;
- слева отступ составляет 30 мм, справа — 15 мм;
- контрольная всегда нумеруется с первого листа, но на титульном листе номер не ставят;
- номер страницы в работе всегда выставляется в верхнем правом углу;
- заголовки работы оформляются жирным шрифтом;
- в конце заголовков точка не предусмотрена;
- заголовки набираются прописными буквами;
- все пункты и разделы в работе должны быть пронумерованы арабскими цифрами;
- названия разделов размещаются посередине строки, подразделы — с левого края;
- работа распечатывается в принтере на листах А4;

– текст должен располагаться только на одной стороне листа.

Работа имеет такую структуру:

1. Титульный лист;
2. Оглавление и введение;
3. Основной текст и расчет контрольной;
4. Заключительная часть работы;
5. Перечень использованной литературы и источников;
6. Дополнения и приложения.

Если в работе есть приложения, о них надо упоминать в оглавлении.

Ссылки нумеруются арабскими цифрами, при этом учитывают структуру работы (разделы и подразделы).

4. Рекомендации по выполнению задания

Указание к решению задачи №1

Молния представляет собой электрический разряд между облаком и землей или между облаками.

На начальной стадии, называемой лидерной, канал разряда молнии развивается ступенчато. Ступени следуют друг за другом с интервалом $30 \div 50$ мкс. Во время каждой ступени канал удлиняется на $5 \div 100$ м. Канал лидера окружен обширной зоной ионизации. Зона ионизации лидера имеет избыточный заряд того же знака, что и облако. Заряды облака и лидера индуктируют на поверхности земли и на расположенных на ней объектах заряды другого знака.

Когда канал лидера соединяется с землей или объектом, расположенным на земле, начинается главная стадия разряда. Во время этой стадии происходит нейтрализация зарядов, образовавшихся во время развития лидера. Процесс распространяется в направлении от земли к облаку со скоростью достигающей половины скорости распространения света и сопровождается сильным свечением канала молнии. Канал разряда, разогретый за очень короткое время до температуры $(20 \div 30)10^3$ °K, быстро расширяется, что вызывает распространение в окружающем воздухе ударной волны, вырождающейся в звуковую и воспринимаемой как гром.

Ток в канале молнии за несколько микросекунд достигает амплитуды $2 \div 250$ кА, а затем за время $25 \div 150$ мкс спадает до половины максимального значения.

Более подробные сведения о механизме развития молнии и молниезащиты можно найти в рекомендованной литературе [1; 2; 3; 4].

При расчетах перенапряжений и молниезащиты принимается во внимание, что волновое сопротивление канала молнии составляет более 1000 Ом и влияние сопротивлений заземлений с $R_z \leq 50$ Ом на амплитуду молнии можно не учитывать, т.е. рассматривать молнию как источник тока.

С точки зрения воздействия на изоляцию ВЛ кроме амплитуды тока молнии I_m важное значение имеет крутизна фронта тока молнии, поскольку она определяет индуктивное падение напряжения в проводниках и индуктированные напряжения в магнитно-связанных цепях.

При расчетах перенапряжений для удобства используют среднюю крутизну:

$$\alpha_{\text{ср}} = \frac{I_m}{\tau_{\text{ф}}}$$

где $\tau_{\text{ф}}$ — длительность нарастания (фронта) тока главного разряда

молнии.

Величина перенапряжения на вершине опоры при прямом ударе молнии в опору равна сумме падений напряжения на импульсном сопротивлении заземления и индуктивности опоры:

$$U_{\text{оп}} = R_3 I_{\text{м}} + L_0 h \alpha_{\text{ср}}$$

где R_3 – импульсное сопротивление опоры;

$I_{\text{м}}$ – амплитуда тока молнии;

L_0 – удельная индуктивность опоры;

h – высота опоры.

Под таким же напряжением окажется и изоляция проводов линии электропередачи.

При ударе молнии в провод линии электропередач ток молнии растекается по пораженному проводу в обе стороны, поэтому амплитуда волны перенапряжения на проводах определяется по формуле:

$$U_{\text{пр}} = \frac{I_{\text{м}} * Z_{\text{пр}}}{2}$$

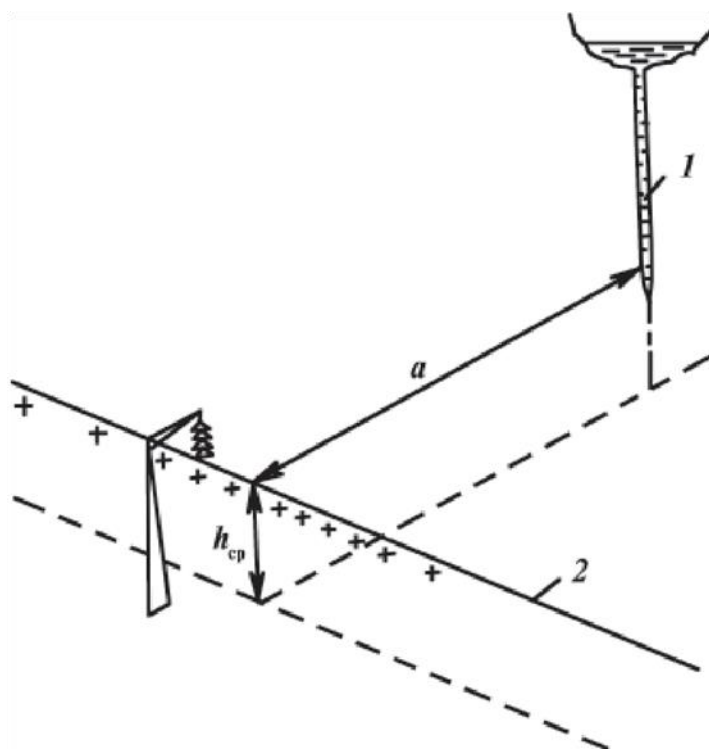


Рисунок 1 – Схема расположения ВЛЭП

Рассмотрим в упрощенной форме, как возникает электрическая составляющая индуктированного перенапряжения (рис. 1). При развитии лидерного канала молнии 1 вблизи ВЛ заряды канала молнии связывают (наводят) на проводах 2 заряды противоположного

знака (явление электрической индукции). Во время главного разряда, т.е. когда молния достигает земли, заряды лидера молнии нейтрализуются, при рис. 1 К объявлению образования этом связанные на проводе индуктированных перенапряжений:

Заряды освобождаются, что 1 — упрощенный вид канала лидера молнии; 2 — условный вид проводов

Сопровождается повыше- линии электропередач; (–) — заряды в нем потенциала провода канале лидера отрицательной полярности; и образованием импульса (+) — наведенные заряды положительной полярности на проводах напряжения, распространяющегося по проводу в обе стороны.

