

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования
«ИРКУТСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

Структурное подразделение «Электроснабжения и электротехники (140)»

УТВЕРЖДЕНА:

на заседании кафедры электроснабжения и электротехники

Протокол №10 от 10 июня 2026 г.

Рабочая программа дисциплины

«ФИЗИКА И ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ»

Направление: 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Энергоэффективность, энергоаудит и управление энергохозяйством

Квалификация: Магистр

Форма обучения: очная

Документ подписан простой электронной
подписью
Составитель программы: Потапов Василий
Васильевич
Дата подписания: 11.06.2026

Документ подписан простой электронной
подписью
Утвердил и согласовал: Шакиров Владислав
Альбертович
Дата подписания: 19.06.2026

Год набора – 2026

Иркутск, 2026 г.

1 Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы

1.1 Дисциплина «Физика и техника высоких напряжений» обеспечивает формирование следующих компетенций с учётом индикаторов их достижения

Код, наименование компетенции	Код индикатора компетенции
ПК-1 Способен самостоятельно проводить и осуществлять руководство научно-исследовательскими работами и обладать методиками сбора и анализа данных	ПК-1.5
ПК-5 Способен решать производственно-технологические задачи по сопровождению и эксплуатации, техническому обслуживанию, реконструкции оборудования, а также технологической автоматики	ПК-5.1

1.2 В результате освоения дисциплины у обучающихся должны быть сформированы

Код индикатора	Содержание индикатора	Результат обучения
ПК-1.5	Знает физические и математические модели, относящиеся к исследуемому объекту	Знать методы расчёта и выбора изоляции и изоляционных конструкций; Уметь выполнять необходимые расчёты и выбор изоляции и изоляционных конструкций; - выполнить необходимые расчёты и оценку перенапряжений, воздействующих на электроустановки в системе электроснабжения; - выполнять необходимые расчёты и выбор устройств защиты от перенапряжений; - выполнять необходимые расчёты и проектирование молниезащиты объектов электроэнергетики промышленных зданий и сооружений; - выполнить типовые измерения при высоковольтных испытаниях. Владеть терминологией
ПК-5.1	Знает физические и математические модели, относящиеся к исследуемому объекту	Знать методы расчёта и выбора изоляции и изоляционных конструкций; Уметь выполнять необходимые расчёты и выбор изоляции и изоляционных конструкций; - выполнить необходимые расчёты и оценку перенапряжений,

		воздействующих на электроустановки в системе электроснабжения; - выполнять необходимые расчёты и выбор устройств защиты от перенапряжений; - выполнять необходимые расчёты и проектирование молниезащиты объектов электроэнергетики промышленных зданий и сооружений; - выполнить типовые измерения при высоковольтных испытаниях. Владеть терминологией
--	--	---

2 Место дисциплины в структуре ООП

Изучение дисциплины «Физика и техника высоких напряжений» базируется на результатах освоения следующих дисциплин/практик: Нет

Дисциплина является предшествующей для дисциплин/практик: «Производственная практика: проектная практика», «Производственная практика: эксплуатационная практика», «Современная физика в электроэнергетике», «Физика и техника высоких напряжений», «Физические основы электрических цепей»

3 Объем дисциплины

Объем дисциплины составляет – 3 ЗЕТ

Вид учебной работы	Трудоемкость в академических часах (Один академический час соответствует 45 минутам астрономического часа)	
	Всего	Семестр № 1
Общая трудоемкость дисциплины	108	108
Аудиторные занятия, в том числе:	39	39
лекции	13	13
лабораторные работы	13	13
практические/семинарские занятия	13	13
Самостоятельная работа (в т.ч. курсовое проектирование)	33	33
Трудоемкость промежуточной аттестации	36	36
Вид промежуточной аттестации (итогового контроля по дисциплине)	Экзамен	Экзамен

4 Структура и содержание дисциплины

4.1 Сводные данные по содержанию дисциплины

Семестр № 1

№ п/п	Наименование раздела и темы	Виды контактной работы			СРС	Форма текущего
		Лекции	ЛР	ПЗ(СЕМ)		

	дисциплины	№	Кол. Час.	№	Кол. Час.	№	Кол. Час.	№	Кол. Час.	контроля
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Электрические разряды в газах	1	1			5	2	2	4	Отчет
2	Пробой газообразных, жидких и твердых диэлектриков	2	2	3, 4	4			2, 3	5	Отчет
3	Изоляционные конструкции и принципы конструирования высоковольтной изоляции;	3	2	1, 2	3	1, 2, 3	3	2, 3	6	Отчет
4	Грозовые перенапряжения и защита от них	4	2					1, 2, 3	6	Отчет
5	Внутренние перенапряжения в системах электроснабжения. Защита электроустановок от внутренних перенапряжений	5	2	7	2	6, 7, 8	6	2	3	Отчет
6	Высоковольтные испытательные установки, испытания и измерения	6	2	5, 6	4	4	2	1, 2	5	Отчет
7	Координация изоляции.	7	2					2, 4	4	Отчет
	Промежуточная аттестация								36	Экзамен
	Всего		13		13		13		69	

4.2 Краткое содержание разделов и тем занятий

Семестр № 1

№	Тема	Краткое содержание
1	Электрические разряды в газах	Развитие газового разряда в электрическом поле Физические процессы в ионизированных газах Физическое состояние газа. Физическое состояние газа. Ударная ионизация. Фотоионизация, Термоионизация. Поверхностная ионизация, Образование отрицательных ионов. Рекомбинация заряженных частиц. Подвижность в электрическом поле и диффузия заряженных частиц. Коэффициент ударной ионизации. Лавина электронов. Самостоятельный разряд. Развитие газового разряда в электрическом поле
2	Пробой газообразных, жидких и твердых диэлектриков	Основные понятия. Пробой газов. Механизм пробоя газа. Пробой газа в однородном поле. Пробой газа в неоднородном поле. Пробой жидких диэлектриков. Пробой твердых диэлектриков.

		Электрический пробой. Тепловой пробой. Электрохимический пробой. Поверхностный пробой
3	Изоляционные конструкции и принципы конструирования высоковольтной изоляции;	Внутренняя изоляция. Изоляция самовосстанавливающаяся и не самовосстанавливающаяся. Масло-барьерная изоляция (МБИ). Изолирование электродов. Бумажно-масляная изоляция (БМИ). Газовая и вакуумная изоляция. Изоляция силовых кабелей высокого напряжения. Основные конструкции кабелей высокого напряжения. Кабели с пластмассовой изоляцией. Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена. Кабели с элегазовой изоляцией под давлением. Криогенные (криорезистивные) кабели. Кабельные муфты. Концевые муфты. Изоляция аппаратов высокого напряжения. Изоляция маслонаполненных выключателей. Изоляция воздушных выключателей. Вакуумные выключатели. Элегазовые выключатели. Изоляция вводов высокого напряжения. Конструк Испытания изоляции силовых конденсаторов. Изоляция силовых конденсаторов. Общая характеристика внешней изоляции. Атмосферный воздух как диэлектрик. Назначение и типы изоляторов. Работа изоляторов при увлажненных загрязнениях поверхности. Степени загрязненности атмосферы. Выбор изоляторов в зависимости от степени загрязненности атмосферы.
4	Грозовые перенапряжения и защита от них	Молниеотводы, Принцип действия молниеотводов. Защитные аппараты и устройства. Разрядники. Нелинейные ограничители перенапряжений
5	Внутренние перенапряжения в системах электроснабжения. Защита электроустановок от внутренних перенапряжений	Общая характеристика внутренних перенапряжений. Классификация внутренних перенапряжений. Коммутационные перенапряжения. Перенапряжения установившегося режима (резонансные). Перенапряжения в длинных линиях за счет емкостного эффекта. Феррорезонансные перенапряжения. Способы ограничения перенапряжений. Система защиты от перенапряжений. Нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН)
6	Высоковольтные испытательные установки, испытания и измерения	Испытательные напряжения промышленной частоты. Испытательные трансформаторы. Методы испытания изоляции повышенным напряжением промышленной частоты. Испытание изоляции повышенным выпрямленным напряжением. Испытание изоляции повышенным выпрямленным

		напряжением, наложенным на рабочее напряжение. Испытательные напряжения грозовых импульсов. Испытательные напряжения коммутационных импульсов
7	Координация изоляции.	Генерирование коммутационных импульсов и методы испытания изоляции

4.3 Перечень лабораторных работ

Семестр № 1

№	Наименование лабораторной работы	Кол-во академических часов
1	Испытательные установки высокого напряжения и испытания электрической прочности изоляции электрооборудования	1
2	Измерение переменных высоких напряжений	2
3	Электрические разряды в воздухе	2
4	Электрические разряды по поверхности твердого диэлектрика	2
5	Измерение импульсных высоких напряжений	2
6	Измерение импульсных разрядных токов	2
7	Импульсные процессы в протяженных заземлителях	2

4.4 Перечень практических занятий

Семестр № 1

№	Темы практических (семинарских) занятий	Кол-во академических часов
1	Практическое занятие №1. Наружная изоляция электроустановок	1
2	Практическое занятие №2. Изоляция вращающихся машин и трансформаторов	1
3	Практическое занятие №3. Изоляция силовых кабелей и конденсаторов	1
4	Практическое занятие №4. Методы испытания изоляции	2
5	Практическое занятие №5. Атмосферные перенапряжения	2
6	Практическое занятие №6. Квазистационарные и феррорезонансные перенапряжения	2
7	Практическое занятие №7. Коммутационные перенапряжения	2
8	Практическое занятие №8. Средства защиты от перенапряжений	2

4.5 Самостоятельная работа

Семестр № 1

№	Вид СРС	Кол-во академических часов
1	Оформление отчетов по лабораторным и практическим работам	3
2	Подготовка к практическим занятиям (лабораторным работам)	22
3	Подготовка к сдаче и защите отчетов	7
4	Подготовка к экзамену	1

В ходе проведения занятий по дисциплине используются следующие интерактивные методы обучения: Дискуссия

5 Перечень учебно-методического обеспечения дисциплины

5.1 Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины

5.1.1 Методические указания для обучающихся по практическим занятиям

Практическое занятие №1. Наружная изоляция электроустановок

Цель занятия: Выполнение расчета высоковольтного ввода с комбинированной бумажно-плёночной изоляцией на напряжение 110 кВ для трансформаторов.

Задание на занятие: выполнить расчет наружной изоляции при положительной полярности.

Рекомендации по выполнению заданий:

Выбрать по заданному значению U_n по ГОСТ 1516.1-76 значения U_c – напряжение, выдерживаемое изолятором при сухой и чистой поверхности, U_d – выдерживаемое напряжение под дождем, U_n – номинальное напряжение, n - номинальный ток.

Расчет наружной изоляции выполняется принимая за расчетное напряжение U_0 – при сухой и чистой поверхности.

Длина воздушной покрышки l определяется по эмпирическим формулам

, $l_b=0,909 \text{ м.}$

, $l_d=0,951 \text{ м.}$

, $l_d=0,225 \text{ м.}$

Из трех найденных значения выбирается наибольшее.

Длина масляной части покрышки находится, принимая значение допустимой напряженности электрического поля в масле $E_{доп.м}=800 \text{ кВ/м.}$

Количество ребер и их размеры рассчитываются по формулам:

шаг ребер:

вылет ребра:

Проверка внешней изоляции производится исходя из условия перекрытия под дождем на основе эмпирического уравнения:

.

Практическое занятие №2. Изоляция вращающихся машин и трансформаторов

Цель занятия: Измерение сопротивления и емкости изоляции трансформатора.

Задание на занятие: Изучение методов и схем измерения характеристик изоляции

трансформаторов.

Рекомендации по выполнению заданий:

Основное требование к изоляции сводится к отсутствию ее нагрева при рабочем напряжении и вместе с тем от изоляции требуется не проводить тока при постоянном напряжении. Измерение сопротивления изоляции является одним из простейших, но весьма эффективных методов контроля состояния изоляции, позволяющих фиксировать один из самых распространенных дефектов изоляции - ее увлажнение, приводящее к существенному нагреву при переменном напряжении из-за увеличения сквозной электропроводности диэлектрика и увеличения поляризационных потерь. Измерение сопротивления изоляции позволяет контролировать как сплошное увлажнение изоляции, так и увлажнение только одного из слоев в слоистой изоляции.

Сопротивлением изоляции называют отношение напряжения, приложенного к изоляции, к току через сечение изоляции, при приложении постоянного напряжения и через 1 мин. после подачи напряжения, то есть это - сопротивление при постоянном напряжении через 1 мин. после его подачи. Сплошное увлажнение изоляции приводит к снижению ее сопротивления ввиду высокой проводимости влаги, что позволяет по величине сопротивления сразу судить о возможном ее увлажнении. Из-за наличия абсорбционных явлений ток через изоляцию при приложении постоянного напряжения меняется по величине в течение некоторого времени порядка десятков секунд, поэтому сопротивлением изоляции и считают ее сопротивление через 60 с после приложения напряжения. Суть абсорбционных явлений - и одновременно возможность контроля слоистого увлажнения изоляции - поясняет рисунок, на котором изображена двухслойная изоляция и две равноправные эквивалентные схемы замещения двухслойной изоляции (рис. 1).

Рис. 1. Двухслойная изоляция и различные схемы ее замещения

Схема б) является естественной схемой замещения двухслойной изоляции, учитывающей сквозные токи через слои изоляции и емкости слоев. Схема в) совершенно аналогична схеме б), если выполняются соотношения следующего типа:

, , ,

При подаче постоянного напряжения сначала происходит резкий скачок напряжения от нуля до установившегося значения, при котором ток протекает только по емкостным элементам (б). Распределение напряжения определяется емкостями этих элементов. По прошествии некоторого времени емкостные элементы перестают играть какую-либо роль и распределение напряжения по слоям определяется их омическими сопротивлениями. Если величины сопротивлений велики, то перезарядка емкостных элементов длится достаточно долго, показания мегаомметра в течение некоторого времени (десятки секунд) будут изменяться; хорошая изоляция без увлажнения означает достаточно длительный процесс перехода в установившийся режим. При увлажнении одного из слоев перезарядка через один из низкоомных элементов R_1 или R_2 пройдет достаточно быстро, за время менее 15 с. Если даже второй слой большое сопротивление (а при переменном напряжении низкоомный слой будет нагреваться емкостными токами высокоомного слоя), то по соотношению сопротивлений, измеренных в разные моменты времени (конкретно - через 60 с, R_{60} , и через 15 с, R_{15}), можно судить об увлажнении одного из слоев. Если пренебречь начальным скачком тока, заряжающего геометрическую емкость СГ, то после приложения постоянного напряжения ток через изоляцию определяется суммой сквозного тока через элемент R (рис. 1в) и тока заряда элемента ΔC :

,

откуда - сопротивление двухслойной изоляции меняется во времени, и скорость изменения выше, если хотя бы один из слоев имеет невысокое сопротивление. (рис. 2)

Рис. 2. Зависимость сопротивления от времени при сухой и увлажненной изоляции

Таким образом, контролируя величину R_{60} , можно судить о наличии сплошного увлажнения изоляции, а по отношению к коэффициенту абсорбции, можно судить о наличии увлажнения одного из слоев изоляции. Более конкретно, если $K_{абс} < 1,3$, то, как это следует из опытных данных, изоляция недопустимо увлажнена.

Коэффициент абсорбции является показателем увлажнения изоляции при температурах ниже 35...40°C. При более высокой температуре возрастает ток сквозной проводимости и коэффициент абсорбции и для сухой, и для влажной изоляции приближаются к единице.

При измерении сопротивления изоляции принимают во внимание абсолютную величину сопротивления R_{60} , которая должна быть не меньше нормированного значения, а затем и коэффициент абсорбции. Если обе величины не выходят за пределы нормы, то говорят о том, что увлажнения изоляции не обнаружено; если хотя бы одна из величин неудовлетворительна, то делают вывод о недопустимом увлажнении изоляции.

Требуемые значения сопротивления изоляции для различных установок представлены в правилах эксплуатации электроустановок. Для силовых трансформаторов значения сопротивления изоляции, устанавливаемые нормами, зависят от температуры обмоток; так, у трансформаторов с номинальным напряжением обмотки высшего напряжения 35 кВ при 20°C сопротивление главной изоляции должно быть не менее 300 МОм, у трансформаторов 110 кВ - не менее 600 МОм. Поскольку изоляция трансформаторов включает в свой состав ряд изоляционных промежутков, для контроля характеристик изоляции, включая и измерения сопротивления, используют нормативные схемы измерения. Перечень схем для двухобмоточных и трехобмоточных трансформаторов приведен в табл. 1:

Таблица 1. Схемы измерения характеристик изоляции трансформаторов

Последовательность измерений Двухобмоточные измеряемые заземляемые обмотки части Трехобмоточные измеряемые заземляемые обмотки части

- | | | |
|---|--------------|------------------|
| 1 | НН Бак, ВН | НН Бак, СН, ВН |
| 2 | ВН Бак, НН | СН Бак, НН, ВН |
| 3 | (ВН+НН)* Бак | ВН Бак, НН, СН |
| 4 | - | (ВН+СН)* Бак, НН |
| 5 | - | (ВН+СН+НН)* Бак |

Измерения сопротивления изоляции в эксплуатации производят мегаомметрами на напряжение 0,5 кВ, 1 кВ или 2,5 кВ. Наиболее распространенными являются мегаомметры со встроенными генераторами, обеспечивающими автономную работу; к такому типу относится мегаомметр М1102. Мегаомметры типа Ф4101, позволяющие измерять сопротивления до 50000 МОм, имеют комбинированное питание (от сети и от сухих элементов) и построены по последовательной схеме, в которой источник напряжения, измерительный элемент и испытываемая изоляция включаются последовательно. Измерения обязательны только для трансформаторов мощностью 16000 кВА и более.

Контроль емкости изоляции.

Контроль величины емкости изоляции позволяет выявлять слоистое увлажнение изоляции.

Можно попытаться использовать простую параллельную схему замещения двухслойной изоляции (а) с параллельно соединенными резистивным элементом $RП$ и емкостным элементом $СП(г)$. При этом, однако, значения параметров схемы замещения оказываются частотно-зависимыми; в частности,

Зависимость показан на рис. 3:

Рис. 3. Зависимость емкости от частоты для двухслойной изоляции

С ростом степени увлажнения возрастает размах изменения емкости с изменением частоты. Использование этой зависимости может служить для обнаружения слоистого увлажнения изоляции.