Максимальное значения $U_{из}$ прямо пропорционально амплитуде тока и средней высоте подвеса провода (h_{cp}) и обратно пропорционально кратчайшему расстоянию « a » от провода до точки удара молнии.

$$U_{из} = \frac{k_{э} * I_{м} * h_{cp}}{a}$$

где $k_{э}$ — коэффициент пропорциональности, имеющий размерность сопротивления и уменьшающийся при возрастании скорости главного разряда молнии.

Средняя высота подвеса провода на опорах ВЛ определяется по формуле:

$$h_{cp} = \frac{h - 2f}{3},$$

где h — высота подвеса провода на опорах ВЛ;

f — стрела провеса провода.

Изменение магнитного поля при главном разряде приводит к возникновению магнитной составляющей индуктированного напряжения в петле «опора-гирлянда изоляторов — провод-земля».

Максимальное значение $U_{им}$ также прямо пропорционально амплитуде тока и средней высоте подвеса провода, и обратно пропорционально кратчайшему расстоянию « a » от провода до точки удара молнии, но имеет свой коэффициент пропорциональности $k_{м}$.

$$U_{им} = \frac{k_{м} * I_{м} * h_{cp}}{a},$$

где $k_{м}$ — коэффициент пропорциональности, имеющий размерность сопротивления и увеличивающийся при возрастании скорости главного разряда молнии.

Максимальное значение индуктированного напряжения равно:

$$U_{инд} = U_{из} + U_{им} = \frac{30h_{cp}I_{м}}{a},$$

Значения перенапряжений, полученных по формулам (1.2), (1.3), (1.7) оценочные, поскольку не учитывают многие факторы, влияющие на величину перенапряжения. Например, не учитывается, что индуцированные перенапряжения возникают также и при ударах молнии в провода (тросы) и опоры и, накладываясь на перенапряжения прямого удара, увеличивают разность потенциалов на изоляции, что второе слагаемое в формуле (1.2) имеет существенное значение только в пределах фронта тока молнии.

Учет этих и других факторов значительно усложнил бы расчет перенапряжений.

Кратность перенапряжения изоляции линии определяется как отношение величины перенапряжения к амплитудному значению фазного напряжения линии:

$$\frac{U_{\pi}}{U_{\phi}} = \frac{U_{\pi}\sqrt{3}}{U\sqrt{2}}$$

где U_{π} - максимальное значение перенапряжения в зависимости от места удара молнии;

U - действующее (эффективное) значение номинального (междуфазного) напряжения ВЛ.

Для оценки вероятности перекрытия изоляции необходимо сравнивать рассчитанные значения перенапряжения ($U_{оп}$), ($U_{пр}$), ($U_{инд}$) с заданной импульсной прочностью изоляции ($U_{и}$). Перекрытие изоляции произойдет если:

$$U_{оп} = R_3 I_{\text{м}} + L_0 h \alpha_{\text{ср}} \geq U_{и},$$

$$U_{пр} = \frac{I_{\text{м}} * Z_{\text{пр}}}{2} \geq U_{и},$$

$$U_{инд} = \frac{30 h_{\text{ср}} I_{\text{м}}}{a} \geq U_{и}.$$

Как видим, перекрытие изоляции определяется амплитудой тока молнии и местом удара молнии.

Минимальная амплитуда молнии I_3 , при которой происходит перекрытие изоляции, при ударе молнии:

- В опору - $P_{\text{пер.оп}} = P(I_3) = \exp\left(-0.04 \frac{U_{и}}{R_3}\right)$
- В провод - $P_{\text{пер.пр}} = P(I_3) = \exp\left(-0.04 \frac{U_{и}}{\left(\frac{Z_{\text{пр}}}{2}\right)}\right)$
- На расстоянии « a » - $P_{\text{пер.инд}} = P(I_3) = \exp\left(-0.04 \frac{a * U_{и}}{30 h_{\text{ср}}}\right)$

Указание к решению задачи №2

Защита от прямых ударов молнии осуществляется с помощью молниеотводов.

Молниеотвод представляет собой возвышающееся над защищаемым объектом устройство, через которое ток молнии, минуя защищаемый объект, отводится в землю. Молниеотвод состоит из молниеприемника, непосредственно воспринимающего на себя удар молнии, токоотвода и заземлителя.

Молниеотводы по типу молниеприемника разделяются на стержневые и тросовые. Стержневые молниеотводы выполняются в виде вертикально установленных стержней (мачт), соединенных с заземлителем.

Токоотводом служат металлические или железобетонные опоры или стальные провода сечением не менее 50 мм^2 , активное сопротивление которых составляет доли ома, а индуктивность зависит прежде всего от его длины. Удельная индуктивность токоотводов L_o зависит от конструкции молниеотвода и изменяется в диапазоне $(0,4 \div 1,7)10^{-6} \text{ Гн/м}$.

Заземлители делятся на естественные и искусственные. В качестве естественных заземлителей стержневых молниеотводов используются их железобетонные фундаменты. Для искусственных заземлителей используются вертикальные и горизонтальные электроды (заземлители). Для горизонтальных заземлителей используется стальная или медная полоса с площадью поперечного сечения более 100 мм^2 для стали и 50 мм^2 для меди или многопроволочный медный канат с поперечным сечением не менее 35 мм^2 . В качестве вертикальных заземлителей применяются стальные трубы, стержни и профильная сталь.

Заземлитель характеризуется значением сопротивления, которое окружающая земля оказывает стекающему с него току. Сопротивление заземлителя зависит от его геометрических размеров и удельного сопротивления грунта ρ , в котором он находится.

Для приближенного расчета сопротивления заземления одиночного стержневого молниеотвода или линейной опоры используются следующие формулы:

- Сопротивление железобетонного фундамента

$$R_{\phi} = 1,7 * \left(\frac{\rho}{2\pi t} \right) \ln \left(\frac{4t}{b} \right), \text{ где } t = h_{\phi}$$

- Сопротивление горизонтальной полосы

$$R_{\text{пи}} = \frac{\left[\left(\frac{\rho}{\pi l} \right) \ln \left(\frac{1,5l}{\sqrt{bt}} \right) \right] \delta_{\text{и}}}{\eta_{\text{и}} * n}$$

- Сопротивление вертикальной трубы или стержня

$$R_{\text{ТР}} = \left(\frac{\rho}{2\pi l} \right) \cdot \ln \cdot \left(\frac{4l(2t + l)}{d(4t + l)} \right)$$

где l – длина трубы или полосы;

t – глубина залегания полосы, верхнего конца вертикального электрода или нижнего конца фундамента;

b — ширина полосы или фундамента;

d — диаметр трубы или стержня.

Рассчитанные по формулам сопротивления заземлителей называют стационарными.

При прохождении через заземлитель импульса тока молнии сопротивление заземлителя отличается от рассчитанного по формулам, так как при этом вокруг заземлителя образуются зоны искрения, которые как бы увеличивают размеры электродов. С другой стороны, быстрое нарастание импульсного тока создает падение напряжения на индуктивности протяженного заземлителя, что ограничивает отвод тока с удаленных его частей.

Влияния этих и ряда других факторов учитывается импульсным коэффициентом $\delta_{\text{и}}$.

Если заземлитель состоит из n труб или полос, то его импульсное сопротивление равно

$$R_{\text{фи}} = \frac{\delta_{\text{и}} * R_{\text{ф}}}{\eta_{\text{и}} * n},$$

где $\eta_{\text{и}}$ –импульсный коэффициент использования заземлителя, учитывающий ухудшение условий растекания тока молнии вследствие взаимного экранирования электродов.

Импульсные коэффициенты даже для конкретного расположения и размеров электродов не являются величиной постоянной и зависят от амплитуды тока, удельного сопротивления и пробивной напряженности грунта.

Усредненные значения $\delta_{\text{и}}$ и $\eta_{\text{и}}$ для некоторых конструкций заземлителей приведены в табл. 1.

Расчет сопротивления заземлителя начинается с определения сопротивления железобетонного фундамента по формулам

Поскольку импульсное сопротивление фундамента, как правило, больше допустимого значения заземлителя ($R_3 = 10$ Ом), то возникает необходимость сооружения дополнительного (искусственного) заземлителя. Параллельное соединение сопротивления фундамента и искусственного заземлителя не должно превышать 10 Ом. Поэтому импульсное сопротивление искусственного заземлителя вычисляется по следующей формуле

$$R_{\text{ии}} = \frac{R_3 R_{\text{фи}}}{R_{\text{фи}} - R_3}$$

Таблица 1

Заземлитель	$\eta_{\text{и}}$	$\delta_{\text{и}}$ при удельном сопротивлении ρ , Ом·м		
		100 (глина, чер- нозем)	200 (суглинок)	500 (супесок)
Вертикальные стержни, соединенные полосой (расстояние между стержнями вдвое больше их длины) в количестве:	0,75			
2 – 4		0,5	0,45	0,3
8		0,7	0,55	0,4
15		0,8	0,7	0,55
Две горизонтальные полосы длиной по 5 м, расходящиеся в противоположные стороны от точки присоединения токоотвода	1,5	0,65	0,55	0,45

В качестве искусственного заземлителя в грунте с удельным сопротивлением $\rho = (100 \div 200)$ Ом·м следует выбрать наиболее простой искусственный заземлитель, состоящий из двух горизонтальных полос шириной 0,04 м и длиной по 5÷10 м, симметрично расходящихся от точки присоединения токоотвода и расположенных на глубине 0,5 м.

Импульсное сопротивление такого заземлителя вычисляется по формулам и равно

$$R_{\text{пи}} = \frac{\left[\left(\frac{\rho}{\pi l} \right) \ln \left(\frac{1,5l}{\sqrt{bt}} \right) \right] \delta_{\text{и}}}{\eta_{\text{и}} * n}$$

Значения коэффициентов $\delta_{\text{и}}$, $\eta_{\text{и}}$ выбирается по таблице 1.

Если импульсное сопротивление искусственного заземлителя в виде полос:

$$R_{\text{пи}} \leq R_{\text{ии}}$$

то общее импульсное сопротивление заземлителя

$$R_{\text{зи}} = \frac{R_{\text{фи}} \cdot R_{\text{пи}}}{R_{\text{фи}} + R_{\text{пи}}} \leq R_3 = 10 \text{ Ом}$$

Если неравенство не выполняется, то необходимо уменьшить импульсное сопротивление искусственного заземлителя. Для этого следует к горизонтальным полосам присоединить (с помощью сварки) вертикальные стержни в виде труб длиной 2÷3 м с диаметром 0,05 см. Трубы к полосам присоединять на расстоянии вдвое больше их длины.

Импульсное сопротивление вертикальных труб равно

$$R_{ТРИ} = \frac{\left(\frac{\rho}{2\pi l} \right) \ln \left(\frac{4l(2t+l)}{d(4t+l)} \right) \cdot \delta_{II}}{\eta_{II} \cdot n}$$

Значения коэффициентов δ_{II} , η_{II} выбирается по табл. 1. Изменяя количество или длину труб необходимо добиться, чтобы параллельное соединение $R_{ПИ}$ и $R_{ТРИ}$ было меньше или равно $R_{ПИ}$. Тогда

$$R_{ЗИ} = \frac{R_{ФИ} \cdot R_{ПИ} \cdot R_{ТРИ}}{(R_{ФИ} R_{ПИ} + R_{ФИ} R_{ТРИ} + R_{ТРИ} R_{ПИ})} \leq R_3 = 10 \text{ Ом}$$

Расчет импульсного сопротивления заземлителя по приведенной методике дает оценочный результат.

Но надо отметить, что сопротивление грунта величина переменная не только по глубине расположения элементов заземлителя, но оно изменяется в течение сезона грозовой деятельности в разной степени в разных районах страны.

При измерениях удельного сопротивления грунта вводят так называемый сезонный коэффициент, который может изменяться от 1,4 до 2,6. Поэтому точные расчеты импульсных сопротивлений заземлителей на практике применяются редко.

Пространство вблизи молниеотвода, защищенное от попаданий молнии, называется его зоной защиты.

Зоны защиты молниеотводов установлены на основе лабораторных испытаний, и надежность их подтверждена многолетним опытом эксплуатации. Зона защиты одиночного стержневого молниеотвода высотой $H \leq 30$ м представляет собой круговой конус с вершиной на высоте $0,9H$, сечение которого на высоте h_x имеет радиус r_x .

Для объектов высотой $h_x \leq 20$ м радиус r_x вычисляется по формуле

$$r_x = 1,5 \left(H - \frac{h_x}{0,92} \right)$$

При прохождении тока по молниеотводу создается падение напряжения на сопротивлении заземлителя R_3 и на индуктивности токоотвода. При средней крутизне фронта тока молнии

$$\alpha_{cp} = \frac{I_M}{\tau_\phi}$$

Максимальный потенциал в точке молниеотвода на расстоянии $h_x = h$ от заземлителя, т.е. на высоте защищаемого объекта, наступает в момент максимума тока молнии

$$U_{hx} = R_3 I_M + L_o h \cdot \alpha_{cp}$$

где L_o — индуктивность единицы длины молниеотвода, зависящая от конструкции токоотвода.

Защищаемый объект должен полностью входить в зону защиты молниеотводов. Вместе с тем он должен располагаться на определенном расстоянии от них. Если это расстояние меньше допустимого, то при ударах молнии могут происходить перекрытия с частей молниеотвода на защищаемый объект. При установке отдельно стоящего стержневого молниеотвода должно соблюдаться безопасное расстояние по воздуху и в земле от молниеотвода и его заземлителей до элементов защищаемого объекта.