Для оценки состояния изоляции измерения производят на частотах 2 Гц и 50 Гц при неизменной температуре изоляции и затем определяют отношение, которое и служит показателем качества изоляции. На основании опыта установлено, что изоляция имеет недопустимое увлажнение, если $> 1,3$.

Для измерения емкостей используются два основных принципа, проиллюстрированные следующим образом (рис. 4):

Рис. 4. Принципиальное устройство приборов емкостного контроля увлажнения

Переключатель в схеме (рис. 4) а) периодически подключает испытуемую изоляцию к источнику постоянного напряжения, заряжая емкость изоляции, а затем - к цепи с гальванометром РА, через который емкость изоляции разряжается. Средний ток через гальванометр определяется частотой переключения, так что при измерении на частотах 2 Гц и 50 Гц отношение емкостей определяется отношением токов: . По такому принципу работают приборы контроля влажности серии ПКВ.

По схеме (рис. 4) б) заряжается от источника постоянного напряжения, а затем на короткое время, примерно на четверть периода частоты 50 Гц, то есть на 5 мс, подключается к образцовому конденсатору С0. На образцовый конденсатор переносится заряд, пропорциональный емкости С50 (примерно соответствующей геометрической емкости СГ (в)). Затем изоляция снова заряжается, кратковременно замыкается для разряда геометрической емкости и на время около четверти периода частоты 2 Гц (примерно 130 мс) подключается к образцовому конденсатору для снятия части заряда с абсорбционной емкости ΔС, что позволяет определить разность С2-С50. По этой разнице и по значению С50 определяется отношение емкостей: . Напряжение на эталонном конденсаторе измеряется с помощью электронного вольтметра, имеющего большое входное сопротивление.

Хроматографический анализ масла

При возникновении дефектов в маслонаполненной изоляции (масляные трансформаторы, маслонаполненные вводы) происходит изменение физических характеристик и химического состава масла. Распределенные дефекты в такой изоляции могут быть выявлены при проведении общего химического анализа нефтяного масла или при измерении его электрической прочности и тангенса угла диэлектрических потерь. В последнее время все более широкое распространение находит методика выявления повреждений в силовых трансформаторах по результатам анализа растворенных в масле газов. Идея метода основана на предположении о том, что повреждение в трансформаторе сопровождается выделением различных газов, отсутствующих в масле при нормальной работе. Эти газы первоначально растворяются в масле и в газовое реле практически не попадают. Выделив эти газы из масла и проведя их анализ, можно обнаружить повреждения на разной стадии их возникновения.

Отбор масла производится так, чтобы исключить его соприкосновение с окружающей воздушной средой для предотвращения потерь растворенных в масле газов. Масло помещается в замкнутый объем и газ над поверхностью масла подвергается анализу на хроматографе. Оценка состояния маслонаполненного оборудования осуществляется обычно на базе следующих критериев:

- критерий предельных концентраций (водород, метан, этилен, этан, ацетилен, окись и двуокись углерода и др. газы); разложение масла и разложение целлюлозы приводят к превышению концентраций разных газов, частичные разряды приводят к появлению водорода и т.п.;
- критерий скорости нарастания концентраций газов - при ежемесячном контроле;
- критерий отношений концентраций газов - соотношение концентраций позволяет выявлять перегревы и даже температуру перегрева;
- критерий равновесия - сопоставление результатов анализа масла из газового реле и из пробы.

Хроматографический анализ газов производится на компьютерных комплексах, позволяющих автоматизировать анализ критериев и распознавать появляющиеся дефекты в оборудовании до отказа оборудования.

На заводе-изготовителе внутренняя и внешняя изоляция испытываются полными и срезанными стандартными грозowymi импульсами, а также переменным напряжением. Обнаружение повреждений продольной изоляции чаще всего проводят осциллографированием тока в нейтрали трансформатора и сравнением осциллограммы с типовой.

Если изоляция нейтрали и линейного вывода одинаковы, то при испытаниях переменным напряжением оба конца испытываемой обмотки изолируются, и на обмотку подается напряжение от постороннего источника. Если уровень изоляции нейтрали понижен, то испытания проводятся индуцированным напряжением повышенной частоты (до 400 Гц) с тем, чтобы можно было бы подавать напряжение порядка 2 Уном. Нейтраль при этом заземляется или на нее подается постороннее напряжение той же частоты. Поскольку ЭДС самоиндукции в обмотке пропорциональна частоте, то без насыщения сердечника, то есть при той же максимальной индукции В, можно приложить повышенное по сравнению с рабочим испытательное напряжение.

Кроме испытаний повышенным напряжением измеряется $\tan \delta$, сопротивление изоляции, емкостные характеристики изоляции, а полученные на заводе значения используются в эксплуатации в качестве характеристик исходного состояния изоляции.

При испытаниях изоляции должна быть испытана поочередно каждая электрически независимая цепь или параллельная ветвь (в последнем случае - при наличии полной изоляции между ветвями), а испытательное напряжение прикладывается между выводом и заземленным корпусом, все другие обмотки заземляются. Измерения сопротивления изоляции проводят до и после испытаний повышенным напряжением.

Перед первым включением вновь смонтированного трансформатора измеряют пробивное напряжение трансформаторного масла, сопротивление изоляции и коэффициент абсорбции, отношение C2/C50, $\tan \delta$ (значение которого сравнивают с результатами заводских испытаний).

Во время периодических профилактических испытаний проводят те же испытания, что и перед первым включением, но допустимые значения $\tan \delta$ при этом увеличены. Испытания изоляции повышенным напряжением при профилактических испытаниях предполагаются для обмоток напряжением 35 кВ и ниже, значения испытательных напряжений при этом снижаются до 0,85-0,9 значения заводского испытательного напряжения.

Периодичность профилактических испытаний для разных трансформаторов колеблется от 1 раза в год до 1 раза в 4 года.

Практическое занятие №3. Изоляция силовых кабелей и конденсаторов

Цель занятия: Изучение изоляции силовых конденсаторов

Задание на занятие: Рассмотрение конструкции изоляции силовых конденсаторов

Рекомендации по выполнению заданий:

Силовые конденсаторы используются в установках переменного тока для повышения коэффициента мощности («косинусные» конденсаторы), для продольной компенсации в дальних линиях электропередачи, для присоединения к воздушным линиям аппаратуры высокочастотной связи (конденсаторы связи), для отбора от линий высокого напряжения небольшой мощности и для других целей. В установках постоянного тока силовые конденсаторы работают в схемах с инверторами. В лабораторных генераторах импульсных напряжений и токов, а также в специальных установках для получения сильных магнитных полей, высокотемпературной плазмы, электрогидравлического эффекта и т. д. используются импульсные силовые конденсаторы.

Во всех случаях силовые конденсаторы выполняют свои функции за счет того, что в активной части их изоляции, т.е., в изоляции, заключенной между электродами, в некоторые моменты времени накапливается энергия, используемая затем; для разных целей. Энергия, накапливаемая в конденсаторе, равна:

где V_a – объем активной части изоляции;

$E_{раб}$ – рабочая напряженность в изоляции.

Полный объем конденсатора V приблизительно пропорционален V_a , поэтому .

Следовательно, в силовых конденсаторах целесообразно использовать изоляцию, обладающую высокой относительной диэлектрической проницаемостью ϵ и высокой длительной электрической прочностью, от которой, прежде всего, зависит значение рабочей напряженности $E_{раб}$.

Длительно допустимая напряженность в изоляции ограничивается также диэлектрическими потерями, которые являются единственным источником тепловыделений в конденсаторах (в импульсных с большими токами добавляются еще и потери в электродах). В связи с этим конденсаторная изоляция должна иметь малые диэлектрические потери, т.е. низкие значения $\tan \delta$.

Устройство силового конденсатора для повышения коэффициента мощности схематически показано на рис. 5:

Рис. 5. Схематическое устройство силового конденсатора для повышения коэффициента мощности: 1 – герметизированный корпус; 2 – рулонные секции; 3 – металлические щеки; 4 – хомут; 5 – изолирующая прокладка; 6 – изоляция от корпуса

В герметизированном корпусе расположены плоскопрессованные рулонные секции, стянутые в пакет между металлическими щеками с помощью хомутов. Между секциями установлены изолирующие прокладки из электрокартона. Изоляция от корпуса выполнена из электрокартона или кабельной бумаги. Внутренний объем конденсатора заполнен пропитывающим составом. В зависимости от номинального напряжения конденсатора и его емкости секции соединяются перемычками в параллельную, последовательную или комбинированную схему. В конденсаторах некоторых типов секции подключаются через индивидуальные предохранители. При этом работоспособность конденсатора сохраняется даже после пробоя нескольких секций.

Секция представляет собой спирально намотанный рулон из лент диэлектрика и алюминиевой фольги, выполняющей роль электродов. В рулонных секциях обе поверхности электродов являются активными, вследствие чего сокращается расход металла на электроды.

Конденсаторы разного назначения, разных номинальных напряжений и реактивной мощности устроены принципиально одинаково, т.е. состоят из пакетов секций, соединенных по той или иной схеме и расположенных в герметизированном корпусе, залитом пропиточным составом. Отличаются конденсаторы размерами, числом и схемой

соединения секций, числом пакетов и конструкцией корпуса. В одном корпусе могут находиться секции, образующие емкости всех трех фаз, сгруппированные в несколько пакетов. Иногда корпусом конденсатора служит фарфоровый или бакелитовый цилиндр с торцевыми металлическими выводами – фланцами. Пакеты в этом случае располагаются вертикально. Конструкция корпуса, размеры и компоновка секций в большой степени зависят от условий охлаждения.

В силовых конденсаторах используется бумажно-масляная изоляция. Она изготавливается из специальных сортов бумаги с плотностью $0,8 \dots 1,3$ г/см³ и толщиной $6 \dots 30$ мкм.

Чаще всего используется бумага толщиной $10 \dots 15$ мкм. Изоляция секции выполняется из шести – восьми слоев бумаги, т.е. общая толщина изоляции между электродами составляет $60 \dots 120$ мкм. При меньшем числе слоев резко падает кратковременная электрическая прочность, а при большей толщине снижается кратковременная и особенно длительная электрическая прочность, так как уменьшается напряженность появления начальных частичных разрядов.

Для пропитки конденсаторной изоляции используются специальные газостойкие минеральные масла и синтетические жидкости на основе хлордифенила. Последние являются полярными жидкостями и имеют диэлектрическую проницаемость $4,8 \dots 5,5$ вместо $2,1 \dots 2,2$ у минеральных масел. Для конденсаторной бумажной изоляции, у которой до 30 % объема занимают поры между волокнами и узкие щели между слоями бумаг, диэлектрическая проницаемость пропитывающей жидкости имеет очень большое значение. При пропитке хлорированными жидкостями эквивалентная диэлектрическая проницаемость изоляции получается примерно в 1,5 раза больше, чем при пропитке минеральным маслом. Кроме того, электрическое поле равномернее распределяется между слоями бумаги и прослойками пропитывающего состава, благодаря чему повышается кратковременная и длительная электрическая прочность и оказывается возможным повысить рабочие напряженности. В итоге силовые конденсаторы, пропитанные хлорированными жидкостями, имеют при одной и той же реактивной мощности в $2 \dots 3$ раза меньший объем, чем конденсаторы с минеральным маслом. Синтетические жидкости имеют и недостатки. Прежде всего они, как и все полярные жидкости, очень чувствительны к загрязнениям. Небольшие загрязнения вызывают резкое увеличение проводимости и диэлектрических потерь и опасность теплового пробоя. В связи с этим хлорированные жидкости требуют особо тщательной очистки перед заливкой и очень надежной герметизации корпусов конденсаторов. Другой недостаток их – токсичность. Поэтому они требуют специальных мер безопасности при изготовлении конденсаторов. Наконец, некоторые хлорированные жидкости имеют относительно высокие температуры застывания, ниже которых они значительно ухудшают свои свойства. Однако смеси трихлордифенила и пентахлордифенила могут работать при температурах до $-50 \dots -60^\circ\text{C}$.

В настоящее время большая часть силовых конденсаторов, работающих при переменном напряжении, изготавливается с пропиткой хлорированными жидкостями. Однако некоторые конденсаторы, например конденсаторы связи или конденсаторы для продольной компенсации в дальних линиях электропередачи, по-прежнему пропитываются маловязкими маслами. Рабочие напряженности в конденсаторах промышленной частоты составляют $12 \dots 14$ кВ/мм при пропитке минеральным маслом и $15 \dots 20$ кВ/мм при пропитке хлорированными жидкостями.

Для больших конденсаторных батарей экономически выгодно изготавливать крупные конденсаторы с большой единичной реактивной мощностью. Однако увеличение реактивной мощности конденсатора и его габаритов приводит к ухудшению условий охлаждения: объем изоляции и потери в ней растут пропорционально кубу, а охлаждающая поверхность – пропорционально квадрату линейных размеров. Кроме того,

при этом растет и перепад температур в самом конденсаторе. Поэтому увеличение единичных мощностей конденсаторов возможно только при существенном снижении диэлектрических потерь. Совершенствованием бумаг и пропиточных составов необходимый эффект получить не удастся.

Решением является применение комбинированной изоляции, в которой слои бумаг чередуются со слоями неполярной синтетической пленки (например, полипропилен). Такие пленки имеют $\tan \delta$ около 0,0004 против 0,003 у пропитанной бумаги, т. е. почти на порядок уменьшаются потери. Однако относительная диэлектрическая проницаемость у пленок $\epsilon_r = 2,2 \dots 2,3$, т. е. меньше, чем у бумажно-масляной изоляции. Несмотря на это за счет существенного снижения потерь удастся повысить рабочую напряженность и создать конденсаторы с единичной реактивной мощностью до 400 квар и хорошими экономическими показателями.

В комбинированной изоляции слои бумаг выполняют роль фитилей, с помощью которых обеспечивается надежная полная пропитка всей изоляции. Без прослоек из бумаги между слоями пленки в опрессованных секциях могут остаться полости, не заполненные пропитывающей жидкостью, что приведет к появлению мощных частичных разрядов и быстрому разрушению изоляции.

Испытания изоляции силовых конденсаторов. При контрольных испытаниях на заводе конденсаторы подвергаются воздействию повышенного испытательного напряжения, у них измеряются емкость и сопротивление изоляции.

В условиях эксплуатации проверяются герметичность корпусов, отсутствие утечки масла. Затем измеряется сопротивление изоляции с предварительной выдержкой под напряжением в течение 1 мин и проверяется емкость конденсатора.

Практическое занятие №4. Методы испытания изоляции

Цель занятия: Изучение методов испытания электрической изоляции.

Задание на занятие: Изучение требований к видам и методам испытаний.

Рекомендации по выполнению заданий:

В процессе эксплуатации на изоляцию воздействуют электрические, механические и тепловые нагрузки, вызывающие постепенное ухудшение ее свойств, связанное с уменьшением сопротивления изоляции, ростом диэлектрических потерь, снижением электрической прочности. Процесс ухудшения свойств называют старением изоляции. Эти изменения носят, как правило, необратимый характер и завершаются пробоем изоляции, что ограничивает сроки службы изоляционных конструкций.

Различают четыре основных вида воздействия на изоляцию и четыре процесса старения изоляции:

электрические нагрузки, связанные с возможной ионизацией при большой напряженности электрического поля - электрическое старение изоляции;

тепловые нагрузки, приводящие к постепенному разложению или появлению трещин в изоляции - тепловое старение изоляции;

механические нагрузки, связанные с возникновением и развитием трещин в твердой изоляции - механическое старение;

проникновение влаги из окружающей среды - увлажнение изоляции.

Возникающие в изоляции дефекты подразделяются на сосредоточенные (трещины, газовые включения, эрозия, увлажнение небольшого объема изоляции) и распределенные, охватывающие значительный объем или поверхность изоляции.

Электрическое старение твердой изоляции происходит из-за возникновения разрядных процессов в толще изоляции. Электрическое старение может иметь место при средней

напряженности электрического поля на промежутке, много меньшей (в 5...20 раз) кратковременной электрической прочности изоляции. С увеличением напряжения темпы электрического старения возрастают. Основной причиной электрического старения внутренней изоляции являются частичные разряды, то есть такие разрядные процессы в изоляции, которые распространяются лишь на часть изоляционного промежутка. Они возникают в ослабленных местах изоляции: в газовых включениях, в местах резкого усиления напряженности поля. Наибольшую опасность представляют частичные разряды в газовых включениях, так как они возникают при меньших напряжениях, чем разряды в жидких или твердых компонентах твердой изоляции. Последнее обстоятельство связано с меньшей диэлектрической проницаемостью газового промежутка и соответственно большей напряженностью электрического поля в нем, а также с малой электрической прочностью газа по сравнению с твердой или жидкой изоляцией. Закономерности развития частичных разрядов можно проиллюстрировать схемой замещения, где изображен газовый пузырь в твердой изоляции и схема замещения изоляции. (рис. 6)

Рис. 6. Схема развития частичных разрядов в газовом включении

Св - емкость газового включения, Ст - емкость части изоляции, включенной последовательно с газовым включением, Са - емкость оставшегося массива изоляции. При подаче на изоляцию переменного напряжения на воздушном включении также будет изменяющееся во времени напряжение, определяемое емкостным делителем:

и при достижении этим напряжением пробивного напряжения газового включения $U_{в-пр}$ происходит пробой газового включения с резким снижением напряжения на нем до уровня напряжения гашения $U_{в-г}$, которое меньше пробивного напряжения. После этого, если напряжение на всей изоляции продолжает возрастать, то снова начинается рост напряжения и на газовом включении и может произойти новый пробой, то есть в газовом включении происходят многократные пробои промежутка. Графическое изображение зависимости напряжений от времени показаны при условии подачи напряжения в нулевой момент времени. (рис. 7)

Рис. 7. Зависимость напряжений от времени при частичных разрядах

Под действием частичных разрядов происходит постепенное разрушение микрообъемов изоляции, размеры газового включения растут в направлении электрического поля, и этот процесс завершается пробоем изоляции.

Эффективным средством борьбы с частичными разрядами является пропитка изоляции. Замена воздуха жидким диэлектриком с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r > 1$ увеличивает емкость Св, снижая напряжение на воздушном включении; кроме того, электрическая прочность жидкого диэлектрика существенно больше электрической прочности газа.

Тепловое старение внутренней изоляции возникает за счет ускорения различных химических реакций при рабочих температурах изоляции, обычно лежащих в пределах от 60оС до 130оС. Химические реакции приводят к постепенному изменению структуры и свойств материалов и к ухудшению изоляции в целом.