Минимально допустимое расстояние по воздуху $l_{мин.в}$ от молниеотвода до защищаемого объекта рассчитывается с учетом допустимой напряженности электрического поля $E = 500 \text{ кВ/м}$, но не меньше 5 м.

$$l_{мин.в} = \frac{R_3 I_M + L_o h \cdot \alpha_{cp}}{500} \geq 5 \text{ м}$$

Максимальный потенциал в точке молниеотвода на уровне земли наступает также в момент максимума тока молнии и равен

$$U_3 = R_3 I_M$$

Минимальное расстояние в земле $l_{мин.з}$ между заземлителем и ближайшей к нему точкой заземления защищаемого объекта рассчитывается с учетом допустимой напряженности электрического поля в земле $E = 300 \text{ кВ/м}$, но не меньше 3 м.

$$l_{мин.з} = \frac{R_3 I_M}{300} \geq 3 \text{ м}$$

Радиус защищаемой зоны молниеотвода на высоте защищаемого объекта h определяется, используя теорему Пифагора

$$r_x = \sqrt{(l_{мин.в} + a)^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2}$$

Зная радиус защищаемой зоны и высоту защищаемого объекта, высоту молниеотвода H определяют из соотношения

$$H = \left(\frac{r_x}{1,5} \right) + 1,09h$$

В электроэнергетике часто принимают расчетные значения тока молнии и средней крутизны его фронта, соответственно, 60 кА и 30 кА/мкс, а индуктивность единицы длины токоотвода $L_0 = 1,7$ мкГн/м.

$$I_{\text{мин.д}} = 0,12R_3 + 0,1h$$

$$I_{\text{мин.з}} = 0,2R_3$$

Отметим, что на практике иногда приходится по известным $I_{\text{мин.з}}$, $I_{\text{мин.в}}$ и h находить по вышеприведенным формулам величину сопротивления заземления, обеспечивающую безопасность сближения молниеотвода и защищаемого объекта.

Указание к решению задачи №3

Решить согласно ПУЭ.

Указание к решению задачи №4

В процессе эксплуатации высоковольтного оборудования из-за перегрева, увлажнения, механических повреждений и пере напряжений происходит общее старение изоляции. В изоляции возникают распределенные и местные (сосредоточенные) дефекты. Постепенно развиваясь, эти дефекты способны настолько снизить пробивное или разрядное напряжение, что изоляция может не выдержать перенапряжений, время от времени появляющихся в электрических системах, или даже рабочего напряжения.

В большинстве случаев эти дефекты не могут быть обнаружены путем простого осмотра изоляции и для их выявления необходимы специальные методы испытаний, которые называются профилактическими.

Группа профилактических методов контроля изоляции, при которых используются по сравнению с рабочими малые напряжения и различные косвенные способы оценки характеристик изоляции называется неразрушающие испытания. Другую группу испытаний с использованием напряжения, повышенного по сравнению с рабочим и вызывающего ускоренное разрушение изоляции в дефектном месте, называют разрушающими испытаниями.

Для каждого вида изоляции характерны определенные виды дефектов и применяются различные методы профилактических испытаний. Периодичность и нормы испытаний

устанавливаются стандартами и ведомственными инструкциями для каждого вида электрооборудования.

Согласно существующим представлениям основной причиной старения внутренней изоляции при воздействии сильны электрических полей являются так называемые частичные разряды (ЧР). ЧР возникают в газовых включениях или прослойках жидкого диэлектрика. Скорость разрушения изоляции зависит от интенсивности ЧР. Регистрация интенсивности ЧР во время эксплуатации высоковольтного оборудования и в лабораторных условиях проводится с помощью электрических, оптических и ультразвуковых методов.

Проникновение в изоляцию из окружающей среды влаги, различных примесей и кислорода значительно ускоряют процессы старения изоляции.

При неразрушающих методах испытаний для оценки качества изоляции используются измерения характера изменения характеристик диэлектриков во времени, от частоты испытательного напряжения и от температуры.

В качестве внутренней изоляции высоковольтного оборудования очень часто применяются комбинации диэлектриков, сочетание которых позволяет получить наиболее благоприятные свойства изоляционной конструкции. В частности, очень большое распространение получила слоистая изоляция, в состав которой входят пропитанные маслами волокнистые материалы типа бумаги (кабели, конденсаторы, трансформаторы и др.).

Ухудшение качества слоистой изоляции в большинстве случаев происходит путем более или менее однородного изменения свойств одного из слоев, тогда как характеристика других слоев остаются практически неизменными. Это приводит к изменению неоднородности изоляции. По характеру этого изменения можно судить о состоянии изоляции.

В простейшем случае неоднородная изоляция состоит из двух слоев, каждый из которых характеризуется своей удельной проводимостью слоев γ и диэлектрической проницаемостью ϵ . Модель двухслойного диэлектрика представлена на рис. 2.

Для анализа процессов в модели двухслойной изоляции можно использовать схемы замещения, показанные на рис. 2. В схеме на рис. 3, а сопротивление утечки первого и второго слоев в установившемся режиме соответственно равны:

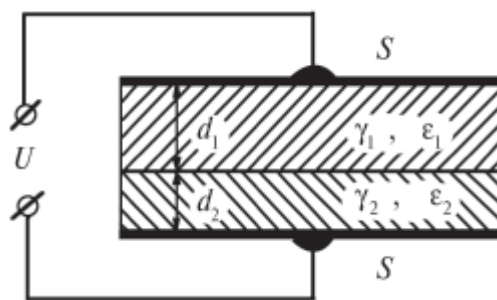


Рисунок 2 – Модель двухслойного диэлектрика

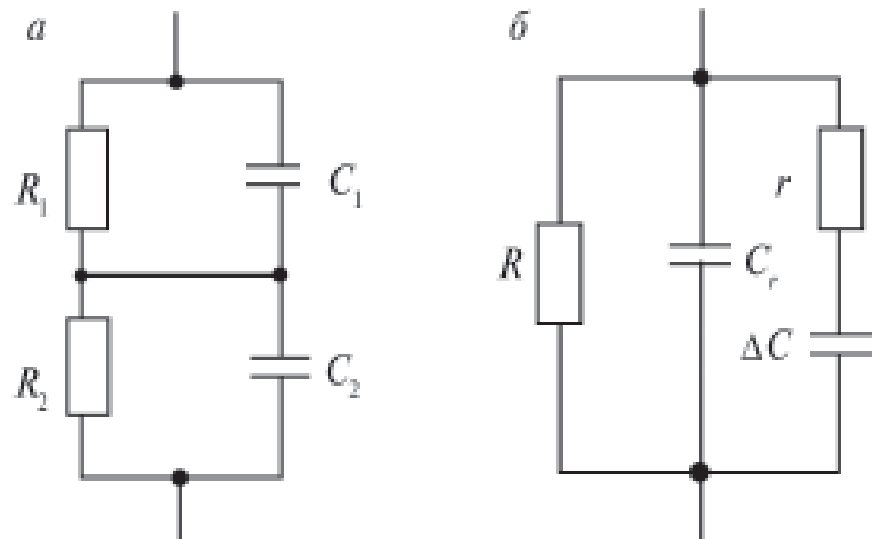


Рисунок 3 – Схема замещения двухслойного диэлектрика

При подключении диэлектрика к источнику с постоянным напряжением, кроме постоянного тока утечки из-за миграционной поляризации диэлектриков, в течение непродолжительного времени наблюдается так называемый ток абсорбции.

Со временем ток абсорбции спадает до нуля по экспоненциальному закону. В процессе старения изоляции, например увлажнении одного из слоев, ток абсорбции уменьшается. Это обстоятельство используется для контроля состояния изоляции.

5. План-график выполнения задания

Работа над контрольной работой может быть представлена в виде выполнения следующих этапов:

№ п/п	Наименование этапа	Сроки выполнения
Очная форма обучения		
1.	Получения задания	На первом практическом занятии
2.	Первичная консультация с преподавателем	На первом практическом занятии
3.	Работа с информационными источниками	В течении семестра
4.	Написание контрольной работы	В течении семестра
5.	Предоставление контрольной работы на кафедру	В течении семестра
6.	Защита контрольной работы	На последнем практическом занятии
Заочная форма обучения		
1.	Получения задания	На первом практическом занятии
2.	Первичная консультация с преподавателем	На первом практическом занятии
3.	Работа с информационными источниками	В течении сессии
4.	Написание контрольной работы	В течении сессии
5.	Предоставление контрольной работы на кафедру	В течении сессии
6.	Защита контрольной работы	На последнем практическом занятии

6. Критерии оценивания работы

В целях повышения качества выполняемых контрольных работ преподаватель руководствуется следующими критериями оценивания письменных работ студентов.

Оценка «зачтено (отлично)» выставляется, если студент:

- представил расчетно-графическую работу в установленный срок и оформил ее в строгом соответствии с изложенными требованиями;
- использовал рекомендованную и дополнительную учебную и страноведческую литературу;
- при выполнении упражнений показал высокий уровень знания лексико-грамматического и страноведческого материала по заданной тематике, проявил творческий подход при ответе на вопросы, умение глубоко анализировать проблему и делать обобщающие выводы;
- выполнил работу грамотно с точки зрения поставленной задачи, т.е. без ошибок и недочетов или допустил не более одного недочета.

Оценка «зачтено (хорошо)» выставляется, если студент:

- представил расчетно-графическую работу в установленный срок и оформил ее в соответствии с изложенными требованиями;
- использовал рекомендованную и дополнительную литературу;
- при выполнении упражнений показал хороший уровень знания лексико-грамматического и страноведческого материала по заданной тематике, практически правильно сформулировал ответы на поставленные вопросы, представил общее знание информации по проблеме;
- выполнил работу полностью, но допустил в ней: а) не более одной негрубой ошибки и одного недочета б) или не более двух недочетов.

Оценка «зачтено (удовлетворительно)» выставляется, если студент:

- представил работу в установленный срок, при оформлении работы допустил незначительные отклонения от изложенных требований;
- показал достаточные знания по основным темам контрольной работы;
- использовал рекомендованную литературу;
- выполнил не менее половины работы или допустил в ней а) не более двух грубых ошибок, б) или не более одной грубой ошибки и одного недочета, в) или не более двух-трех негрубых ошибок, г) или одной негрубой ошибки и трех недочетов, д) или при отсутствии ошибок, но при наличии 4-5 недочетов.

Оценка «незачтено (неудовлетворительно)» выставляется:

- когда число ошибок и недочетов превосходит норму, при которой может быть выставлена оценка «зачтено (удовлетворительно)» или если правильно выполнено менее половины работы;
- если студент не приступал к выполнению работы или правильно выполнил не более 10 процентов всех заданий.

7. Порядок защиты работы

Написанная студентом контрольная работа сдается на кафедру в срок для рецензирования. Студент защищает расчетно-графическую работу до экзамена (зачета) перед преподавателем. Без защиты КР студент к экзамену (зачету) не допускается.

Работа не допускается к защите, если она не носит самостоятельного характера, списана из литературных источников или у других авторов, если основные вопросы не раскрыты, изложены схематично, фрагментарно, в тексте содержатся ошибки, научный аппарат оформлен неправильно, текст написан небрежно.

В ходе защиты контрольной работы задача студента — показать углубленное понимание вопросов конкретной темы, хорошее владение материалом по теме.

Защита расчетно-графической работы может проходить в различных формах по усмотрению преподавателя:

- в форме индивидуальной беседы студента с руководителем по основным положениям работы;
- в форме индивидуальной защиты в присутствии всей группы студентов;
- в форме групповой защиты – одновременной защиты контрольной работы по одному направлению. В этом случае каждый следит за ходом рассуждений товарищей, дополняет, уточняет их, что, несомненно, усиливает работу мысли и способствует развитию экономического мышления.

Любая форма защиты контрольной работы учит отстаивать свою точку зрения, убедительно аргументировать ее, что способствует перерастанию знаний в убеждения.

8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

8.1 Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины

8.1.2 Перечень основной литературы:

1. Бочаров Ю.Н. Техника высоких напряжений [Электронный ресурс] : учебное пособие / Ю.Н. Бочаров, С.М. Дудкин, В.В. Титков. — Электрон. текстовые данные. — СПб. : Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2013. — 265 с. — 978-5-7422-3998-7. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/43976.html>

8.1.3 Перечень дополнительной литературы:

1. Щеглов, Н. В. Современные виды изоляции. Часть 2. Изоляция высоковольтных вводов [Электронный ресурс] : учебное пособие / Н. В. Щеглов. — Электрон. текстовые данные. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2010. — 72 с. — 978-5-7782-1317-3. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/45161.html>

8.2 Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине

1. Методические указания по выполнению практических работ по дисциплине «Техника высоких напряжений».
2. Методические указания по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Техника высоких напряжений».
3. Методические указания по выполнению контрольной работы по дисциплине «Техника высоких напряжений».
4. Методические указания по организации и проведению самостоятельной работы по дисциплине «Техника высоких напряжений».

8.3 Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети Интернет, необходимых для освоения дисциплины

1. <http://www.biblioclub.ru> -ЭБС "Университетская библиотека онлайн"
2. <http://www.iprbookshop.ru/> - Электронно- библиотечная система IPRbooks

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Пятигорский институт (филиал) СКФУ

Методические указания
по организации и проведению самостоятельной работы
по дисциплине «ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ»
для студентов направления подготовки
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Содержание

Введение

- 1 Общая характеристика самостоятельной работы обучающегося при изучении дисциплины «Техника высоких напряжений»
- 2 План-график выполнения самостоятельной работы
- 3 Контрольные точки и виды отчетности по ним
- 4 Методические рекомендации по изучению теоретического материала
- 5 Методические указания по подготовке к контрольной работе
- 7 Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

Введение

Самостоятельная работа – планируемая учебная, учебно-исследовательская, научно-исследовательская работа студентов, выполняемая во внеаудиторное (аудиторное) время по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия (при частичном непосредственном участии преподавателя, оставляющем ведущую роль за работой студентов).

Самостоятельная работа студентов в ВУЗе является важным видом учебной и научной деятельности студента.