Для твердой изоляции наиболее характерным является постепенное снижение механической прочности в процессе теплового старения, что приводит к повреждению изоляции под действием механических нагрузок и затем к ее пробую. В жидких диэлектриках продукты разложения загрязняют изоляцию и снижают ее электрическую прочность. Для органической изоляции повышение температуры на 10оС снижает срок

службы изоляции вдвое; в сложной изоляции силовых трансформаторов процесс теплового старения протекает быстрее, чем по десятиградусному правилу. Старение изоляции возникает и при механических нагрузках на твердую изоляцию. Сущность этого вида старения заключается в том, что в напряженном материале возникает упорядоченное движение локальных микродефектов, и за счет этого образуются и постепенно увеличиваются в размерах микротрещины. При действии сильных электрических полей в микротрещинах возникают частичные разряды, ускоряющие разрушение изоляции.

Увлажнение изоляции может рассматриваться как одна из форм старения изоляции. Влага проникает в изоляцию главным образом из окружающего воздуха. При этом происходит уменьшение сопротивления изоляции, рост диэлектрических потерь, связанный с дополнительным нагревом изоляции и ускоряющий тепловое старение изоляции. Неравномерное увлажнение, кроме того, приводит к искажению электрического поля и снижает пробивное напряжение изоляции.

Увлажнение - процесс в принципе обратимый, влага может быть удалена из изоляции сушкой. Однако сушка крупногабаритных конструкций требует вывода оборудования из строя на длительное время, а в ряде случаев извлечение влаги из изоляции затруднено или невозможно, например, практически не поддается сушке бумажно-масляная изоляция кабелей, вводов и другого оборудования.

Для снижения увлажнения применяют герметизацию конструкций, воздухоосушители, гибкие диафрагмы и другие методы.

Основные виды профилактических испытаний изоляции

Перечисленные выше механизмы старения изоляции не исчерпывают все воздействующие на изоляцию факторы. Дополнительно на изоляцию воздействуют загрязнения, внешний перегрев, перенапряжения, короткие замыкания. Влияние этих факторов на характеристики изоляции представлено в табл. 2:

Таблица 2.

Фактор	Изменение
Увлажнение	Уменьшение сопротивления, Увеличение емкости, Увеличение $\text{tg}\delta$, Повышение температуры, Повышение давления во вводах, Снижение пробивного напряжения трансформ. масла, Изменение химического состава, Частичные разряды
Загрязнение	Уменьшение сопротивления, Увеличение $\text{tg}\delta$, Повышение температуры, Снижение пробивного напряжения трансформ. масла, Изменение химического состава, Частичные разряды
Перенапряжения	Пробой изоляции, Частичные разряды
Перегрев	Уменьшение сопротивления, Увеличение $\text{tg}\delta$, Повышение давления во вводах, Изменение химического состава, Частичные разряды
Короткие замыкания	Внешние воздействия на изоляцию

Дефекты в изоляции подразделяются на сосредоточенные (трещины и микротрещины, газовые включения, эрозия, увлажнение небольшого объема) и распределенные, охватывающие значительные объемы или поверхности изоляции. Возможности обнаружения разных видов дефектов значительно различаются, однако классификация методов диагностики и испытаний изоляции производится по признаку возможного разрушения изоляции в процессе контроля. По этому признаку все методы контроля изоляции подразделяются на три группы:

- неразрушающие методы контроля, производимые при напряжениях, меньших рабочих, и основанные на явлениях, возникающих в слабых электрических полях (электропроводность и поляризационные явления) и связанных с пробивным напряжением изоляции;
- неразрушающие методы контроля, производимые при рабочих напряжениях, - в

основном это контроль частичных разрядов, а также тепловой и ультразвуковой контроль;
 - разрушающие методы контроля, связанные с использованием напряжения, повышенного по сравнению с рабочим напряжением и вызывающего ускоренное разрушение изоляции в дефектном месте; приложение повышенного напряжения не исключает появления дефекта, который может привести к пробое изоляции во время эксплуатации.

Кроме того, методы контроля подразделяют на две группы по электрическому признаку:

- электрические методы контроля изоляции, которые рассмотрены далее;
- неэлектрические методы контроля: хроматографический анализ газов в трансформаторном масле, ультразвуковые методы контроля, радиоволновой метод, тепловизионный метод, оптикоэлектронный метод, рентгенографический метод.

Практическое занятие №5. Атмосферные перенапряжения

Цель занятия: определение амплитуды напряжения, действующего на гирлянду изоляторов опоры, ближайшей к месту удара молнии.

Задание на занятие: Молния поражает не защищенный тросом провод линии. Определить амплитуду напряжения, действующего на гирлянду изоляторов опоры, ближайшей к месту удара молнии. Волновое сопротивление канала молнии Z_0 , Ом, волновое сопротивление провода с учетом импульсной короны Z_k , Ом. Ток молнии (статистический) I_m , кА. Значения Z_0 , Z_k , I_m приведены в табл. 3:

Таблица 3.

Величина и единица измерения	Номер варианта по последней цифре шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Z_0 , Ом		250	260	270	280	290	300	310	320	330
Z_k , Ом		300	310	320	330	340	350	340	330	320
I_m , кА	60	70	80	90	100	1100	120	130	140	150

Рекомендации по выполнению заданий:

Амплитуду волны перенапряжения, распространяющейся по проводу в обе стороны и достигающей гирлянды, получим, считая, что при ударе в провод действительный ток вдвое меньше статистического, а эквивалентное волновое сопротивление двух проводов вдвое меньше сопротивления одного провода:

Практически тот же результат можно получить, используя схему замещения по Петерсену, содержащую волновое сопротивление канала молнии и эквивалентное сопротивление двух лучей провода:

где U - напряжение падающей волны.

Практическое занятие №6. Квазистационарные и феррорезонансные перенапряжения

Цель занятия: Изучение возможности возникновения феррорезонанса в распределительных устройствах 150-500 кВ.

Задание на занятие: освоение методики определения возможности возникновения феррорезонанса в распределительных устройствах 150-500 кВ с электромагнитными трансформаторами напряжения и выключателями, содержащими емкостные делители напряжения.

Рекомендации по выполнению заданий:

До проведения мероприятий по предотвращению феррорезонанса в распределительных устройствах электростанций и подстанций должно быть выполнено следующее:

1) Выявлены распределительные устройства 150-500 кВ электростанций и подстанций энергосистемы и схемы распределительных устройств, в которых возможно возникновение феррорезонанса, с учетом схем, приведенных на рис. 8:

Рис. 8. Принципиальные электрические схемы распределительных устройств 110-500 кВ, в которых возможно возникновение феррорезонанса

2) Составлены первичная и упрощенные схемы замещения распределительных устройств (частей распределительных устройств) 150-500 кВ, в которых возможен феррорезонанс (рис. 9 и 10):

Рис. 9. Первичная схема электрических соединений части ОРУ 500 кВ

Рис. 10. Схемы замещения части ОРУ 500 кВ: а - с электромагнитным трансформатором напряжения при снятом с него напряжении; б - эквивалентная; L - индуктивность трансформатора напряжения; R - активное сопротивление обмотки ВН; E - ЭДС сети

,
где СВ - сумма результирующих значений емкостей конденсаторов, шунтирующих контакты воздушных выключателей ОРУ;

C_S - сумма значений емкостей, электрооборудования, ошиновки и шин ОРУ по отношению к земле.

3) Определена (предварительно) возможность существования феррорезонанса по известным результирующим значениям емкостей конденсаторов, шунтирующих контакты воздушных выключателей, и емкостям системы шин по отношению к земле или участка распределительного устройства (рис. 11):

Рис. 11. Области существования феррорезонанса напряжений на частоте 50 Гц $U=U_{наиб.р.}$): - резонанс есть; - резонанса нет

.
4) Уточнены возможность существования феррорезонанса и параметры этого режима с использованием программы расчета на ЭВМ.

5) Оценен феррорезонанс по наибольшим уровням возникающих резонансных повышений напряжения на трансформаторе напряжения с использованием программы расчета. Выявление схем распределительных устройств, в которых возможен феррорезонанс, должно производиться для нормальных и "ремонтных" схем, а также для схем, возникающих в процессе оперативных переключений и после автоматических отключений от действия релейной защиты и автоматики.

Возможность существования феррорезонанса с помощью расчета на ЭВМ должна находиться для диапазона изменения напряжения, определяемого по минимальному уровню его, имеющему место в процессе эксплуатации в данной точке сети, и по максимально допустимому.

При составлении схем замещения распределительных устройств следует использовать паспортные (измеренные в процессе эксплуатации) значения емкостей частей

распределительных устройств и оборудования, паспортные (измеренные в процессе эксплуатации) значения емкостей делителей напряжения выключателей.

При выявлении схем распределительных устройств, в которых возможен феррорезонанс, рекомендуется учитывать возникновение неполнофазных режимов, вызываемых неполнофазными коммутациями воздушных выключателей при оперативных переключениях и автоматических коммутациях, что увеличивает вероятность возникновения феррорезонанса и уровень повышения напряжения (рис. 12):

Рис. 12. Схема неполнофазного питания системы шин ОРУ после автоматического отключения присоединений от системы шин

Практическое занятие №7. Коммутационные перенапряжения

Цель занятия: Изучение условий возникновения и способов исключения коммутационных перенапряжений.

Задание на занятие: Изучение условий возникновения и способов исключения коммутационных перенапряжений.

Рекомендации по выполнению заданий:

Внутренние перенапряжения возникают вследствие перераспределения электромагнитной энергии, накопленной в индуктивностях и емкостях, причем безразлично сосредоточенные или распределенные это элементы. Это перераспределение происходит при изменении работы схемы, как в нормальном режиме – включение и отключение элементов, так и в аварийном – короткое замыкания, обрыв провода и т.д. Внутренние перенапряжения также называются коммутационными.

а) б)

в) г)

д)

Рис. 13.

Внутренние перенапряжения связаны с образованием в схемах сложных по форме, чаще всего колебательных перенапряжений с амплитудами порядка $4-5$ значительной длительности до 10^{-2} сек, что вызывает пробой изоляции и тяжелые аварии.

Перенапряжения при отключении линии на холостом ходу.

Линия на холостом ходу длиной l с волновым сопротивлением $Z_{\text{в}}$ отключается от источника бесконечной мощности с напряжением U_0 . Обычно такое отключение производится, когда ток проходит через 0 и на линии $U=0$, предположим $U_0=U_0 \sin \omega t$.

Через $0,5$ периода после отключения напряжения источника будет $U=U_0$, разность потенциалов на контактах выключателя $2U_0$, произойдет пробой контактного промежутка и загорится повторная дуга (рис. 13(б)).

Линия будет перезаряжаться, на ней будет устанавливаться $U=U_0$, т.е. по линии пойдет волна напряжения с амплитудой U_0 и волна тока I_0 .

Дойдя до конца линии, волна напряжения отразится с удвоением амплитуды и пойдет обратно в сторону выключателя, на линии будет устанавливаться напряжение (рис. 13(в)).

Волна тока отражается с обратным знаком, т.е. по линии идет ток .

В начале линии +3 , а на выводах генератора сменится полярность напряжения до - , т.е. разность потенциалов на контактах выключателя 4 и возможно новое повторное зажигание дуги, после которого на линии будет устанавливаться напряжение , т.е. по ней пойдет волна (г). Отраженная волна вернется к выключателю (рис. 13(д)).

Теоретически в линии без потерь можно получить сколь угодно большое напряжение. В реальных линиях происходит затухание волны и более двух повторных зажиганий дуги не бывает, но и в этом случае

Из-за сложности теоретического расчета такие перенапряжения обычно изучаются на модели. (рис. 14)

Рис. 14.

Такие перенапряжения современная изоляция выдерживает. Но они приводят к ускоренному старению изоляции.

В качестве мер борьбы с перенапряжениями можно предложить:

Не отключать ЛЭП на холостом ходу.

Применять быстродействующие выключатели, уменьшающие вероятность повторного зажигания дуги.

Применение сдвоенных выключателей - ,
которые позволяют ограничить перенапряжение до 2,5 .

Применение ограничителей перенапряжения

Ограничители перенапряжения – весьма эффективное современное средство по ограничению перенапряжений до безопасной величины. Их применение ограничивается длительностью прохождения тока , где

C- емкость линии 1 мкФ на 100 км

- сопротивление ограничителя перенапряжения 100 Ом,
т.е. = 100 мкс/100 км ЛЭП.

Практическое занятие №8. Средства защиты от перенапряжений

Цель занятия: Изучение средств защиты от перенапряжений.

Задание на занятие: Изучить средства защиты от перенапряжений.

Рекомендации по выполнению заданий:

Для защиты линий и оборудования подстанций от перенапряжений используют следующие устройства:

- искровые промежутки, разрядники и ОПН для защиты отдельных точек на линии;
- тросы и заземления опор на линиях;
- роговые разрядники, трубчатые разрядники на контактной сети;
- молниеотводы;
- разрядники и ОПН на подстанциях;
- в отдельных случаях - конденсаторы для снижения грозовых перенапряжений.

Защитное действие тросов и молниеотводов основано на отводе тока молнии от защищаемого оборудования. Остальные защитные устройства выполняют две функции:

- присоединение защищаемой цепи к заземлителю при воздействии перенапряжения (непосредственная защитная функция);

- отключение защищаемой цепи от заземления при окончании действия перенапряжения, что часто связано с отключением возникшего короткого замыкания в защищаемой цепи.

1. Искровые промежутки и роговые разрядники

Искровые промежутки являются самым простым и дешевым устройством защиты от перенапряжений, в настоящее время применяется редко. В сетях напряжением 3...35 кВ могут выполняться в виде рогов, способствующих растягиванию и гашению дуги из-за электродинамических сил и тепловых потоков. В сетях до 35 кВ длина защитного промежутка мала, и для предотвращения замыкания промежутка птицами в заземляющих спусках создаются дополнительные искровые промежутки.

Параметры искровых промежутков (табл. 4):

Таблица 4.

Параметр	Номинальное напряжение, кВ				
	3	6	10	35	110
Длина основного промежутка, мм	20	40	60	250	650
Длина дополнительного промежутка, мм	5	10	15	30	-
Амплитуда пробивного напряжения 50 Гц, кВ ампл.	28	48	63	148	356
Импульсное пробивное напряжение, кВ (для отрицательного импульса)	34	52	67	220	510

Искровые промежутки обладают целым рядом недостатков, основные из которых следующие:

- срабатывание искровых промежутков приводит к короткому замыканию, которое должно отключаться выключателями; при переходном процессе среза напряжения могут возникнуть перенапряжения на продольной изоляции трансформаторов, реакторов и электрических машин;
- большой статистический разброс пробивных напряжений затрудняет координацию изоляции;
- вольт-секундная характеристика искрового промежутка из-за резкой неоднородности поля имеет подъем в области малых времен, соответствующих грозovým перенапряжениям, и защищаемая изоляция может остаться незащищенной. (рис. 15)

Рис. 15. Вольт-секундные характеристики изоляции (1) и искрового промежутка с резконеоднородным полем (2)

Достаточно широко применяемые на контактной сети роговые разрядники выполняются либо с одним искровым промежутком, либо с двумя искровыми промежутками. Действующие «Правила устройства и технической эксплуатации контактной сети» требуют применения роговых разрядников с двумя искровыми промежутками. (рис. 16)

Рис. 16. Роговые разрядники, применяемые на контактной сети

Параметры роговых разрядников приведены в табл. 5:

Таблица 5.

Параметр	С одним искр. промежутком			С двумя искровыми промежутками		
Напряжение к/с, кВ	3.3	3.3	25			
Расстояние, мм	10..11	4,5..5,5	40..50			
Амплитуда пробивного напряжения 50 Гц, кВ ампл.	33	33	95			
Импульсное пробивное напряжение, кВ	35	25	190			
Наибольший ток, при котором дуга может погаснуть самостоятельно, кА	3	7	-			
Время гашения дуги, с	0,25..0,6	0,2..0,6	-			

Способность гашения дуги роговым разрядником сильно зависит от скорости и направления ветра. Дуга гаснет быстрее при направлении ветра перпендикулярно

плоскости разрядника.

2. Трубчатые разрядники

Трубчатые разрядники представляют собой разновидность искровых промежутков, дополненных приспособлением для принудительного гашения дуги, которое выполнено в виде трубки из газогенерирующего материала (винипласт или менее прочный фибробакелит). Защитная функция трубчатым разрядником выполняется так же, как и простым искровым промежутком, с теми же недостатками; отключение дуги сопровождающего тока короткого замыкания производится из-за интенсивного газовыделения трубкой при повышенной температуре горения дуги. Специфическим недостатком трубчатого разрядника является наличие зоны выхлопа разрядника. (рис. 17)

Рис. 17. Устройство трубчатого разрядника и вольт-секундные характеристики разрядника РТФ-35/0,8-5 при $l_2=60$ мм (1), $l_2=40$ мм (2), рогового разрядника 2x50 мм (3)

В соответствии с выполняемыми функциями трубчатый разрядник характеризуется двумя группами параметров. К первой группе относится номинальное напряжение, пробивное напряжение промышленной частоты, импульсное пробивное напряжение и вольт-секундная характеристика. Ко второй группе относятся нижний и верхний пределы отключаемых токов.

Основное применение трубчатых разрядников сводится к защите подходов к подстанциям, защите оборудования маломощных подстанций 3-10 кВ и защита контактной сети переменного тока.

3. Вентильные разрядники

Вентильные разрядники являются другой разновидностью искровых промежутков, отличающихся слабой неоднородностью электрического поля и нелинейным резистором для гашения дуги. Защитная функция вентильным разрядником выполняется так же, как и простым искровым промежутком, но в связи с однородностью электрического поля вольт-секундная характеристика разрядника существенно лучше, чем у трубчатого, и меньше статистический разброс пробивных напряжений. Отключение возникшего короткого замыкания производится с помощью нелинейного резистора, включенного последовательно с искровым промежутком; сопротивление этого резистора велико при рабочем напряжении и резко снижается при повышенном напряжении.

Простейший единичный промежуток вентильного разрядника показан на рис. 18:

Рис. 18. Единичный искровой промежуток с неподвижной дугой (а) и вид вольт-секундной характеристики разрядника с многократным искровым промежутком (б)

Промежуток составлен двумя латунными электродами, разделенными миканитовой шайбой.

Единичные промежутки включаются последовательно друг с другом для улучшения гашения дуги, которая нестабильна в небольшом промежутке с холодными электродами. У многократного искрового промежутка, однако, происходит неравномерное распределение напряжения на отдельных промежутках, аналогично гирлянде изоляторов, что приводит к снижению пробивного напряжения при малых временах порядка 2-4 мкс (б).