Ведущая цель организации и осуществления СРС должна совпадать с целью обучения студента – подготовкой бакалавра с высшим образованием. При организации СРС важным и необходимым условием становятся формирование умения самостоятельной работы для приобретения знаний, навыков и возможности организации учебной и научной деятельности.

Целью самостоятельной работы студентов является овладение фундаментальными знаниями, профессиональными умениями и навыками деятельности по профилю, опытом творческой, исследовательской деятельности. Самостоятельная работа студентов способствует развитию самостоятельности, ответственности и организованности, творческого подхода к решению проблем учебного и профессионального уровня.

Общая характеристика самостоятельной работы обучающегося при изучении дисциплины «Техника высоких напряжений»

Самостоятельная работа - планируемая учебная, учебно-исследовательская, научно-исследовательская работа студентов, выполняемая во внеаудиторное (аудиторное) время по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия (при частичном непосредственном участии преподавателя, оставляющем ведущую роль за работой студентов).

Самостоятельная работа студентов в ВУЗе является важным видом учебной и научной деятельности студента. Самостоятельная работа студентов играет значительную роль в рейтинговой технологии обучения. В связи с этим, обучение в ВУЗе включает в себя две, практически одинаковые по объему и взаимовлиянию части – процесса обучения и процесса самообучения. Поэтому СРС должна стать эффективной и целенаправленной работой студента.

К современному специалисту общество предъявляет достаточно широкий перечень требований, среди которых немаловажное значение имеет наличие у выпускников определенных способностей и умения самостоятельно добывать знания из различных источников, систематизировать полученную информацию, давать оценку конкретной финансовой ситуации. Формирование такого умения происходит в течение всего периода обучения через участие студентов в практических занятиях, выполнение контрольных заданий и тестов, написание курсовых и выпускных квалификационных работ. При этом самостоятельная работа студентов играет решающую роль в ходе всего учебного процесса.

Ведущая цель организации и осуществления СРС должна совпадать с целью обучения студента – подготовкой специалиста и бакалавра с высшим образованием. При организации СРС важным и необходимым условием становятся формирование умения самостоятельной работы для приобретения знаний, навыков и возможности организации учебной и научной деятельности.

Формы самостоятельной работы студентов разнообразны. В соответствии с рабочей программой дисциплины предусмотрены следующие виды самостоятельной работы студента:

- самостоятельное изучение литературы;
- самостоятельное решение задач;
- выполнение курсового проекта.

Цель самостоятельного изучения литературы – самостоятельное овладение знаниями, опытом исследовательской деятельности.

Задачами самостоятельного изучения литературы являются:

- углубление и расширение теоретических знаний;
- формирование умений использовать нормативную, правовую, справочную документацию и специальную литературу;
- развитие познавательных способностей и активности студентов.

Цель самостоятельного решения задач - овладение профессиональными умениями и навыками деятельности по профилю будущей деятельности.

Задачами самостоятельного решения задач являются:

- систематизация и закрепление полученных теоретических знаний и практических умений студентов;
- формирование самостоятельности мышления, способностей к саморазвитию, самосовершенствованию и самореализации;
- развитие исследовательских умений.

Целью самостоятельного выполнения расчетно-графической работы по дисциплине является овладение фундаментальными знаниями, профессиональными умениями и навыками деятельности по профилю, опытом творческой, исследовательской деятельности.

Задачами данного вида самостоятельной работы студента являются:

- систематизация и закрепление полученных теоретических знаний и практических умений студентов;
- углубление и расширение теоретических знаний;
- формирование умений использовать нормативную, правовую, справочную документацию и специальную литературу;
- развитие познавательных способностей и активности студентов: творческой инициативы, самостоятельности, ответственности и организованности;
- формирование самостоятельности мышления, способностей к саморазвитию, самосовершенствованию и самореализации;
- развитие исследовательских умений;
- использование материала, собранного и полученного в ходе самостоятельных занятий на семинарах, на практических и лабораторных занятиях, при написании курсовой работы.

В результате освоения дисциплины формируются следующий перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы:

Код, формулировка компетенции	Код, формулировка индикатора	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций, индикаторов
ПК-1 Способен участвовать в проектировании систем электроснабжения	ИД-З _{ПК-1} Обосновывает выбор параметров электрооборудования систем электроснабжения, учитывая технические ограничения	Знает основные физические явления, механизмы воздействия электромагнитных полей высокого напряжения на изоляцию в различных условиях эксплуатации. Умеет обосновывать выбор параметров электрооборудования систем электроснабжения объектов, учитывая технические ограничения и условия эксплуатации. Владеет навыками выбора параметров электрооборудования систем электроснабжения объектов, учитывая технические ограничения и условия эксплуатации.

План-график выполнения самостоятельной работы

Коды реализуемых компетенций, индикатора(ов)	Вид деятельности студентов	Средства и технологии оценки	Объем часов, в том числе		
			СРС	Контактная работа с преподавателем	Всего
Очная форма обучения					
5 семестр					
ПК-1 ИД-ЗПК-1	Самостоятельное изучение литературы по темам №1-9	Собеседование	26,88	3,32	30,2
	Подготовка к лекциям	Собеседование	1,62	0,18	1,8
	Подготовка к практическим занятиям	Письменный отчет о решении типовых, разноуровневых задач	3,24	0,36	3,6
	Подготовка к лабораторным работам	Собеседование	4,86	0,54	5,4
	Выполнение контрольной работы	Собеседование	12	1	13
Итого за 5 семестр:			48,6	5,4	54
Итого:			48,6	5,4	54
Заочная форма обучения					
5 семестр					
ПК-1 ИД-ЗПК-1	Самостоятельное изучение литературы по темам №1-9	Собеседование	67,959	7,551	75,51
	Подготовка к лекциям	Собеседование	0,477	0,053	0,53
	Подготовка к практическим занятиям	Письменный отчет о решении типовых, разноуровневых задач	0,954	0,106	1,06
	Подготовка к лабораторным работам	Собеседование	1,44	0,16	1,6
	Выполнение контрольной работы	Собеседование	15,57	1,73	17,3
Итого за 5 семестр:			86,4	9,6	96
Итого:			86,4	9,6	96

Контрольные точки и виды отчетности по ним

№ п/п	Вид деятельности студентов	Сроки выполнения	Количество баллов
5 семестр			
1.	Практическое занятие № 2	6 неделя	25
2.	Лабораторное занятие № 6	10 неделя	15
3.	Практическое занятие № 8	16 неделя	15
	Итого за 5 семестр		55
	Итого		55

Максимально возможный балл за весь текущий контроль Максимально возможный балл за весь текущий контроль устанавливается равным 55. Текущее контрольное мероприятие считается сданным, если студент получил за него не менее 60% от установленного для этого контроля максимального балла. Рейтинговый балл, выставляемый студенту за текущее контрольное мероприятие, сданное студентом в установленные графиком контрольных мероприятий сроки, определяется следующим образом:

Уровень выполнения контрольного задания	Рейтинговый балл (в % от максимального балла за контрольное задание)
Отличный	100
Хороший	80
Удовлетворительный	60
Неудовлетворительный	0

Рейтинговая система успеваемости студентов не предусмотрена для заочной формы обучения.

Методические рекомендации по изучению теоретического материала

Самостоятельная работа студента начинается с внимательного ознакомления с содержанием учебного курса.

Изучение каждой темы следует начинать с внимательного ознакомления с набором вопросов. Они ориентируют студента, показывают, что он должен знать по данной теме. Вопросы темы как бы накладываются на соответствующую главу избранного учебника или учебного пособия. В итоге должно быть ясным, какие вопросы темы учебного курса и с какой глубиной раскрыты в конкретном учебном материале, а какие вообще опущены. Требуется творческое отношение и к самому содержанию дисциплины.

Вопросы, составляющие ее содержание, обладают разной степенью важности. Есть вопросы, выполняющие функцию логической связки содержания темы и всего курса, имеются вопросы описательного или разъяснительного характера, а также исторического экскурса в область изучаемой дисциплины. Все эти вопросы не составляют сути понятийного, концептуального содержания темы, но необходимы для целостного восприятия изучаемых проблем.

Изучаемая дисциплина имеет свой категориально-понятийный аппарат. Научные понятия — это та база, на которой строится каждая наука. Понятия — узловые, опорные пункты как научного, так и учебного познания, логические ступени движения в учебе от простого к сложному, от явления к сущности. Без ясного понимания понятий учеба крайне затрудняется, а содержание приобретенных знаний становится тусклым, расплывчатым.

Студент должен понимать, что самостоятельное овладение знаниями является главным, определяющим. Высшая школа создает для этого необходимые условия, помогает будущему высококвалифицированному специалисту овладеть технологией самостоятельного производства знаний.

В самостоятельной работе студентам приходится использовать литературу различных видов: первоисточники, монографии, научные сборники, хрестоматии, учебники, учебные пособия, журналы и др. Изучение курса предполагает знакомство студентов с большим объемом научной и учебной литературы, что, в свою очередь, порождает необходимость выработки у них рационально-критического подхода к изучаемым источникам.

Чтобы не «утонуть» в огромном объеме рекомендованных ему для изучения источников, студент, прежде всего, должен научиться правильно их читать. Правильное чтение рекомендованных источников предполагает следование нескольким несложным, но весьма полезным правилам.

Предварительный просмотр книги включает ознакомление с титульным листом книги, аннотацией, предисловием, оглавлением. При ознакомлении с оглавлением необходимо выделить разделы, главы, параграфы, представляющие для вас интерес, бегло их просмотреть, найти места, относящиеся к теме (абзацы, страницы, параграфы), и познакомиться с ними в общих чертах.

Научные издания сопровождаются различными вспомогательными материалами — научным аппаратом, поэтому важно знать, из каких основных элементов он состоит, каковы его функции.

Знакомство с книгой лучше всего начинать с изучения аннотации — краткой характеристики книги, раскрывающей ее содержание, идейную, тематическую и жанровую направленность, сведения об авторе, назначение и другие особенности. Аннотация помогает составить предварительное мнение о книге.

Глубже понять содержание книги позволяют вступительная статья, в которой дается оценка содержания книги, затрагиваемой в ней проблематики, содержится информация о жизненной и творческой биографии автора, высказываются полемические замечания, разъясняются отдельные положения книги, даются комментарии и т.д. Вот почему знакомство с вступительной статьей представляется очень важным: оно помогает студенту сориентироваться в тексте работы, обратить внимание на ее наиболее ценные и важные разделы.

Той же цели содействует знакомство с оглавлением, предисловием, послесловием. Весьма полезными элементами научного аппарата являются сноски, комментарии, таблицы, графики, списки литературы. Они не только иллюстрируют отдельные положения книги или статьи, но и сами по себе являются дополнительным источником информации для читателя.

Если читателя заинтересовала какая-то высказанная автором мысль, не нашедшая подробного освещения в данном источнике, он может обратиться к тексту источника, упоминаемого в сноске, либо к источнику, который он может найти в списке литературы, рекомендованной автором для самостоятельного изучения.

Существует несколько форм ведения записей:

— план (простой и развернутый) — наиболее краткая форма записи прочитанного, представляющая собой перечень вопросов, рассматриваемых в книге или статье. Развернутый план представляет собой более подробную запись прочитанного, с детализацией отдельных положений и выводов, с выпиской цитат, статистических данных и т.д. Развернутый план — неоценимый помощник при выступлении с докладом на конкретную тему на семинаре, конференции;

— тезисы — кратко сформулированные положения, основные положения книги, статьи. Как правило, тезисы составляются после предварительного знакомства с текстом источника, при его повторном прочтении. Они помогают запомнить и систематизировать информацию.

Составление конспектов

Большую роль в усвоении и повторении пройденного материала играет хороший конспект, содержащий основные идеи прочитанного в учебнике и услышанного в лекции. Конспект — это, по существу, набросок, развернутый план связного рассказа по основным вопросам темы.

В какой-то мере конспект рассчитан (в зависимости от индивидуальных особенностей студента) не только на интеллектуальную и эмоциональную, но и на зрительную память, причем текст конспекта нередко ассоциируется еще и с текстом учебника или записью лекции. Поэтому легче запоминается содержание конспектов, написанных разборчиво, с подчеркиванием или выделением разрядкой ключевых слов и фраз.

Самостоятельно изученные темы предоставляются преподавателю в форме конспекта, по которому происходит собеседование. Теоретические темы курса (отдельные вопросы), выносимые на самостоятельное изучение, представлены ниже.

Типовые контрольные задания и иные материалы, характеризующие этапы формирования компетенций

Вопросы для собеседования

1. Почему проводящие тела имеют эквипотенциальные поверхности?
2. Перечислить известные способы графического и аналитического выражения напряженности электрического поля.
3. Как по заданному графику потенциала построить график напряженности электрического поля?
4. Как определить пределы линейного интеграла для расчета напряжения по напряженности электрического поля?
5. Как определить пределы линейного интеграла для расчета напряжения по напряженности электрического поля?
6. Какая форма условной поверхности, охватывающей заряд, будет наиболее рациональной при использовании теоремы Гаусса?
7. Почему зависимость, полученная для расчета напряженности электрического поля через заряд, оказывается практически непригодной?
8. Как пересчитать емкость, выраженную в фарадах, в пикофарады?
9. Что такое электрическое смещение?