Группа характеристик вентильного разрядника, определяющая его защитную функцию, составлена следующими характеристиками:

- номинальное напряжение;
- наибольшее допустимое длительное напряжение на разряднике;
- пробивное напряжение на частоте 50 Гц (обычно действующее значение);
- остающееся напряжение на сопротивлении резистора при определенном импульсном

токе (от 5 до 14 кА, в зависимости от типа разрядника), называемом током координации (рис. 19):

Рис. 19. Вольтамперная характеристика резистора вентильного разрядника (а) и напряжение на вентильном разряднике при его срабатывании (б)

Функция отключения характеризуется напряжением гашения - это наибольшее напряжение промышленной частоты на разряднике, при котором надежно обрывается сопровождающий ток (ток гашения).

Еще одной характеристикой разрядника является его пропускная способность, то есть минимальное количество нормированных импульсов тока, который разрядник должен выдержать без существенного изменения его свойств. Это количество обычно равно 20. Таким образом, и защитная функция, и отключение короткого замыкания определяются как искровым промежутком, так и нелинейным резистором.

4. Нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН)

Основным недостатком вентильного разрядника является сравнительно невысокая нелинейность резисторов на основе карбида кремния. Значительно большей нелинейностью обладают резисторы на основе окиси цинка. Выполненные на их базе ОПН позволяют ограничивать коммутационные перенапряжения на уровне (1,65..1,8)ф, а грозовых - на уровне (2,2..2,4)ф.

Высоконелинейные окисно-цинковые резисторы выпускаются в виде дисков диаметром от 28 до 85 мм. ОПН выполняется путем последовательного и параллельного включения таких резисторов. При рабочем напряжении через одну параллельную колонку резисторов протекает ток в доли миллиампера, и необходимость в искровом промежутке отпадает. Защитная функция ОПН характеризуется величиной остающегося напряжения при определенной величине протекающего тока коммутационного или грозового перенапряжения. Понятия напряжения гашения у ОПН нет, однако есть наибольшее рабочее напряжение ОПН, выше которого может произойти разогрев и разрушение ОПН. Кроме того, ОПН характеризуют величиной номинального напряжения, которая указывается в маркировке ОПН.

Основные принципы грозозащиты линий

Высокую надежность грозозащиты воздушных линий электропередачи обеспечивают следующие мероприятия:

- подвеска грозозащитных тросов с достаточно малыми углами защиты;
- снижение импульсного сопротивления опор;
- повышение импульсной прочности изоляции линий и снижение вероятности установление дуги (в частности, этому способствует использование деревянных траверс и опор);
- применение изолированной нейтрали или дугогасящего реактора;
- использование автоматического повторного включения линий.

Для линий напряжением 220 кВ и выше, сооружаемых обычно на металлических или железобетонных опорах, основным средством грозозащиты являются тросы, располагаемые над фазными проводами. Импульсное сопротивление заземлений опор, к которым присоединяются тросы, должно быть не более 15 Ом для линий 220 кВ, а для линий 110 кВ с железобетонными опорами - не более 20 Ом. При грунтах с удельным сопротивлением более 1000 Ом*м разрешаются более высокие значения сопротивления заземлений. Для уменьшения потерь энергии, возникающих из-за наведенного напряжения 50 Гц в контуре земля-опора-трос-опора-земля, заземление тросов производят не на каждой опоре, подвешивая трос на одном-двух изоляторах, зашунтированных искровым промежутком. Дополнительным средством уменьшения грозопоражаемости линий 220 кВ и выше является использование АПВ.

Линии напряжением 110-150 кВ на металлических и железобетонных опорах также обычно защищаются по всей длине тросами. Эксплуатация линий 110 кВ без тросов допускается в районах с числом грозочасов в году менее 20, при высоких удельных сопротивлениях грунта, в особо гололедных районах, в районах с коррозионным загрязнением атмосферы, в горных местностях с возвышающимися горными массивами. Линии 110-150 кВ на деревянных опорах не требуют подвески грозозащитных тросов в связи с высокой импульсной прочностью изоляции таких линий. Применение АПВ также повышает надежность грозозащиты таких линий.

Линии 35 кВ на металлических опорах защищаются тросами лишь в особо ответственных случаях. Линии 35 кВ на деревянных опорах имеют более высокую надежность грозозащиты. Линии напряжением 3-20 кВ не оборудуются тросовой защитой и защищаются от грозовых перенапряжений с помощью дугогасящего реактора или изолированной нейтрали и АПВ.

Дополнительные меры защиты (с помощью разрядников) должны быть использованы в следующих случаях:

- пересечения линий электропередачи между собой или с другими линиями;
- опоры со сниженной электрической прочностью изоляции и высокие опоры переходных пролетов;
- ответвления к подстанциям на отпайках и секционирующие разъединители на линиях;
- кабельные вставки на линиях.

Основные принципы защиты подстанций

Надежность защиты подстанций от перенапряжений должна быть значительно выше надежности защиты линий, поскольку ущерб от повреждения здесь значительно больше, а уровень изоляции ниже. Основные принципы защиты оборудования подстанций сводятся к следующему:

защита от прямых ударов молнии стержневыми молниеотводами;

защита оборудования от волн, приходящих с линии, с помощью разрядников или ОПН;

защита подходов линий от прямых ударов молнии.

Зоны защиты молниеотводов определены опытным путем исходя из того, что вероятность прорыва молнии в защищаемый объект не превосходит 0,05 (одно попадание прямого удара из двадцати ударов), иногда – 0,005.

Для успешной защиты оборудования от волн, набегающих с линии, разрядник должен иметь пробивное и остающееся напряжение ниже допустимого на защищаемом объекте на некоторую величину, называемую интервалом координации, который должен составлять не менее 15% уровня допустимого напряжения. Особенностью перенапряжений на подстанции является их существенная зависимость от крутизны фронта набегающей волны и слабая зависимость от амплитуды набегающей волны. Амплитуда влияет лишь на величину остающегося напряжения, слабо меняющегося благодаря пологой вольтамперной характеристике нелинейного резистора разрядника или ОПН. Величина перенапряжения зависит от крутизны набегающей волны потому, что при прохождении волны от объекта до разрядника (если объект оказался первым по ходу волны) и обратной волны от сработавшего разрядника до объекта подъем напряжения на объекте за время двойного пробега прямо определяется скоростью нарастания напряжения падающей волны.

При продвижении волны вдоль линии фронт волны сглаживается (удлиняется) за счет импульсной короны, потерь в земле и в проводах, поэтому выполняют защиту подходов линий от прямых ударов молнии на определенной длине, что к тому же снижает величину тока в разрядниках подстанции. Количество и места установки ОПН и разрядников выбирают так, чтобы расстояние между разрядниками и защищаемыми объектами не превышало безопасной величины (от 30 м до 150 м для разных случаев) (рис. 20).

Рис. 20. Схема защищенного подхода линии электропередачи

При защите подхода линии грозозащитные тросы подвешивают даже в случае их отсутствия на других участках линии, трос заземляют на каждой опоре, а сопротивление заземления опоры выдерживают на уровне не более 10-20 Ом. В начале подхода устанавливают трубчатый разрядник, способствующий ограничению амплитуды тока в разряднике подстанции. Второй трубчатый разрядник РТ2 предназначен для защиты выключателя. На подстанциях напряжений 110-220 кВ обычно устанавливают один комплект разрядников на каждую систему шин. Длина защищаемого подхода составляет обычно 1-2 км.

Подстанции напряжением 3..20 кВ имеют обычно кабельные вводы, поскольку подвести к подстанции большое число воздушных линий сложно. Обобщенная схема защиты от перенапряжений такой подстанции показана на рис. 21:

Рис. 21. Обобщенная схема защиты подстанции 3-20 кВ

Наличие кабельной вставки на входе такой подстанции обычно не обеспечивает достаточной грозоупорности подстанции из-за неизбежных многократных отражений волн в кабельной линии. Поэтому в месте соединения воздушной линии с кабельной устанавливают вентильный или трубчатый разрядник для ограничения приходящей волны. Вентильный разрядник в конце кабеля устанавливается из-за возможности повреждения кабельной муфты из-за удвоения волны при отключенном выключателе.

5.1.2 Методические указания для обучающихся по лабораторным работам:

Лабораторная работа № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

ПО ГИРЛЯНДЕ ИЗОЛЯТОРОВ

Цель работы:

- исследование распределения напряжения по гирлянде изоляторов и влияния защитной арматуры на распределение напряжения;
- ознакомление с методикой определения распределения напряжения по гирлянде изоляторов в лаборатории (методом разрядника) и в условиях эксплуатации (при помощи измерительной штанги);
- исследование распределения потенциала вдоль поверхности опорных и проходных изоляторов и экранирующего влияния шин на распределение потенциала;
- практическое усвоение методики исследования распределения напряжения вдоль поверхности высоковольтных изоляторов в лаборатории методом разрядника.

1.1 Общие сведения

Для получения нужных электрических и механических характеристик изоляционные конструкции для напряжения 35 кВ и выше, как правило, выполняются сборными из нескольких элементов более низкого класса напряжения.

Так, для изоляции проводов линий электропередач, подвесные изоляторы соединяются в гирлянды, количество изоляторов зависит от номинального напряжения линии и типа изоляторов.

Переменное и импульсное напряжения распределяются по изоляторам гирлянды неравномерно. С увеличением числа изоляторов в гирлянде неравномерность возрастает. Если не принять специальные меры, на линиях высокого напряжения (220 кВ и выше) часть изоляторов в гирляндах может оказаться под таким напряжением, что на этих изоляторах уже при рабочем напряжении и нормальных атмосферных условиях возникает «корона», которая станет источником радиопомех и причиной ускоренной

коррозии арматуры, вызовет дополнительные потери энергии.

В линиях электропередач между проводом и опорой возникает неоднородное поле, что приводит к неравномерному распределению напряжения вдоль гирлянды изоляторов. Распределение напряжения вдоль гирлянды подвесных изоляторов удобно рассматривать на схеме замещения (рис. 5.1).

Рис. 5.1. Гирлянда изоляторов (а) и схема замещения гирлянды (б)

При промышленной частоте и незначительных активных токах утечки схему замещения можно рассматривать в виде емкостных цепочек. На схеме рис. 5.1, б: $C = 30 \pm 70$ пФ – собственная емкость подвесного фарфорового или стеклянного изолятора; $C_2 = 0,5 \pm 1$ пФ – емкость изолятора по отношению к проводу; $C_1 = 4 \pm 5$ пФ – емкость изолятора по отношению к земле.

Не допуская больших погрешностей, для гирлянд 35–220 кВ с нерасщепленными фазами (один провод на фазу) можно считать, что емкости C_1 и C_2 всех изоляторов в гирлянде одинаковы. Рассмотрим распределение напряжения U по гирлянде изоляторов. Для оценки влияния на распределение напряжения условно рассмотрим следующие случаи:

- а) $C_1 = 0$; $C_2 = 0$; $C \neq 0$;
- б) $C_1 \neq 0$; $C_2 = 0$; $C \neq 0$;
- в) $C_1 = 0$; $C_2 \neq 0$; $C \neq 0$;
- г) $C_1 \neq 0$; $C_2 \neq 0$; $C \neq 0$.

1. Предположим, что емкости на провод и землю отсутствуют, т. е. $C_1 = 0$, $C_2 = 0$. Тогда для зарядки емкости C будет протекать ток i_c . Приняв, что все изоляторы однотипны, падения напряжения на каждом изоляторе $\Delta U_1 = i_c \cdot x_{c1}$ будут одинаковы, напряжение равномерно распределено по гирлянде (рис. 5.2, зависимость 1).

Рис. 5.2. Распределение напряжения на гирлянде подвесных изоляторов

2. Допустим, что $C \neq 0$; $C_1 \neq 0$; $C_2 = 0$. Для заряда емкости C необходим ток i_c , для заряда емкости C_1 необходим ток i_{c1} . Из схемы (рис. 5.1, б) видно, что по первому от провода изолятору по емкости C будет протекать ток, равный сумме тока собственной емкости и токов для заряда емкости на землю:

$$i_1 = i_c + \sum_{i=1}^n i_{c1i}$$

По мере расположения изолятора ближе к земле (опоре), ток, протекающий по собственной емкости, будет уменьшаться. Таким образом, наибольшее падение напряжения будет на изоляторе у провода (рис. 5.2, кривая 2).

3. По аналогии примем $C \neq 0$; $C_2 \neq 0$; $C_1 = 0$. Для этого случая по собственной емкости первого от провода изолятора будет протекать ток i_c , по последнему изолятору собственный ток и сумма токов для зарядки емкостей C_2 , тогда по последнему изолятору ток можно определить как

$$i_{(n)} = i_{(c)} + \sum_{i=1}^n i_{c2i}$$

Протекание наибольшего тока по собственной емкости последнего изолятора вызовет наибольшее падение напряжения (рис. 5.2, кривая 3).

4. Реальная схема замещения будет, когда $C \neq 0$; $C_1 \neq 0$; $C_2 \neq 0$. В этом случае для заряда емкостей C_1 и C_2 по собственной емкости будет протекать суммарный ток, который вызовет падение напряжения неравномерно по всем изоляторам. Это распределение можно получить, сложив кривые 2 и 3 (рис. 5.2, кривая 4).

Учитывая то, что емкость на землю значительно больше, чем на провод, результирующее

распределение напряжения будет происходить по кривой 4 (рис. 5.2). Наибольшее падение напряжения – на первом изоляторе, наименьшее – в средних изоляторах. Чем больше изоляторов в гирлянде, тем заметнее неравномерность распределения напряжения по ее элементам.

Выравниванию распределения напряжения вдоль гирлянды изоляторов способствует применение специальной арматуры в виде колец, восьмерок, овалов, которые укрепляются в месте подвески провода. Такая арматура увеличивает емкость C_2 (рис. 5.1) изоляторов, ближайших к проводу, и тем самым уменьшает долю напряжения, приходящуюся на эти изоляторы.

Распределение напряжения вдоль гирлянды подвесных изоляторов в условиях лаборатории удобно определять с помощью шарового разрядника.

Сущность определения распределения напряжения по гирлянде изоляторов методом разрядника заключается в следующем.

Шаровой разрядник с неизменным расстоянием между электродами устанавливается поочередно на всех элементах гирлянды (рис. 5.3).

Рис. 5.3. Схема экспериментальной установки: О.К. – опорная конструкция; З.И. – защитный изолятор; Р – шаровой разрядник (диаметром 25 мм); 1,2...n, к – гирлянда подвесных изоляторов ($k = 6$)

Напряжение, проводимое ко всей гирлянде от высоковольтного аппарата, плавно поднимается до полного пробоя воздушного промежутка разрядника.

Напряжение на любом изоляторе в долях от общего напряжения гирлянды определяется по формуле

(5.3)

где U_p – пробивное напряжение разрядника, кВэф; U_k – напряжение, приложенное к гирлянде, при котором происходит пробой разрядника, шунтирующий k -й изолятор, кВэф.

Пробивное напряжение разрядника, кВэф, определяется по формуле

(5.4)

Для проверки правильности вычисленного значения пробивного напряжения разрядника U_p определить его опытным путем. Шаровой разрядник подключают к высоковольтному трансформатору и повышают напряжение автотрансформатором до пробоя искрового промежутка разрядника. Напряжение пробоя фиксируют по вольтметру на обмотке автотрансформатора. Зная коэффициент трансформации высоковольтного трансформатора, находят напряжение пробоя разрядника, кВэф:

(5.5)

где $K_t = U_1/U_2$ – коэффициент трансформации; U_v – показания вольтметра.

Зная долю напряжения всей гирлянды, приходящуюся на каждый изолятор a_k , и номинальное фазное напряжение линии, в которой работает гирлянда, можно определить напряжение на данном изоляторе ΔU_k , кВ:

(5.6)

Степень неравномерности распределения напряжения на гирлянде изоляторов можно оценить коэффициентом неравномерности, определяемым по формуле

(5.7)

где n – число элементов в гирлянде; a_1 – доля напряжения всей гирлянды, приходящаяся на наиболее загруженный изолятор (обычно первый от провода).

При равномерном распределении напряжения по элементам гирлянды коэффициент неравномерности, очевидно, равен 1.

1.2 Описание установки

Схема экспериментальной установки по определению распределения напряжения вдоль гирлянды приведена на рис. 5.3.

Источником высокого напряжения переменного тока является высоковольтная испытательная установка типа АИД-70, внешний вид и электрическая схема приведены на рис. 2.1–2.3 данного пособия.

Конструкция аппарата выполнена в виде переносного пульта управления и источника испытательного напряжения.

Источник испытательного напряжения включает в себя трансформатор высоковольтный, выключатель высоковольтный, резисторы высоковольтные и выпрямительные столбы, помещенные в бак, заполненный трансформаторным маслом.

Испытательное напряжение из бака выводится посредством специального высоковольтного изолятора, к которому присоединяется испытываемый объект.

Под кожухом источника испытательного напряжения находится электромагнит замыкателя, конденсаторы и разрядники.

Пульт управления включает в себя регулятор испытательного напряжения, печатную плату, разъемы для подсоединения сетевого кабеля и кабелей источника испытательного напряжения, компенсационный трансформатор, предохранители и другие элементы схемы.

На лицевой панели пульта управления расположены измерительные приборы, сигнальные лампы, ручка регулятора напряжения, кнопка, шунтирующая микроамперметр, кнопки включения и отключения испытательного напряжения, тумблер переключения градуировки киловольтметра при работе на выпрямленном напряжении.

На правой стороне пульта расположен переключатель вида испытательного напряжения и включения аппарата в сеть.

Высоковольтная часть установки расположена на испытательном поле, которое оборудовано устройством для заземления выводов высокого напряжения.

Двери ограждения испытательного поля снабжены блокировкой, контакты которой включены в цепи управления.

Питание установки осуществляется от сети переменного тока 220 В.

Наличие напряжения на источнике сигнализируется зеленой лампочкой, высокого напряжения – красной лампочкой.

1.3 Порядок выполнения работы

Снятие кривой распределения напряжения по гирлянде с помощью разрядника производится в следующем порядке:

- а) присоединить к высоковольтным выводам аппарата АИД-70 крайние элементы гирлянды (1–к...изоляторы, рис. 5.3);
- б) установить разрядник на первом от провода изоляторе гирлянды;
- в) включить аппарат в сеть с разрешения руководителя и плавно повышать напряжение, подаваемое на гирлянду, при помощи регулятора напряжения аппарата. В момент пробоя разрядника замерить по киловольтметру напряжение U_k . Опыт на каждом элементе повторить 3 раза и для расчетов использовать среднее значение;
- г) вывести рукоятку регулятора напряжения в нулевое положение и отключить аппарат, заземляющей штангой снять остаточный заряд;
- д) переносить разрядник на второй, третий и другие элементы гирлянды, произвести аналогичные измерения. Данные измерений и расчетов по формулам (5.3)–(5.7) заносятся в табл. 5.1;
- е) прикрепить к гирлянде нижнее экранирующее кольцо и все измерения повторить согласно пунктам а–д;

2 Снятие кривой распределения напряжения по гирлянде с помощью измерительной

штанги.

Для обнаружения дефектных изоляторов в гирлянде линии, находящейся под напряжением, применяют специальные измерительные штанги.

Имеющаяся в лаборатории ДВГУПС универсальная измерительная штанга представляет собой длинный стержень из изоляционного материала с измерительной головкой и металлическими щупами (вилкой) на конце.

В измерительной головке установлен конденсатор С (рис. 5.4). Наличие конденсатора объясняется следующими соображениями. В случае испытания гирлянды изоляторов, в которой рабочим остался один изолятор (линии напряжением 10–35 кВ), при пробое разрядника Р все рабочее напряжение будет приложено к разряднику, что приведет к короткому замыканию. Для исключения короткого замыкания в цепи головки штанги установлен конденсатор С. Вилка прикреплена к стержню не наглухо и может поворачиваться в пределах 90°. К щупам вилки, которые изолированы друг от друга, присоединен шаровой разрядник с регулируемым промежутком (рис. 5.4).

Рис. 5.4. Принципиальная схема измерительной цепи штанги для контроля состояния изоляторов

Измерение напряжения, приходящегося на данный изолятор, производится следующим образом. Щупы штанги плотно накладываются на металлические шапки изоляторов, после этого производится плавный поворот рукоятки штанги вправо, при этом подвижной (плоский) электрод измерительного разрядника Р (рис. 5.4), насаженный эксцентрично к оси штанги и соединенный со специальной пружиной поворота, начинает перемещаться. Когда расстояние между электродами сократится до такой величины, что будет пробито напряжением, а между электродами начнет проскакивать устойчивая искра, на шкале, специально отградуированной в киловольтах (эффективных), берут отсчет.

Возврат штанги в положение максимального расстояния между электродами и удержание головки штанги в таком положении осуществляется с помощью плоской пружины поворота, имеющей ограничивающий упор. Для снятия емкостного напряжения после замеров, необходимо замкнуть накоротко щупы штанги.

Измеряя таким образом напряжение, приходящееся на каждый изолятор гирлянды, находят распределение напряжения по гирлянде. Если распределение напряжения отклоняется от нормального, то это служит признаком наличия дефектных изоляторов. Напряжение на поврежденных изоляторах резко падает, а на неповрежденных – возрастает.

Снятие кривой распределения напряжения по гирлянде с помощью измерительной штанги производится в следующем порядке:

- а) ознакомиться с конструкцией штанги (рис. 5.4);
- б) убедиться в отсутствии повреждений в виде трещин, царапин и т. д., произведя внимательный внешний осмотр штанги;
- в) собрать измерительную штангу, обращая особое внимание на прочность скрепления частей штанги между собой и надежность укрепленных щупов. При сборке штанги необходимо проверить установку на нуль длины искрового промежутка. Для этого указатель штанги становится в нулевое положение, а электроды измерительного разрядника сближаются так, чтобы между ними с трудом проходила полоска папиросной бумаги;
- г) подать на гирлянду напряжение (величина напряжения указывается преподавателем), предварительно закрыв дверцу ограждения высоковольтной камеры;
- д) с помощью штанги поочередно измерить напряжения, приходящиеся на каждый изолятор ДУк. При этом необходимо следить, чтобы в момент измерения оба вывода

штанги плотно касались металлических частей изоляторов. Величина напряжения, приходящегося на каждый изолятор, определяется как среднее из 3 отсчетов. Сумма измерительных напряжений на всех изоляторах гирлянды не должна отличаться от общего напряжения, поданного на гирлянду более, чем на $\pm 10\%$; в противном случае все замеры должны быть повторены;

е) прикрепить экранирующее кольцо к нижнему изолятору гирлянды и все измерения повторить согласно пунктам г–д.

Величина a_k определяется путем деления измеренного на каждом изоляторе напряжения на сумму всех измеренных напряжений:

$$(5.8)$$

Данные измерений и вычислений по формулам (5.7), (5.8) заносятся в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Результаты измерений и вычислений распределения напряжения по гирлянде изолятора

Примечание. Штрих – измерения производились с помощью измерительной штанги.

1.4 Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- описание цели работы;
- принципиальную электрическую схему аппарата АИД-70;
- схему замещения гирлянды (рис. 5.1);
- расчетные формулы для определения a_k , ΔU_k , U_p , γ .
- зависимости $a_k = f(k)$ и $a/k = f(k)$ с защитной арматурой и без нее, в одних координатных осях, построенные по результатам расчета;
- зависимости $\Delta U_k = f(k)$ и $\Delta U/k = f(k)$ с защитной арматурой и без нее в одних координатных осях для метода разрядника и измерительной штанги, построенные по результатам расчета и измерений;
- вычисленные значения коэффициентов неравномерности распределения напряжения γ и $\gamma/\dots$.

На основании измерений и расчетов сделать выводы о влиянии защитной арматуры на распределение напряжения по гирлянде изоляторов и наличии дефектных изоляторов

1.5 Контрольные вопросы

1. Нарисуйте емкостную схему замещения гирлянды изоляторов.
2. На каких изоляторах емкость относительно земли увеличивает падение напряжения?
3. Как может быть достигнуто выравнивание напряжения по гирлянде?
4. Как определить дефектный изолятор в гирлянде?
5. Назовите основные характеристики подвесных изоляторов.
6. Объясните особенности конструкции изоляторов для районов повышенного загрязнения.
7. Какие гирлянды применяются на высоковольтной линии?
8. Как будет влиять увеличение собственной емкости изоляторов на распределение напряжения вдоль гирлянды?
9. Почему с увеличением рабочего напряжения гирлянды $\Delta U'1$ возрастает? Какие меры применяются для уменьшения $\Delta U'1$?
10. От чего зависит распределение напряжения вдоль гирлянды при рабочем напряжении постоянного тока?

Лабораторная работа № 2

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РАЗРЯДЫ В ВОЗДУХЕ

Цель работы:

- изучение основных характеристик электрического разряда в воздухе при давлениях и температурах, близких к нормальным;
- ознакомление с методикой определения начального и пробивного напряжения, а также напряженности поля в цилиндрическом конденсаторе для воздуха;
- ознакомление со схемой установки по исследованию электрических разрядов в воздухе.

2.1 Общие сведения

Большинство электрических устройств имеет газовую или чаще всего воздушную изоляцию, т. е. изоляцию между проводами линий электропередач, в трансформаторах и высоковольтных аппаратах – промежутки между выводами. В некоторых высоковольтных типах кабелей, воздушных выключателях изоляционной и дугогасящей средой является воздух под давлением.

При определенных условиях в газовых диэлектриках возникают электрические разряды, приводящие к потере диэлектрических свойств газа. Основной причиной возникновения электрического разряда в газе является ударная ионизация, которая возникает под действием электронов, ускоряющихся за счет сил электрического поля. Ионизация – это процесс появления в газовой среде свободных частиц – ионов, несущих положительный и отрицательный электрические заряды. Интенсивность осуществляемой электронами ионизации при заданной напряженности электрического поля определяется в основном двумя величинами – энергией ионизации газа и средней длиной пробега электрона в данном газе.

Энергия ионизации зависит от заполнения электронных орбит атома (молекулы) электронами и имеет максимальное значение для инертных газов, у которых внешние орбиты полностью заняты электронами (гелий, неон, аргон), а минимальное значение – у атомов, на внешней орбите которых находится всего один электрон (литий, натрий, калий).

Из кинетической теории газов известно, что средняя длина свободно-го пробега электрона в газе:

$$(6.1)$$

где N – число атомов (молекул) газа в единице объема; r – радиус атома (молекулы) газа. Если известна средняя длина свободного пробега электрона $\lambda_{\text{ср}}$, то число столкновений электрона с атомами на единицу пути равно $\lambda / \lambda_{\text{ср}}$. Однако ионизацией заканчиваются только те столкновения, которые произойдут после пролета электронами пути, равного или большего λ . В кинетической теории газов этот путь оценивается коэффициентом, равным 1. Тогда число ионизирующих столкновений будет оцениваться коэффициентом ударной ионизации электронов:

$$(6.2)$$

Таким образом, для развития разряда в газе должен находиться хотя бы один свободный электрон, который имеет длину свободного пробега

$$(6.3)$$

где $U_{\text{и}}$ – потенциал ионизации; E – напряженность электрического поля.

После первого акта ионизации образуется два свободных электрона, затем четыре и так далее. Этот поток постепенно увеличивающегося числа электронов называется лавиной электронов.

Возникновение лавины и даже достижение ею противоположного электрода еще не означает пробоя промежутка. Для возобновления ионизации необходимо образование нового электрона. Если этот электрон создается за счет внешних источников (ультрафиолетовое излучение солнца, космические излучения и т. д.), то разряд будет несамостоятельным.

Для превращения разряда в самостоятельный необходимо образование новых электронов (их обычно называют вторичными) за счет процессов, происходящих в самом

промежутке еще до того, как первая лавина полностью прекратит свое существование. Вторичные электроны могут создаваться под действием бомбардировки катода лавиной положительных ионов и фотоионизацией – либо на катоде, либо в объеме газа. То минимальное значение напряжения, при котором разряд переходит в самостоятельный, называется начальным (U_0). В сравнительно однородных полях оно соответствует тому напряжению, при котором газовый промежуток становится проводящим, т. е. происходит его пробой.

В резко неоднородных промежутках, в которых радиус кривизны одного или обоих электродов может быть меньше межэлектродного расстояния, при выполнении условия самостоятельности разряда возникает его особая форма – коронный разряд.

(6.4)

где γ – обобщенный коэффициент вторичной ионизации; α – коэффициент ударной ионизации электронов; l – расстояние между электродами.

При коронном разряде ионизация происходит или вблизи одного из электродов или вблизи обоих электродов, если они оба имеют малый радиус кривизны. Поэтому возникновение коронного разряда не означает полного пробоя промежутка. При коронном разряде ток в промежутке хотя и возрастает, но остается на много порядков меньше тока при пробое промежутка электродами. Если коронный разряд является устойчивым, то выполнение самостоятельности означает появление коронного разряда, и соответствующее напряжение называется начальным. Для полного пробоя промежутка напряжение должно быть повышено существенно больше начального.

Если коронный разряд неустойчив, что характерно для полей с не очень большой степенью неоднородности, то начальное и пробивное напряжения могут совпадать. Так как устойчивость коронного разряда носит вероятностный (статистический) характер, то этот случай соответствует повышенным разбросам пробивных напряжений. Коронный разряд может иметь основные формы – лавинную и стримерную. Лавинная форма характерна для очень малых радиусов кривизны электродов ($r < 1-2$ мм). При этой форме коронного разряда зона ионизации имеет более или менее однородную структуру, что приводит к выравниванию электрического поля в промежутке. Для пробоя промежутка необходимо появление узкого, нитевидного канала, называемого стримером.

Основные положения стримерной теории в упрощенном виде сводятся к следующему. Начальная лавина после пересечения всего промежутка оставляет объемный положительный заряд, сосредоточенный в основном около анода. Этот объемный заряд значительно искажает внешнее поле, канал лавины начинает испускать большое количество фотонов еще до того, как положительные ионы начальной лавины уйдут на катод. Образованные этими фотонами вторичные электроны дадут начало новым лавинам, электроны которых будут притягиваться объемным положительным зарядом, расположенным в головке начальной лавины. В пространстве, заполненном объемными зарядами, средняя напряженность поля невелика, поэтому большое количество проникших туда электронов превращается в отрицательные ионы, а в месте расположения положительного объемного заряда образуется канал, заполненный плазмой – так называемый стример. Постепенно распространяясь от анода к катоду, стример перекрывает весь промежуток, и происходит пробой, т. е. между электродами образуется сквозной проводящий канал. Протекающий по этому каналу ток приводит к существенному повышению его температуры, что может привести к возникновению термической ионизации, свойства канала изменяются. Такой канал называется лидером. Таким образом, при стримерной форме короны на коронирующий электрод оказываются как бы насаженными тоненькие проводники – каналы стримеров, на концах которых напряженность электрического поля может достигать очень больших величин.

Полный пробой резко неоднородного промежутка происходит при напряжении больше

начального, т. е. при наличии развитой короны. Поэтому пробивное напряжение зависит от формы коронного разряда. Очевидно, что при лавинной форме, которая выравнивает электрическое поле в промежутке, пробивное напряжение должно быть существенно выше, чем при стримерной короне, при которой напряженность поля на концах стримеров всегда очень велика.

Наиболее показательным в наличии двух форм коронного разряда является цилиндрический конденсатор.

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

Для расчета характеристики изменения потенциала и напряженности электрического поля в слое изоляции между электродами используют выражения:

где U – напряжение, приложенное к электродам; R – радиус внешнего цилиндра конденсатора; r – радиус внутреннего цилиндра конденсатора.

Характеристики изменения потенциала и напряженности электрического поля вдоль радиуса цилиндрического конденсатора показаны на рис. 6.1.

Рис. 6.1. Изменения напряженности (1) и потенциала (2) в слое изоляции цилиндрического конденсатора

Из рис. 6.1 видно, что напряженность электрического поля у поверхности электрода с меньшим радиусом имеет максимальное значение. Таким образом, если материал вблизи внутреннего электрода напряжен до предела, то у внешнего электрода он недогружен, т. е.

Математическое исследование зависимости (6.7) на минимум позволяет выбрать наиболее рациональные радиусы, при которых изоляция загружена более равномерно и имеет минимальную толщину. Для анализа берут первую производную от знаменателя выражения (6.7) и приравнивают ее нулю отсюда

Из этого выражения следует, что максимальная напряженность электрического поля вблизи поверхности внутреннего цилиндра минимальна, если отношение радиусов внешнего и внутреннего цилиндров равно основанию натурального логарифма. Формула (6.7) примет вид

Характер изменения максимальной напряженности электрического поля при изменении r (при $R = \text{const}$) см. на рис. 6.2.

Рис. 6.2. Зависимость максимальной напряженности электрического поля от радиуса внутреннего электрода цилиндрического конденсатора

Указанная зависимость показывает, что при $R/(r) > e$ увеличение r за счет ионизационного процесса вызывает снижение максимальной напряженности поля, в результате чего дальнейший рост короны прекращается, и коронный разряд приобретает устойчивую форму только вблизи поверхности внутреннего цилиндра.

Если же $R/r < e$ то увеличение радиуса внутреннего цилиндра вызывает увеличение максимальной напряженности, и коронный разряд продолжает распространяться дальше, захватывая все пространство вплоть до внешнего цилиндра. Здесь уже нельзя говорить об устойчивой короне, так как последняя будет лишь весьма кратковременной перед пробоем промежутка.

Опытные данные (рис. 6.3) в основном подтверждают эти рассуждения.

Рис. 6.3. Начальные и пробивные напряжения в цилиндрическом конденсаторе в зависимости от величины радиуса внутреннего цилиндра (при $P = 760$ мм рт. ст. и $t = 20^\circ\text{C}$). Зависимости: 1 – начального напряжения; 2 – пробивного напряжения; 3 – начальной напряженности

Однако максимум пробивного напряжения, который соответствует минимуму напряженности на поверхности внутреннего цилиндра, наступает при $R/r \approx 3,3$ вместо «е», но это можно объяснить тем, что предположение об отсутствии поля в коронирующем слое заведомо неточно.

Зависимость (2) рис. 6.3 имеет сложный характер. Эта зависимость может быть разбита на три зоны:

- зона $I \approx$ – поле слабонеоднородное, и вследствие этого пробивное напряжение совпадает с начальным;
- зона $\approx$ – поле неоднородное, и вследствие этого пробивное напряжение превышает начальное. Корона здесь имеет стримерный характер сразу после ее возникновения, следовательно, одно из условий пробоя промежутка – образование стримера – здесь уже выполнено. Вследствие этого величина пробивного напряжения при уменьшении e связана с уменьшением начального напряжения;
- зона $\approx$ – также имеет резко неоднородное поле, но корона при возникновении имеет лавинный характер. Для пробоя промежутка, т. е. перехода короны из лавинной формы в стримерную, требуется увеличение пробивного напряжения.

Начальное напряжение (рис. 6.3, кривая 1) и начальная напряженность (рис. 6.3, кривая 3) зависят от двух факторов: величины поверхности внутреннего цилиндра и расстояния между цилиндрами. С увеличением радиуса внутреннего цилиндра r происходит как уменьшение расстояния между электродами, так и уменьшение коэффициента неоднородности поля КН

Причем при малых значениях r , т. е. при $(R/r) > e$, основное влияние оказывает уменьшение КН (начальное напряжение вследствие этого увеличивается), а начиная с $r \approx 0,3 R$, преобладающее влияние оказывает уменьшение расстояния между электродами (вследствие этого U_0 уменьшается). Начальное напряжение является и пробивным. Хорошие результаты расчета амплитудного значения начального напряжения U_0 и напряженности E_0 в цилиндрическом конденсаторе для воздуха при отрицательной полярности внутреннего цилиндра и переменном напряжении дают следующие зависимости

где δ – относительная плотность воздуха; α – расстояние между электродами;

Т

здесь P – давление воздуха в момент испытания, мм рт. ст.; T – температура воздуха при испытании, К.

Наличие этих формул (6.11) и (6.13) при расчете объясняется тем, что ионизация может иметь место по всей длине промежутка [формула (6.11)], или только в части промежутка [формула (6.13)].

Для других форм электродов могут быть получены другие эмпирические формулы.

2.2 Описание испытательной установки

Принципиальная электрическая схема установки представлена на рис. 6.4.

В качестве источника высокого напряжения в лабораторной работе используется аппарат АИД-70. Описание аппарата, принцип его работы и принципиальная электрическая схема представлены в разд. 2. Схема подключения электродов цилиндрического конденсатора приведена на рис. 6.4.

Рис. 6.4. Принципиальная схема установки: 1 – пульт управления; 2 – источник высокого напряжения; 3 – вывод; 4 – конденсатор; 5 – заземление

Питание от сети подается на пульт управления 1, от источника высокого напряжения 2 испытательное напряжение с высоковольтного вывода 3 подается на большой радиус цилиндрического конденсатора 4, малый радиус 5 – заземление.