10. Какова величина относительной диэлектрической проницаемости воды и проводников?
11. Что показывает и что характеризует величина относительной диэлектрической проницаемости?
12. В какой из двух сред при той же величине напряженности электрического поля будет больше электрическое смещение — в фарфоре или слюде?
13. От каких геометрических параметров и как зависит емкость плоского конденсатора?
14. В чем опасность воздушных включений между слоями многослойного конденсатора?
15. Какими параметрами следует задаться при расчете емкости плоского конденсатора?
16. Почему средняя пробивная напряженность электрического поля воздуха уменьшается при увеличении расстояния между электродами?
17. Как устраняется влияние краевого эффекта у плоских и цилиндрических электродов?
18. Как изменяется емкость плоского конденсатора при постепенном заполнении трансформаторным маслом воздушного промежутка между электродами?
19. Как регулировать напряженность электрического поля в слоях многослойного плоского конденсатора?
20. Как выглядят графики потенциала и напряженности электрического поля трехслойного плоского конденсатора, у которого средний слой пробит, а один из электродов заземлен?
21. Опишите устройство цилиндрического конденсаторного ввода.
22. Какое соотношение соблюдается между напряженностями электрического поля на границе раздела двух смежных слоев?
23. По какому математическому закону изменяется напряженность электрического поля в однородном слое цилиндрического конденсатора?
24. Как располагают материалы с различными величинами диэлектрической проницаемости при выравнивании значения максимальной напряженности электрического поля в слоях цилиндрического конденсатора?
25. Как располагают материалы с различными величинами диэлектрической проницаемости при выравнивании значения максимальной напряженности электрического поля в слоях цилиндрического конденсатора?

26. Как изменяется емкость цилиндрического воздушного конденсатора при возникновении короны у центрального электрода?
27. Почему при расчете изоляции цилиндрического конденсатора по условиям ее оптимального использования иногда приходится центральный электрод изготавливать полым?
28. При каких соотношениях между радиусами цилиндрических электродов максимальная напряженность электрического поля минимальна?
29. Как можно объяснить увеличение неравномерности электрического поля шарового разрядника при заземлении одной из его сфер?
30. В каких пределах можно изменять расстояние между сферами шарового разрядника, сохраняя электрическое поле равномерным или близким к равномерному?
31. В чем заключается правило зеркального отображения?
32. На основании какого геометрического построения может быть найдено положение центров электрических осей двух заряженных цилиндров?
33. В чем заключается особенность выражения для потенциальных коэффициентов точек, принадлежащих поверхности нулевого потенциала?
34. На основании какого геометрического построения может быть найдено положение центров электрических осей двух заряженных цилиндров?
35. В чем заключается особенность выражения для потенциальных коэффициентов точек, принадлежащих поверхности нулевого потенциала?
36. Какое практическое применение имеет система из двух сфер?
37. Какие меры предосторожности и почему следует принять при работе монтеров на одной обесточенной цепи двухцепных линий электропередачи?
38. Поясните принцип осуществления «емкостного отбора» мощности от высоковольтной линии электропередачи?
39. Как изменится формула для рабочей емкости провода двухпроводной линии передачи при заземлении одного из проводов?
40. Что представляют собой коэффициенты объемной и поверхностной ионизации?
41. Какой разряд принято называть самостоятельным и каковы условия его возникновения?
42. Почему увеличение содержания влаги в газе повышает электрическую прочность газового промежутка?
43. Каким соотношением связаны между собой диаметры сфер разрядника и пределы измеряемых им напряжений?
44. Пояснить роль полярности в формировании разряда между электродами игла — плоскость.

45. Почему при равных условиях промежуток стержень — стержень оказывается прочнее промежутка стержень — плоскость?
46. Какой характер имеет зависимость коэффициента объемной ионизации от давления газа?
47. Что характеризует собой коэффициент импульсной прочности?
48. Что характеризует собой коэффициент импульсной прочности?
49. Что такое электрический барьер и какова его роль в упрочнении газового промежутка?
50. Что следует понимать под критической длиной дуги и под критическим током дугового разряда?
51. Как влияет расположение электродов и их конструкция на условия самопогасания открытой дуги?
52. При каких условиях имеет место самопогасание открытой дуги переменного тока при однофазном замыкании на землю?
53. Какое влияние на восстановление прочности промежутка оказывает ширина щели, в которой горела дуга
54. Объясните разницу в понятиях: пробой, перекрытие и скользящий разряд. 90
55. Почему внешняя поверхность изоляторов для наружной установки делается ребристой?
56. Сформулируйте определение поверхностной емкости применительно к цилиндрическому изолятору.
57. Сформулируйте основные положения закона преломления вектора напряженности электрического поля.
58. Поясните, почему затруднено перекрытие изоляторов, имеющих развитую или вогнутую форму?
59. Как следует поставить опыт пробоя подвесного изолятора, если известно, что перекрытие по поверхности изолятора в воздухе наступает при напряжении, значительно меньшем пробивного?
60. Какое влияние на величину напряжения перекрытия может оказать покрытие полупроводящей глазурью поверхности изолятора?
61. Какое влияние оказывает влага на величину напряжения, при котором возникают скользящие разряды?

Методические указания по подготовке к контрольной работе

Контрольная работа – это самостоятельная письменная работа студента, которая должна показать не только его владение теоретическим материалом, но и продемонстрировать практические умения проводить расчеты.

Цели выполнения контрольной работы заключаются:

- закрепить и систематизировать теоретические знания и практические навыки студента;
- научить работать с литературой – изучать, анализировать информацию из научных источников;

При выполнении контрольной работы реализуются следующие компетенции:

Код, формулировка компетенции	Код, формулировка индикатора	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций, индикаторов
ПК-1 Способен участвовать в проектировании систем электроснабжения	ИД-Зпк-1 Обосновывает выбор параметров электрооборудования систем электроснабжения, учитывая технические ограничения	Знает основные физические явления, механизмы воздействия электромагнитных полей высокого напряжения на изоляцию в различных условиях эксплуатации. Умеет обосновывать выбор параметров электрооборудования систем электроснабжения объектов, учитывая технические ограничения и условия эксплуатации. Владеет навыками выбора параметров электрооборудования систем электроснабжения объектов, учитывая технические ограничения и условия эксплуатации.

Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины

Перечень основной литературы:

1. Бочаров Ю.Н. Техника высоких напряжений [Электронный ресурс] : учебное пособие / Ю.Н. Бочаров, С.М. Дудкин, В.В. Титков. — Электрон. текстовые данные. — СПб. : Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2013. — 265 с. — 978-5-7422-3998-7. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/43976.html>

Перечень дополнительной литературы:

1. Щеглов, Н. В. Современные виды изоляции. Часть 2. Изоляция высоковольтных вводов [Электронный ресурс] : учебное пособие / Н. В. Щеглов. — Электрон. текстовые данные. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2010. — 72 с. — 978-5-7782-1317-3. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/45161.html>

Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине

1. Методические указания по выполнению практических работ по дисциплине «Техника высоких напряжений».
2. Методические указания по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Техника высоких напряжений».
3. Методические указания по выполнению контрольной работы по дисциплине «Техника высоких напряжений».
4. Методические указания по организации и проведению самостоятельной работы по дисциплине «Техника высоких напряжений».

Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети Интернет, необходимых для освоения дисциплины

1. <http://www.biblioclub.ru> -ЭБС "Университетская библиотека онлайн"
2. <http://www.iprbookshop.ru/> - Электронно- библиотечная система IPRbooks