Следует особо отметить, при всех переключениях на испытательном поле на высоковольтные вводы необходимо завешивать заземляющую штангу.

Высоковольтная часть установки (на рис. 6.4 очерчена пунктиром) расположена на испытательном поле, которое оборудовано устройствами блокировок для снятия напряжения питающей сети.

2.3 Порядок выполнения работы

1. Задание на предварительную подготовку.

- Рассчитать по эмпирическим формулам (6.10) – (6.15) и построить зависимость начального напряжения при промышленной частоте переменного тока от величины внутреннего радиуса цилиндра при постоянном значении цилиндра $D = 84,9$ мм. Радиус внутреннего цилиндра изменять от $r_{\min}$ до $r_{\max}$.

- Рассчитать и построить по формуле (6.6) изменение напряженности поля U поверхности токоведущей жилы одножильного кабеля радиусом $r = 6$ мм с постоянным его увеличением до значения радиуса заземляющей свинцовой оболочки с $R = 36$ мм. Номинальное напряжение кабеля 35 кВ. Дать объяснение этой зависимости.

2. Задание на измерение.

Перед началом работы ознакомиться со схемой установки, расположением ее элементов, последовательностью проведения переключений, с правилами техники безопасности при работе на установке, особое внимание уделить наличию заземления корпуса высоковольтного аппарата и защитных средств.

3. Устанавливая поочередно внутренние электроды от $d_{\min}$ до $d_{\max}$ (табл. 6.1), измерить величины напряжений начала коронирования и пробоя, напряжения фиксировать по киловольтметру. За начало коронирования считать то напряжение, при котором появляется свечение и потрескивание. Данные измерений занести в табл. 6.2.

4. По полученным данным на одном графике построить зависимости $U_0 = f(r)$; $U_{пр} = f(r)$.

5. Нанести на этот же график расчетные зависимости $U_0 = f(r)$. Сравнить опытные и расчетные зависимости и объяснить причины расхождения.

2.4 Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- описание цели работы;
- расчет по эмпирическим формулам зависимости начального напряжения при

промышленной частоте переменного тока от величины внутреннего радиуса цилиндра при постоянном значении внешнего цилиндра;

– расчет изменения напряженности поля у поверхности токоведущей жилы одножильного кабеля, график этой зависимости;

– схему соединения приборов и аппаратов при испытаниях;

– таблицы результатов измерений и графики.

2.5 Контрольные вопросы

1. Что такое лавина и стример?

2. Какой разряд принято называть самостоятельным и каковы условия его возникновения?

3. В чем основное различие между однородным, слабонеоднородным и резко неоднородным электрическими полями?

4. Какие наиболее эффективные меры принимаются для упрочнения газового промежутка?

5. Как объяснить зависимость начального и пробивного напряжений от величины радиуса внутреннего электрода цилиндрического конденсатора?

6. Как осуществляется измерение высокого напряжения при выполнении лабораторной работы?

7. Почему для сравнения прочности воздуха при различной форме электродов результаты измерений необходимо приводить к нормальным условиям?

8. Как влияет влажность воздуха на его электрическую прочность?

Лабораторная работа № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Цель работы:

исследование электрической прочности газообразных (воздух), жидких и твердых диэлектриков

3.1 Общие сведения

Пробой воздушных промежутков. Основной причиной возникновения электрического разряда в газе является ударная ионизация, которая возникает под действием электронов, ускоряемых электрическим полем. Поскольку коэффициент ударной ионизации зависит от напряженности поля, длины свободного пробега и давления, из условия самостоятельности разряда можно получить зависимость разрядного напряжения от внешних факторов, так называемый закон Пашена:

$U = f(pd)$, или в другом виде $E/p = F(pd)$.

Кроме ударной ионизации возможна фотоионизация, термоионизация и автоионизация.

Пробивным называется напряжение, при котором происходит полная потеря электрической прочности промежутка. Пробой промежутков с однородным, квазиоднородным и слабонеоднородным полями происходит при начальном напряжении. Что касается промежутка с резконеоднородным полем, то его пробой происходит при напряжении, большем начального, т. е. при наличии развитой короны. Классическим примером промежутка с несимметричным резконеоднородным полем является промежуток стержень (острие) – плоскость. В отличие от промежутка стержень – плоскость, у промежутка стержень – стержень внешнее электрическое поле симметрично (предполагается, что электроды одинаковы, а земля практически не влияет на поле в промежутке).

Пробой жидких диэлектриков. Механизм пробоя очищенных жидкостей в основном обуславливают следующие факторы:

1) эмиссия электронов с поверхности катода;

2) автоионизация в объеме жидкости;

3) ударная ионизация электронами и образование пространственного заряда в

жидкости;

4) возникновение в жидком диэлектрике пузырьков газа, которые деформируются в поле, участвуют в образовании канала разряда, обуславливая полный пробой. Газовые пузырьки могут образовываться как в результате разложения углеводородов жидкого диэлектрика, так и вследствие вскипания жидкости под воздействием выделяемой энергии («тепловая» теория).

Пробой твердых диэлектриков. В зависимости от характеристик диэлектрика, рода напряжения и условий проведения опыта можно установить три основных вида пробоя.

1. Электрический пробой диэлектриков возникает в результате чисто электрических явлений при условии, что в процессе приложения напряжения (протекания тока) исключены химические изменения в диэлектрике или его перегрев за счет выделяющейся энергии.

Согласно теории ударной ионизации медленными электронами Хиппеля —

Калена, критерием пробоя являются условия, достаточные для образования лавины электронов в твердом диэлектрике. Согласно теории ударной ионизации быстрыми электронами Фрелиха, в отсутствие электрического поля в твердом диэлектрике имеется определенная вероятность наличия «быстрых» электронов проводимости с энергиями, близкими к энергии ионизации, хотя подавляющее количество электронов имеет значительно меньшую энергию. Исходя из этого, Фрелих считает, что нарушение электрической прочности наступает тогда, когда поле начинает ускорять электроны, обладающие энергией, близкой к энергии ионизации.

В квантово механической теории пробоя твердых диэлектриков учитывается возможность существенного увеличения электронной проводимости твердых диэлектриков вследствие перехода электронов в зону проводимости за счет туннельного эффекта в электрическом поле.

2. Тепловой пробой связан с разогревом диэлектрика вследствие выделяемой в нем энергии при приложении напряжения. Если с повышением температуры выделяемая энергия увеличивается, то при некотором напряжении, называемом напряжением теплового пробоя, тепловыделение в диэлектрике превысит теплоотдачу в окружающую среду. Это обуславливает непрерывный рост температуры во времени и разрушение диэлектрика.

3. Пробой, связанный с развитием частичных разрядов, возникающих в ослабленных участках диэлектрика, вызывает разрушение диэлектрика в процессе воздействия таких разрядов.

Кроме того, возможны смешанные виды пробоя, а также пробои, связанные с химическими изменениями диэлектрика под воздействием приложенного напряжения (например, электролитические процессы при постоянном напряжении, разрушение диэлектрика озоном и окислами азота, образующимися в результате частичных разрядов и т. д.).

3.2 Описание испытательной установки

Изучение явлений пробоя воздуха в различных условиях

Исследование электрической прочности изоляционных материалов производится при помощи установки АИИ-70 и специальной камеры для испытания образцов диэлектриков. Установка АИИ-70 включает в себя пульт, внутри которого установлены: высоковольтный трансформатор, пускорегулирующая и сигнальная аппаратура. Заземляющая штанга служит для снятия емкостного заряда с испытуемого образца после пробоя. Электродами, между которыми исследуются различные виды разрядов и прочность воздуха, являются сферы диаметром 25 мм, а также заостренные электроды, которые крепятся на текстолитовом основании в горизонтальном положении. Жидкие изоляционные материалы (масла) испытываются на пробой в стандартном фарфоровом разряднике с двумя дисковыми электродами с закругленными краями, имеющими

диаметр 25 мм и закрепленными на расстоянии 2,5 мм друг от друга.

Для испытания твердых диэлектриков служит приспособление, изготовленное из текстолита. Electroдами в нем являются два металлических цилиндра диаметром 25 мм, укрепленные в вертикальном положении. Образец исследуемого материала помещается в горизонтальном положении между двумя цилиндрическими электродами. Перед началом проведения исследования электрической прочности изоляционных материалов необходимо ознакомиться с испытательной установкой и инструкцией по технике безопасности для работающих с высоким напряжением – свыше 1000 В. После этого расписаться в соответствующем специальном журнале.

Различные переключения в испытательной камере и включение высоко-вольтной установки проводятся только с разрешением преподавателя и в его присутствии. При нахождении кого бы то ни было в камере дверь её должна быть открыта!

1. К шинам высоковольтного однофазного трансформатора установки подключить разрядник со сферами (шар-шар) и установить расстояние между ними, указанное преподавателем (3,5,7,10,15 мм). Затем выйти из помещения камеры, плотно закрыть за собой дверь для замыкания блокировочного контакта.

2. Рукоятку «защита» на пульте АИИ-70 установить в положение «чувствительная», вставить колодку в вилку «сеть» на пульте. Рукоятка регулятора напряжения установки должна быть в крайнем левом положении. После этого надо включить автоматы, расположенные на стене слева от камеры: сначала А1, затем А2 и А3. При этом должна загореться зеленая лампочка на пульте и лампочка «Стоп! Высокое напряжение» на световом табло испытательной камеры. Теперь можно нажимать кнопку «Вкл.» на пульте и после этого на нем должна загореться красная лампочка.

3. Плавно вращая рукоятку регулятора напряжения по часовой стрелке, повысить напряжение до пробоя воздуха между сферами; при этом должен сработать автомат на пульте. Отсчет напряжения вести по верхней шкале киловольт-метра, встроенного на пульте (это более чувствительная шкала – $U_{эфф}$). Записать показания и сразу же поставить рукоятку регулятора напряжения (путем вращения против часовой стрелки) в крайнее левое положение. При одном и том же промежутке между сферами произвести пробой 3 раза и записать значения в табл. 3.1.

4. После окончания испытания прочности данного промежутка между сферами выключить автоматы А и А, открыть дверь камеры, взять заземляющую штангу и коснуться её металлическим концом высоковольтного электрода разрядника, чтобы снять остаточное напряжение. Затем повесить штангу на место. После этого поставить следующее расстояние между сферами (указанное преподавателем) и все повторить в той же последовательности, что и в предыдущих пунктах испытания. Данные испытаний занести в табл. 3.1. Расстояние менять несколько раз (4-5), чтобы можно было по средним показателям вольтметра построить зависимость $E_{пр} = f(h)$, где h – расстояние между сферами.

Таблица 3.1. Пробивные напряжения

h

мм Переменное напряжение

Примечания

Шар-шар

Однородное поле Шар-игла

Неоднородное поле

$U_{пр\ эфф}$,

кВ

$U_{пр\ max}$,

кВ
 $E_{пр\ max}$,
 кВ/мм $U_{пр\ эфф}$,
 кВ
 $U_{пр\ max}$,
 кВ
 $E_{пр\ max}$,
 кВ/мм
 5
 10

5. После этого заменить одну из сфер заостренным электродом, т.е. создать неоднородное электрическое поле для воздуха, и при тех же промежутках между электродами снова провести испытания на электрическую прочность воздуха. Следует провести наблюдение явления, предшествующего пробой, – легкого по-трескивания, коронного свечения около острия, переходящего в проводящий светящийся канал. Такие явления характерны для неоднородного электрического поля. В табл. 3.1 записываются средние арифметические значения пробивного напряжения для каждого промежутка в однородном и неоднородном полях.

Формулы для определения прочности диэлектриков

$$U_{max} = ; \quad E_{max} =$$

где U_{max} - показание вольтметра по нижней шкале, кВ;

$U_{эфф}$ - показание вольтметра по верхней шкале, кВ.

Для приведения напряжения пробоя, полученного при данных условиях ($U_{ср. пр}$), к нормальным условиям, его нужно разделить на относит плотность воздуха δ :

$$U_{пр.н} =$$

Плотность воздуха определяется по формуле:

где P - давление воздуха, мм рт. ст.; t – температура воздуха, °С.

Перед выполнением работы надо записать атмосферное давление и температуру воздуха.

3.3 Порядок выполнения работы

3.3.1 Исследование электрической прочности жидких изоляционных материалов

В качестве жидкого изоляционного материала испытывается трансформаторное масло (не очень хорошей очистки). Разрядник, наполненный маслом, подключить к испытательной установке с помощью специальных зажимов. Затем выйти из камеры, закрыть за собой дверь. Включить автоматы А2, А3 и автомат на пульте установки АИИ-70. Плавно повышая напряжение на установке с помощью рукоятки, внимательно наблюдать за поведением масла в разрядке. Заметить начало кипения, образование газовых пузырьков и вспышку, означающую пробой масла. После пробоя сделать выдержку в течение ~5 минут и снова пробить масло. Третий пробой произвести без выдержки, и заметить величину напряжения. Четвертый, пятый, шестой пробой производить после пятиминутной выдержки. Данные занести в табл. 3.2.

Вычислить среднее значение $U_{пр}$ без учета третьего пробоя и определить $E_{max.пр}$ с учетом расстояния между электродами в масле, равного 2,5 мм, по формулам

Таблица 3.2. Результаты измерений

, h	
мм	Упр1,
кВ	Упр2,
кВ	Упр3,
кВ	Упр4,
кВ	Упр5,
кВ	Упр6,
кВ	Упр.max ср
кВ	E max,
кВ	

Из полученных результатов сделать вывод. Объяснить причину многократного пробоя масла в целях определения его реальной электрической прочности.

3.3.2 Исследование электрической прочности твердой изоляции

Влияние толщины твердого диэлектрика на его электрическую прочность.

Образец тонкого полиэтилена поместить между вертикальными цилиндрическими электродами и определить его прочность, плавно повышая приложенное к нему напряжение. После этого определить электрическую прочность образца полиэтилена большей толщины. Данные занести в табл.3.3.

Таблица 3.3. Результаты измерений

Название	
материала	
колич.	
слоев, n	Метод
испытания	
Толщина	
одного	
слоя d,	
м	Общая
толщина	
слоев h,	
м	Упр.эфф .,
кВ	
	Упр.max. ,
кВ	
	Eпр max. ,
кВ/м	

Сравнить эти показания и сделать вывод.

Расчетные формулы $h=nd$; ;

3.4 Содержание отчета

Цель и краткое содержание работы.

Электрическая схема испытательной установки.

Результаты определения прочности воздушной изоляции в однородном и не-однородном

электрических полях при разных расстояниях между электродами $E_{пр. max}=f(h)$
Графики, построенные для воздушной изоляции в однородном и неоднородном полях.
Результаты испытаний жидкого диэлектрика.
Результаты испытаний твердых диэлектриков одно- и многослойных, пропитанных и непропитанных.
Графики $E_{пр. max}=f(h)$, для различных твердых диэлектриков
Краткие выводы.

Лабораторная работа № 4

ИСПЫТАНИЕ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЕЙ ВЫСОКИМ НАПРЯЖЕНИЕМ

Цель работы:

- практическое освоение методов испытания кабелей и заключение о пригодности кабеля к эксплуатации;
- ознакомление с аппаратом для испытания силовых кабелей выпрямленным высоким напряжением типа АИД-70;
- ознакомление с мегомметрами типа МС-06 и Ф4101.

4.1 Общие сведения

Кабелем (гол. kabel–канат) называется устройство, состоящее из гибких металлических изолированных проводов, заключенных в защитные оболочки и предназначенных для передачи и распределения электрической энергии. Кабельные электрические линии применяются, главным образом, в тех случаях, когда затруднено использование воздушных линий.

Силовой кабель состоит из одной или нескольких медных или алюминиевых жил (обычно 3 для передачи электроэнергии трехфазного тока), покрытых изоляцией и скрученных вместе. Для защиты изоляции от действия влаги, газов, а также механических повреждений поверх изоляции накладываются защитные оболочки: герметичные из свинца, алюминия или пластмассы и стальная броня. Стальная броня защищается от коррозии антикоррозийными покрытиями. На рис. 7.1 показан трехфазный кабель с поясной изоляцией с секторными уплотненными жилами на напряжение 6 кВ.

Рис. 7.1. Трехфазный кабель с поясной изоляцией с секторными уплотненными жилами на напряжение 6 кВ: 1 – токоведущая жила; 2 – фазная изоляция; 3 – поясная изоляция; 4 – заполнение; 5 – защитная (герметичная) оболочка; 6 – подушка под броней; 7 – броня из двух стальных лент; 8 – наружный покров (из пряжи, пропитанной битумом, и мелового покрытия)

По конструкции изоляции высоковольтные кабели делятся на три группы:

- с вязкой пропиткой;
- маслonaполненные;
- в стальных трубах с маслом или газом под давлением.

Пропитка бумаги в кабелях с вязкой пропиткой выполняется масляно-канифольным компаундом. Добавка в масло канифоли (10–20 % объема масла) обеспечивает повышенную вязкость пропитывающей массы, что необходимо для предотвращения вытекания компаунда из концов кабеля и перетекания его в кабеле при наклонных трассах. Такой тип изоляции применяется в кабеле до 35 кВ.

Бумажная изоляция жилы маслonaполненного кабеля пропитывается чистым дегазированным, имеющим повышенную стабильность и газостойкость маслом, находящимся в кабеле под избыточным давлением.

Маслonaполненные кабели выпускаются обычно одножильными и применяются при напряжении 110 кВ и выше.

Кабели в стальных трубах представляют собой три одножильных кабеля с бумажной изоляцией, пропитанной минеральным или синтетическим маслом (без свинцовой оболочки), которые расположены в стальном трубопроводе с маслом или сжатым инертным газом (обычно азотом) при давлении порядка 12–15 атмосфер. Пробой изоляции кабеля носит тепловой или ионизационный характер, и для увеличения допустимых рабочих напряжений в кабельной изоляции применяются следующие методы.

- а) регулирование электрического поля путем применения проводящих или полупроводящих экранов, устраняющих местные увеличения напряженности, например, на поверхности многопроволочных жил;
- б) применение поверх изоляции каждой жилы собственных металлических оболочек или экранов полупроводящей бумаги, а также выполнение одножильных кабелей; эти меры приводят к существованию радиального поля, т. е. устраняют тангенциальную составляющую относительно окружности жилы, которая присутствует в трехфазных кабелях с поясной изоляцией, снижая их прочность;
- в) градирование изоляции, которое выполняется в кабелях 110 кВ и выше, с помощью бумаги различной плотности и толщины; более тонкая и плотная бумага имеет большую диэлектрическую проницаемость и электрическую прочность и навивается слоем, ближайшим к жиле (рис. 7.2). Последующие слои выполняются из бумаги и имеют меньшую диэлектрическую проницаемость и меньшую электрическую прочность; градирование изоляции позволяет снизить напряженность поля у жилы и уменьшить толщину изоляции, осуществив более равномерное распределение напряженности поля по толщине изоляции;
- г) применение масла или газа, особенно под давлением, затрудняет возникновение и развитие частичных разрядов и значительно увеличивает электрическую прочность бумажно-масляной и бумажно-газовой изоляции.

Рис. 7.2. Распределение напряженности электрического поля по толщине изоляции кабеля 110 кВ: 1 – неградуированной; 2 – градуированной

Практика показала, что в процессе производства, при монтаже и особенно эксплуатации, в изоляции кабелей образуются дефекты, в отдельных случаях при некачественном наложении изоляции (складки порезы, трещины); некачественной сушке; неполной пропитке или пропитке некачественной массой и т. д. При эксплуатации вследствие чередования циклов нагрева и охлаждения в изоляции, вызванных изменяющейся нагрузкой, образуются пустоты, которые заполняются газами. Значительное количество дефектов в изоляции образуется из-за механических повреждений и коррозии защитных оболочек.

Через поврежденные места в изоляцию проникает влага, которая резко снижает ее электрическую прочность. В кабелях, проложенных по наклонным трассам, наблюдается постепенное перетекание пропитывающего состава с верхних участков в нижние, что приводит к образованию пустот, которые заполняются газами, а в нижних участках от избытка пропитанной массы может произойти разрыв герметизированной оболочки. Для предупреждения аварийных пробоев изоляции кабелей, вызванных появлением дефектов, кабели периодически подвергаются профилактическим испытаниям.

Испытания повышенным постоянным напряжением применяются в основном для объектов большой емкости (кабелей, конденсаторов).

Проходящий при этом через изоляцию ток мал и практически равен току утечки. Поэтому потери мощности в изоляции малы и развитие теплового пробоя затруднено. Кроме того, при постоянном напряжении мала интенсивность частичных разрядов. По этим причинам для испытания изоляции требуется более высокое постоянное напряжение, чем амплитуда переменного напряжения.

Значение испытательного выпрямленного напряжения для электрических машин составляет 2,2–2,5 $U_{ном}$. Изоляция кабелей напряжением до 10 кВ испытывается постоянным напряжением, равным 5–6 $U_{ном}$, а кабелей 10–35 кВ – напряжением, равным 4–5 $U_{ном}$. Длительность испытаний составляет 10–15 мин.

Во время испытаний можно одновременно измерять ток утечки через изоляцию, что дает дополнительную информацию о состоянии изоляции. Если изоляция не пробилась, а значение тока утечки оставалось постоянным или же несколько снизилось к концу испытаний, то это означает, что состояние изоляции вполне удовлетворительное. Если же ток утечки возрос, то в изоляции возможны дефекты, характер которых следует выяснить с помощью дополнительных испытаний.

Испытание изоляции мегомметром 1000–2500 В имеет целью выявление грубых нарушений целостности изоляции и вполне развившихся местных дефектов (обрыв жил, заземление фаз, резкая асимметрия в изоляции отдельных фаз и т. д.).

Этот метод рекомендуется применять до и после испытания кабельных линий постоянным током высокого напряжения.

4.2 Описание установки и объекта

Для испытания изоляции силовых кабелей выпрямленным электрическим напряжением используют аппарат типа АИД-70 (см. рис. 2.1–2.3).

Высоковольтная часть установки расположена на испытательном поле, которое оборудовано устройством для заземления выводов высокого напряжения.

Двери ограждения испытательного поля снабжены блокировкой, контакты которой включены в цепи управления.

Испытанию подвергается высоковольтный трехжильный кабель с алюминиевыми жилами. Концы кабеля разделаны концевыми муфтами.

На фазной изоляции каждой фазы установлены экранные кольца.

4.3 Порядок выполнения работы

1. Испытание изоляции кабеля мегомметром МС-06.

Перед испытанием необходимо ознакомиться с принципом работы мегомметра, применяемого в работе.

Испытанию подвергается поочередно каждая из жил кабеля (по отношению к другим и герметической оболочке, рис. 7.3).

Рис. 7.3. Схема соединений при измерении сопротивления изоляции высоковольтным мегомметром: а – между жилой и землей, без экрана; б – между жилой и землей, с экраном; в – между жилами кабеля, с экраном

При измерениях во время эксплуатации показания мегомметра не служат основанием для оценки изоляции кабельной линии, поскольку в значительной степени определяются состоянием концевых разделок и зависят от длины испытываемого кабеля. Происходит это потому, что емкость силовых кабелей значительна и за сравнительно короткий промежуток времени (15–60 с) она не успевает полностью зарядиться. При этом показания мегомметра определяются не установившимся значением тока утечки, а зарядным током и поэтому показания мегомметра во много раз меньше действительных.

При работе с мегомметром типа МС-06 необходимо соблюдать следующие правила:

- вращать рукоятку со скоростью не менее 2 об/с (120 об/мин);
- при вращении рукоятки не касаться зажимов во избежание электрического удара;
- отсчет производить не менее чем через 1 мин после того, как рукоятка достигнет скорости, соответствующей устойчивому положению стрелки;
- начинать работу при переключателе в положении «1», по мере надобности переходить

на другие пределы измерения;

– после испытания мегомметром проверенные жилы заземлить.

Присоединение экрана (зажим «Э») к охранному кольцу жилы кабеля при измерении по схеме рис. 7.3, б, в устраняет влияние утечки по поверхности изоляции жил. Охранное кольцо делается в виде двух-трех оборотов мягкой медной проволоки, плотно намотанной на изоляцию жилы. Для выявления влияния токов утечки по поверхности изоляции жил измерения следует произвести как при присоединенном зажиме «З», так и без подсоединения его.

Результаты измерений занести в табл. 7.1.

2. Испытание изоляции кабеля мегомметром Ф4101.

При испытании изоляции кабеля мегомметром типа Ф4101 необходимо до проведения измерений подготовить прибор к работе:

– заземлить корпус прибора (на задней крышке корпуса расположена клемма заземления);

– при испытании мегомметра от внешнего источника питания или сухих элементов строго соблюдать полярность. Если мегомметр питается от внешнего источника питания тока, то сухие элементы извлечь из отсека питания;

– корректором установить указатель на отметку «∞»;

– включить мегомметр нажатием кнопки «ВКЛ». При этом должен загореться световой индикатор.

Через 15 минут прибор готов к работе.

Необходимо при работе с мегомметром Ф4101 соблюдать правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок.

Работу выполнять в следующем порядке:

а) установить переключатель рабочих напряжений на нужное напряжение;

б) установить переключатель диапазона измерения в положение «1».

При разомкнутых зажимах «Vх» нажав кнопку «ИЗМЕР», установить ручкой «УСТ ∞» указатель на отметку «∞»;

в) замкнуть зажимы «Vх», нажав кнопку «ИЗМЕР», ручкой «УСТ.0» установить указатель на отметку «0» шкалы «1» (калибровка);

г) убедившись в отсутствии напряжения на испытываемом кабеле, подключить последний к зажимам «Vх» мегомметра, предварительно наложив на жилы кабеля временное заземление; при необходимости экранировки для устранения токов утечки экран присоединить к зажиму «Э»;

д) если измерения производятся на пределе $111 \cdot 10^3$, то во избежание дополнительной погрешности от возможных токов утечки необходимо произвести проверку и установку «∞» согласно пункту б, но при положении переключателя $111 \cdot 10^3$.

Примечание. В случае применения экранировки для уменьшения дополнительной погрешности рекомендуется калибровку производить при подключенном к зажимам «-» и «Э» испытываемом кабеле. В этом случае на провод, соединяющий зажим «Э» с экраном объекта, временное заземление не накладывается.

Для проведения измерений необходимо выполнить следующее:

– снять временное заземление с жил кабеля;

– во избежание перегрузки мегомметра измерения начать с первого диапазона измерения, установив переключатель диапазонов измерений в положение «1».

– нажать кнопку «ИЗМЕР», подав тем самым на кабель высокое напряжение (на время измерений держать кнопку «ИЗМЕР» нажатой);

– если указатель приблизится к отметке «∞», переключатель диапазонов последовательно

установить в положение, при котором указатель установится в рабочей части шкалы. После этого сделать отсчет величины измеренного сопротивления по соответствующей шкале, умножая полученный результат на множитель, соответствующий данному пределу измерений и рабочему напряжению.

По окончании измерений отпустить кнопку «ИЗМЕР», переключатель диапазонов измерений установить в положение «1» и, спустя 10–15 с, разрядить испытываемый кабель, наложив на него заземление.

Схемы измерения сопротивления изоляции кабеля приведены на рис. 7.4.

Результаты измерений записать в табл. 7.1.

Рис. 7.4. Схема соединений при измерении сопротивления изоляции мегомметром Ф4101: а – сопротивление относительно земли; б – то же между фазами

3. Испытание изоляции кабеля выпрямленным напряжением, измерение токов утечки и построение вольт-амперной характеристики.

Перед началом проведения работы ознакомиться с инструкцией по эксплуатации высоковольтного аппарата АИД-70 (устройством и принципом работы, электрической схемой установки, правилами и указаниями мер безопасности, порядком работы при проведении испытаний, инструкцией к работе при испытании кабеля; расположением элементов и объектов испытания, изложенных в разд. 2 (см. рис. 2.1–2.3) подразд. 4.2. Испытание постоянным током высокого напряжения имеет цель выявления местных сосредоточенных дефектов, которые не обнаруживаются мегомметром, путем доведения их в процессе испытания до пробоя.

В лаборатории ДВГУПС испытанию подвергается трехжильный кабель на напряжение 6 кВ типа АСГ сечением 3*95 мм², L_{каб} = 24 м.

Испытанию подвергают последовательно каждую жилу по отношению к другим жилам и свинцовой оболочке, согласно рис. 7.5.

Рис. 7.5. Схема соединений при испытании изоляции кабеля выпрямленным напряжением: 1 – высоковольтная установка АИД-70; 2 – жила кабеля; 3 – кабельная воронка (муфта); 4 – кабель

На жилу плавно (1–2 кВ в секунду) подается испытательное напряжение, равное 30 кВ для кабелей 6 кВ (5–6 кратное значение номинального линейного напряжения), и поддерживается постоянным в течение всего периода испытания. Напряжение на кабеле выдерживается в течение 5–10 мин. Отсчет времени приложения испытательного напряжения следует производить с момента установления его полной величины.

На последней минуте испытания произвести отсчет показаний микроамперметра и определить значение тока утечки изоляции жилы кабеля.

В результате испытаний определяется также коэффициент асимметрии токов утечки по фазам

где $I_{ут.мах}$ – максимальное значение тока утечки, мкА; $I_{ут.мин}$ – минимальное значение тока утечки, мкА.

Измерение токов утечки и коэффициента асимметрии утечки по фазам является дополнительным средством испытания, характеризующим состояние изоляции кабельной линии и, главным образом, изоляции муфт, на основании которых с учетом результатов предыдущих испытаний должны разрабатываться мероприятия по ремонту кабельной линии и муфт. Токи утечки и коэффициент асимметрии не являются браковочными показателями.

Кабельные линии, как показывает опыт эксплуатации, могут в некоторых случаях удовлетворительно работать при токах утечки до 500 мкА (для кабельных линий

напряжением до 10 кВ) и при коэффициенте асимметрии до 2.

Результаты измерений заносятся в табл. 7.2.

После измерения тока утечки изоляции каждой фазы снимают зависимость токов утечки от приложенного напряжения (вольт-амперная характеристика) при значениях напряжения, равных 25, 50, 75 и 100 % испытательного напряжения кабеля.

Признаком дефективности изоляции кабеля является резкий перелом в ходе вольт-амперной характеристики или отсутствие спада абсорбционного тока в течение времени отсчета.

Результаты измерений помещают в табл. 7.3.

По данным таблицы построить вольт-амперные характеристики изоляции (в одних координатных осях) $i = f(U)$.

На основании результатов испытаний производится оценка годности кабеля к эксплуатации.

4.4 Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- описание цели работы;
- принципиальные схемы приборов и аппаратов, использовавшихся в работе;
- схемы соединения приборов и аппаратов к кабелю при испытаниях;
- таблицы результатов измерений и графики;
- заключение о пригодности кабеля к эксплуатации.

4.5 Контрольные вопросы

1. Из каких основных частей состоит силовой кабель? Какие материалы применяют при его изготовлении?
2. В чем состоит различие кабелей с поясной и фазной изоляцией?
3. Почему производят кабели с экранированными жилами? На какие напряжения их изготавливают?
4. Как могут быть разделены высоковольтные кабели в зависимости от конструктивного выполнения?
5. Каким испытаниям подвергается кабель напряжением 1000 В и ниже?
6. Какие предусмотрены испытательные напряжения каждой жилы кабеля 10 кВ и 35 кВ?
7. Как зависит сопротивление изоляции от времени выдержки под напряжением?
8. Какой порядок имеет коэффициент асимметрии в новых кабелях и при эксплуатации?

Лабораторная работа № 5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ И ГЛУБИНЫ ЗАЛЕГАНИЯ СКРЫТЫХ КОММУНИКАЦИЙ

Цель работы:

- ознакомление с устройством и принципом работы трассопоискового комплекта «Успех АГ-208»;
- практическое освоение методов определения местоположения силового кабеля, находящегося под нагрузкой и обесточенного кабеля;
- определение наличия соединительных муфт, глубины залегания скрытых коммуникаций и места повреждения кабеля.

5.1 Общие сведения

В процессе эксплуатации и при испытаниях в кабельных линиях возникают различные повреждения.

Характер повреждения кабельной линии может быть установлен с помощью мегомметра. Известно, что в кабельной линии возможны следующие повреждения:

- пробой изоляции, вызывающий замыкание одной, двух или трех точек на землю либо двух или трех жил между собой в одном или разных местах;
- обрыв одной, двух или трех жил без заземления либо с заземлением как оборванных, так и целых жил;
- «заплывающий» пробой изоляции.

Повреждения изоляции при замыкании жил можно установить измерением мегомметром сопротивления изоляции каждой жилы кабеля по отношению к земле, а также между парой токопроводящих жил, проводимым с обоих концов кабеля. Для проверки целостности жил устанавливают перемычку между тремя фазами с одного конца кабеля.

В тех случаях, когда между поврежденными фазами или поврежденной фазой и землей имеется переходное сопротивление, место повреждения обнаружить затруднительно. Для снижения переходного сопротивления в месте повреждения до требуемого значения (нескольких десятков ом) кабель прожигают выпрямленным током высокой частоты. При этом сначала к кабельной линии прикладывается напряжение 30–50 кВ при токе 0,1–0,5 А, а после нескольких минут повторения пробоев разрядное напряжение снижается до 5–8 кВ (при токе 5–10 А) в течение 5–10 мин. Напряжение пробоя при этом снижается до нуля. Затем в течение нескольких минут пропускают ток 100 А. Если после нескольких пробоев при сниженном напряжении электрическая прочность изоляции вновь возрастает, такое повреждение, наиболее часто встречающееся в соединительных муфтах, называют «заплывающим» пробоем. В этом случае прожигание кабеля не достигнет цели, и требуется нахождение места повреждения.

Для обнаружения зоны повреждения кабельной линии вначале могут быть использованы так называемые относительные методы, имеющие определенные погрешности измерения: импульсный, колебательного разряда, петлевой, емкостный.

Точное место повреждения, знание которого служит исходной информацией для проведения раскопок, находится так называемыми абсолютными методами – индукционным или акустическим.

Импульсным методом определяют устойчивые однофазные и междуфазные короткие замыкания при переходных сопротивлениях не более 100 Ом, обрыв одной, двух или трех жил кабеля. Метод основан на посылке в поврежденную линию эталонного электрического импульса со скоростью 160 м/мкс и измерении интервала времени t_x между моментами его подачи и прихода отраженного импульса. От места обрыва или от конца линии импульсы отражаются с тем же знаком, от места короткого замыкания – с обратным. Расстояние до места повреждения l_x определяется как $l_x = 80 t_x$.

Метод колебательного разряда основан на измерении периода собственных электрических колебаний в кабеле, возникающих в момент пробоя. Поврежденная жила кабеля заряжается от выпрямительной установки до напряжения пробоя. После пробоя возникает колебательный разряд, при этом расстояние до места повреждения на кабеле пропорционально периоду собственного колебания.

Петлевой метод применяют при замыкании одной или двух жил на оболочку кабеля без обрыва при переходном сопротивлении не более 500 Ом. Метод широко используется в лабораторной практике в учебных заведениях. Он основан на измерении соотношения активных сопротивлений участков поврежденной жилы от места измерения до места повреждения (первый участок) и от места повреждения до конца кабеля плюс неповрежденная жила кабеля (другой участок), соединенная на другом конце кабеля с поврежденной жилой перемычкой. Метод трудоемок, так как требует проведения измерений с обоих концов кабельной линии.

Емкостный метод базируется на измерении емкости частей оборванной жилы (между каждой частью жилы и оболочкой) с помощью моста переменного тока на частоте 1 кГц. Индукционный метод основан на улавливании магнитного поля над кабелем, по которому пропускается ток звуковой частоты (800–1000 Гц), и позволяет определить место

повреждения при устойчивых двухфазных и трехфазных коротких замыканиях и переходном сопротивлении 20–250 Ом. Генератор звуковой частоты подключают к петле короткого замыкания. При этом вокруг кабеля образуется магнитное поле.

Электромонтер, следуя по трассе кабельной линии с приемной рамкой, усилителем и телефонными наушниками, прослушивает звуковые сигналы от генератора, которые будут слышны там, где по кабелю проходит ток, т. е. до места повреждения. За местом повреждения громкость звука в телефоне резко снижается.

Акустический метод основан на прослушивании с поверхности земли звуковых колебаний, вызываемых искровым разрядом в месте повреждения. В поврежденную жилу кабеля подаются периодические импульсы постоянного тока через разрядник от накопительного конденсатора. В месте повреждения возникает разряд, что вызывает акустический шум, который прослушивается с поверхности земли с помощью стетоскопа или приборов, преобразующих механические колебания в электрические.

5.2 Описание прибора и объекта испытания

Для определения местоположения и глубины залегания скрытых коммуникаций (силовые и сигнальные кабели, трубопроводы), мест повреждения кабельных линий; обследования участков местности перед проведением земляных работ; выполнения работ по поиску скрытой проводки используется трассопоисковый комплект «Успех АГ-208».

Комплект трассопоисковый состоит из генератора АГ-103 (излучателя электромагнитного поля) с рамочной антенной ИЭМ-301 и блоком приемника АП-005 с электромагнитным датчиком ЭМД-227 (приемник электромагнитного поля), в приемнике сосредоточено основное усиление и фильтрация принимаемого сигнала.

Генератор представляет собой автоколебательную систему с мощным трансформаторным выходом. Трансформаторный выход служит для согласования генератора с нагрузкой в широком диапазоне сопротивлений. Нагрузкой генератора может служить кабель или трубопровод. Генератор к нагрузке может подключаться непосредственно (соединительными проводами) либо с использованием рамочной антенны, обеспечивающей бесконтактное (дистанционное) подключение к обследуемой коммуникации.

Использование рамочной антенны в качестве нагрузки возможно только в режиме 8928 Гц. Запрещается использовать рамочную антенну в режиме 1024 Гц.

Для визуализации состояния работы генератора на переднюю панель прибора выведены индикаторы режима работы, разряда и заряда внутренней аккумуляторной батареи, индикатор тока в нагрузке; также в прибор встроен звуковой индикатор режима работы генератора.

Электромагнитный датчик, подсоединенный к приёмнику, преобразует электромагнитный сигнал в электрический. Электрический сигнал усиливается предварительным усилителем и поступает в приёмник, где происходит его основное усиление и фильтрация. Усиленный и отфильтрованный сигнал подаётся на головные телефоны. Оператор по уровню сигнала в головных телефонах определяет место расположения трассы.

Использование прибора в режиме пассивного поиска (без генератора) позволяет оператору определить местоположение кабелей или трасс, находящихся под напряжением промышленной частоты, и визуально определить разделение кабелей или трасс друг от друга. При работе с прибором в режиме активного поиска (с использованием генератора) появляются возможности определить местоположение обесточенных кабелей и выявить места повреждения.

Внешний вид прибора и схемы подключения к исследуемому объекту показаны в инструкции по эксплуатации трассопоискового комплекта «Успех АГ-208» на рис. 3.1–3.13.

В настоящей лабораторной работе, студенты, используя трассопоисковый комплект «Успех АГ-208», определяют местоположение, глубину залегания и возможные повреждения кабельной линии.

5.3 Порядок выполнения работы

1. Изучить инструкцию по эксплуатации трассопоискового комплекта «Успех АГ-208» (устройство и принцип работы, функциональное описание приборов, порядок работы в режиме трассопоиска, разд. 3).

2. Проверить исправность элементов питания генератора и приемника согласно инструкции по эксплуатации.

3. Определить местоположение силового кабеля, находящегося под нагрузкой.

При определении трассы кабеля, находящегося под нагрузкой, используют либо индуктивное подключение генератора и трассы с помощью рамочной антенны на частоте 8928 Гц, либо пассивный метод.

· Пассивный метод. Суть пассивного метода заключается в приёме электромагнитным датчиком сигнала промышленной частоты.

При использовании прибора в режиме пассивного поиска (трассопоиск без использования генератора) необходимо:

а) настроить приемник и электромагнитную антенну. Настройка приёмника и электромагнитной антенны на требуемый диапазон достигается выбором режима работы переключателем работы приёмника 5 (см. рис. 3.3) и установкой требуемой громкости головных телефонов 9 (см. рис. 3.3);

б) выставить необходимый для чёткой трассировки уровень сигнала, подаваемый на головные телефоны. При этом следует помнить, что резкое изменение уровня сигнала в головных телефонах может свидетельствовать о изменении параметров трассируемого объекта (разветвление трассы, наличие муфты или обрыва, короткого замыкания кабеля). Поэтому к изменению уровня чувствительности необходимо подходить предельно осторожно;

в) начинать работы с режима «ШП» (широкая полоса). В этом режиме полоса пропускания прибора максимальна. Оператору через головные телефоны поступает вся информация о напряженности магнитного поля в широкой полосе. Работа в данном режиме позволяет обнаружить силовые кабели под нагрузкой, кабели и трубопроводы под катодной защитой, а также возможна трассировка силовых кабелей, находящихся под напряжением, но без нагрузки, и трубопроводы, на которые при достаточной их протяженности может наводиться сигнал частотой 50 Гц;

г) для определения из числа найденных кабелей, находящихся под нагрузкой промышленной частоты 50 Гц, используется режим «50 Гц». В этом режиме из широкого спектра сигнала выделяется лишь небольшая полоса частот с центральной частотой 50 Гц. Оператор по сигналу в головных телефонах и по показанию индикатора определяет искомый кабель. Сигнал при расположении электромагнитной антенны непосредственно над кабелем должен быть максимальным. Отличительная особенность кабеля, находящегося под нагрузкой, от кабеля без нагрузки или от наведенного на протяженный трубопровод сигнала частотой 50 Гц – это более сильное затухание сигнала в режиме «50 Гц» относительно уровня сигнала в режиме «ШП». При использовании режима «50 Гц» необходимо следить за индикатором пиковой нагрузки приемника. Нормальное состояние индикатора – это отсутствие свечения. Допустимо лишь кратковременное свечение индикатора – не чаще одной вспышки в 2...3 с.

Поиск коммуникации осуществляется согласно описанным в инструкции по эксплуатации методам максимума или минимума (п. 3.5.2).

· Индуктивное подключение. Суть индуктивного подключения состоит в наведении на кабель (в основном на броню кабеля) сигнала генератора с помощью рамочной антенны. Для правильной работы с прибором необходимо соблюдать ряд правил:

- а) определить тип подключения генератора;
- б) выбрать режим работы генератора;
- в) согласовать сопротивление генератора и нагрузки;
- г) настроить приёмник и электромагнитную антенну.

Определение типа подключения генератора и выбор режима работы генератора.

Подключение генератора к рамочной антенне осуществляется путём присоединения выходных клемм генератора (вывод 8А и вывод 8Б) к соединительным проводам рамочной антенны. Приёмник и генератор при этом перевести в режим «8928 Гц».

Согласование сопротивлений генератора и нагрузки. Более дальнюю трассировку при длительном режиме работы обеспечивает согласованный режим работы генератора.

Согласовывать генератор с нагрузкой необходимо по стрелочному индикатору тока в нагрузке 6 (см. рис. 3.1). Оптимальным является режим работы генератора, когда стрелка индикатора находится в положении 0 дБ. Приемлемым считается режим работы генератора, при котором стрелка индикатора тока в нагрузке находится в пределах -2 дБ... $+2$ дБ.

Согласование сопротивлений генератора и нагрузки необходимо начинать с крайнего левого положения переключателя согласования нагрузки. Оптимальным считается согласование при положении переключателя, при котором стрелка индикатора прекращает движение.

Настройка приёмника и электромагнитной антенны на выбранный диапазон достигается выбором режима работы переключателем работы приёмника 5 (см. рис. 3.3) и установкой требуемой громкости головных телефонов. Режимы «1024 Гц» и «8928 Гц» используются совместно с генератором при синхронном выборе режимов работы генератора и приёмника.

Включать приёмник необходимо после включения генератора на некотором удалении (2–5 м) генератора и приёмника друг от друга.

Использование рамочной антенны оправдано в тех случаях, когда необходимо трассировать короткие (не более 200–800 м) участки трассы, либо когда нет возможности подключиться к исследуемому объекту или обеспечить хорошее заземление, либо когда возникает необходимость трассировать кабель, находящийся под напряжением.

Располагать рамочную антенну необходимо по направлению трассировки в непосредственной близости от объекта трассировки (см. рис. 3.7).

Необходимо помнить, что частота излучения 8928 Гц может наводиться (переизлучаться) на рядом проходящие коммуникации, что может вызвать ошибку в трассировке. В таком случае необходимо перейти на частоту излучения 1024 Гц, отключив рамочную антенну и подключившись непосредственно к кабелю.

Поиск коммуникации осуществляется согласно описанным в инструкции по эксплуатации методам максимума или минимума (п. 3.5.2).

4. Определить местоположение обесточенного силового кабеля.

При определении местоположения обесточенного силового кабеля используется активный режим поиска (трассопоиск с использованием генератора).

Для правильной работы с прибором при активном поиске необходимо:

- а) определить тип подключения генератора;
- б) выбрать режим работы генератора;
- в) согласовать сопротивление генератора и нагрузки;
- г) настроить приёмник и электромагнитную антенну.

Определение типа подключения генератора и выбор режима работы генератора.

Подключение генератора к коммуникации осуществляется путём присоединения выходных клемм генератора (вывод 8А) и (вывод 8Б) к коммуникации по одной из схем подключения (см. рис. 3.10–

3.12). Подключение к коммуникации осуществляется в любом удобном месте

зажимом «крокодил».

· Для качественного определения места прохождения трассы необходимо руководствоваться следующими правилами:

а) более дальнюю трассировку, менее всего подверженную действиям помех, обеспечивают режимы с использованием частоты 8928 Гц;

б) более дальняя трассировка обеспечивается при непосредственном подключении генератора и нагрузки;

в) более длительный режим работы генератора – это импульсный режим работы (импульсный сигнал генератора хорошо воспринимается и различается на фоне помех оператором).

Состояние положения переключателя «РЕЖИМ»:

8928 8928 Гц непрерывный;

8928 8928 Гц импульсный;

1024 1024 Гц непрерывный;

1024 1024 Гц импульсный.

· Согласование сопротивлений генератора и нагрузки производится в той же последовательности, что и при работе с применением рамочной антенны (п. 8.4.3).

· Настройка приёмника и электромагнитной антенны на выбранный диапазон достигается выбором режима работы переключателем работы приёмника и установкой требуемой громкости головных телефонов. Следует помнить, что режимы «1024 Гц» и «8928 Гц» используются совместно с генератором при синхронном выборе режимов работы генератора и приёмника.

5. При определении трассы обесточенного кабеля необходимо обеспечить протекание возвратного тока генератора (см. рис. 3.10–3.12).

Рекомендуется использовать схему подключения генератора к объекту исследования с протеканием возвратного тока по жиле (см. рис. 3.12). При этом методе трассировки генератор подключить к двум жилам с одной стороны кабеля, с другой стороны жилы необходимо объединить (см. рис. 3.12). Поиск трассы осуществлять, расположив антенну ЭМД параллельно коммуникации (см. рис. 3.7).

6. Определить наличие соединительных муфт и глубины залегания скрытых коммуникаций.

Определение наличия соединительных муфт.

При определении положения кабельных муфт необходимо предварительно произвести трассировку кабеля. Генератор подключить к двум жилам кабеля на одной стороне, на другом конце кабеля жилы необходимо объединить. Перемещая антенну ЭМД вдоль трассы, регистрировать максимумы и минимумы сигнала. Изменение интервала указывает на расположение муфты (см. рис. 3.13).

Определение глубины залегания скрытых коммуникаций.

При определении глубины залегания подземных коммуникаций необходимо учитывать рельеф местности. Для получения точного результата выбирать ровные участки поверхности. Найти место прохождения трассы (желательно методом минимума).

Произвести разметку. Установить антенну датчика под углом 45° к поверхности в направлении от коммуникации. Удаляясь от коммуникации, зафиксировать минимум сигнала (см. рис. 3.9).

Глубина залегания трубопровода А будет равна длине участка поверхности от центра расположения исследуемой коммуникации до края антенны датчика А.

7. При определении мест повреждения кабельной линии необходимо уделять особое внимание уровню сигнала в головных телефонах, так как резкое изменение уровня сигнала в них свидетельствует о изменении параметров трассируемого объекта (обрыв, короткое замыкание кабеля). При обрыве кабеля сигнал исчезает, а при коротком замыкании происходит искажение сигнала.

5.4 Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- описание цели работы;
- краткое описание приборов, использованных в работе;
- план трассировки силовых кабелей с привязкой к сооружениям в произвольном масштабе с указанием глубины залегания через каждые 10 м и места повреждения кабеля;
- выводы о состоянии и пригодности к эксплуатации исследуемых силовых кабелей.

5.5. Контрольные вопросы

1. Чем отличается пассивный режим трассопоиска от активного?
2. Когда и при каких режимах трассопоиска применяется рамочная антенна?
3. Какие условия должны выполняться при установке заземления?
4. Как производится согласование сопротивлений генератора и нагрузки?
5. Перечислить необходимые условия для обеспечения дальней трассировки.
6. Как определить местонахождение муфты кабеля?
7. В чем различие сигнала при обрыве жил кабеля от сигнала при местонахождении кабельной муфты?

Лабораторная работа № 6

ИСПЫТАНИЕ ИЗОЛЯЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ

Цель работы:

- снятие электрических характеристик линейных изоляторов напряжением промышленной частоты в зависимости от состояния их поверхностей;
- сравнение мокроразрядных характеристик изолятора в зависимости от его положения относительно вертикальной оси:
 - а) вертикального;
 - б) под углом 45° к вертикальной плоскости дождя;
- сравнительная оценка разрядных характеристик различных типов изоляторов в зависимости от состояния поверхности.

6.1. Общие сведения

Для изоляции отдельных частей электрических установок, имеющих разные потенциалы, например, провода ЛЭП, их прежде всего необходимо удалить друг от друга на определенное расстояние, чтобы основной изолирующей средой служил воздух. В местах крепления провода изолируются от земли с помощью изоляторов. Нарушение электрической прочности изолятора может произойти путем пробоя твердого диэлектрика или путем разряда воздуха по поверхности изолятора. В первом случае изолятор выходит из строя, и может быть нарушена механическая целостность конструкции. Во втором случае, если после перекрытия напряжение с изолятора будет быстро снято, например под действием релейной защиты, то в большинстве случаев изолятор останется не поврежденным. Поэтому все изоляторы конструируются таким образом, чтобы их пробивное напряжение было выше напряжения перекрытия по поверхности.

Оценка электрической прочности и величина выдерживаемого изоляторами напряжения без перекрытия в общем случае делается на основании трех характеристик:

- сухоразрядного напряжения промышленной частоты;
- мокроразрядного напряжения промышленной частоты;
- вольт-секундной характеристики, полученной при стандартной волне напряжения.

Сухоразрядное напряжение переменного тока при промышленной частоте 50 Гц является главной характеристикой изоляторов, предназначенных для работы в

закрытых помещениях, для изоляции внутренних установок. Сухоразрядное напряжение определяется при чистой и сухой поверхности изоляторов.

На величину сухоразрядного напряжения влияют температура, давление и влажность окружающей среды в условиях опыта. Поэтому сухо-разрядное напряжение в условиях опыта должно быть приведено к нормальным условиям

где U_i – измеренное напряжение в условиях опыта; K_p , K_t , K_g – поправочные коэффициенты, зависящие соответственно от давления, температуры и абсолютной влажности воздуха.

Произведение коэффициентов $K_p \times K_t$ оценивается коэффициентом относительной плотности воздуха d . Поправочный коэффициент, зависящий от влажности воздуха, в условиях лаборатории можно принять равным единице

где P – давление воздуха в условиях опыта, мм рт. ст.; t – температура в условиях опыта. За нормальные атмосферные условия принимаются:

- температура воздуха 20 °С;
- атмосферное давление 760 мм рт. ст.;
- абсолютная влажность 11 г/м³.

Мокроразрядное напряжение изоляторов в сильной степени зависит от характера дождя. Для того чтобы иметь возможность сопоставить мокроразрядные характеристики, дождь «стандартизируется».

В лабораторных условиях испытания производятся при «стандартном» искусственном дожде, имеющем капельную структуру и падающем под углом 45° к оси изолятора.

Интенсивность дождя $3 \pm 0,3$ мм/мин, удельное сопротивление воды 100 ± 10 Ом·м при температуре воды 20 °С или приведенном к 20 °С.

Так как разряд при дожде развивается частично вдоль смоченной поверхности, а частично по воздуху, то величина измеренного напряжения должна быть приведена к нормальным условиям по выражению

где P_0 – нормальное атмосферное давление; P – атмосферное давление в условиях опыта.

При профилактических испытаниях величина испытательного напряжения принимается на 10–25 % ниже заводских норм, указанных в государственном стандарте. Этим снижением учитывается постоянное старение изоляции и появление опасности накопления дефектов, возникающих при испытаниях.

Вольт-секундные характеристики снимаются только при сухой и чистой поверхности изоляторов (в данной лабораторной работе не снимаются).

6.2 Описание испытательной установки

Лабораторный стенд по испытаниям на сухоразрядное и мокроразрядное напряжение представляет собой совокупность высоковольтного испытательного оборудования и вспомогательного дождевального и водообменного оборудования, а также несущих конструкций. Все условия испытаний соответствуют требованиям ГОСТ 15162–76.

Дождевальная установка создает «стандартный» дождь. Дождь равномерной капельной структуры. Зона действия перекрывает габарит испытываемого объекта.

В комплект дождевального оборудования входят: электронасос, рассеиватель, соединительные шланги, водосборник (основной), водосборник (установочный), ЛАТР (лабораторный автотрансформатор), емкость с водой.

Источником напряжения промышленной частоты служит высоковольтная испытательная установка типа АИД-70 (см. рис. 2.1–2.3).

В качестве объекта испытаний применяем различные подвесные изоляторы, разрядные

напряжения которых не превышают номинальное напряжение, выдаваемое испытательным трансформатором, а именно ПФ6-А; ПС6-А; ПФ16-А; ПС16-А; ШФ10-А; ШС10-А.

6.3 Порядок выполнения работы

1. Закрепить подвесной изолятор к несущей конструкции.
2. Присоединить нижний полюс изолятора к высоковольтным выводам аппарата АИД-70.
3. С разрешения руководителя включить аппарат в сеть и плавно 1–2 кВ/с) повышать напряжение до перекрытия изолятора по поверхности. По киловольтметру замерить напряжение перекрытия изолятора.
4. Данные занести в табл. 9.1.

5. Испытание повторить три раза с интервалом между приложением напряжения в 1 минуту. После испытания вывести рукоятку регулятора в нулевое положение и отключить аппарат.
6. Подготовить к работе дождевальную установку, для чего опустить электронасос в емкость с водой, укрепить на расстоянии 10–20 см до дна емкости.
7. Включать и выключать электронасос только после погружения его в воду.
8. Подключить в цепь нагрузки ЛАТРа электронасос и вольтметр по схеме рис. 9.1.
9. Установить регулятор напряжения ЛАТРа в нулевое положение.
10. Подключить ЛАТР к клеммам ~ 220В распределительного щита.
11. Подать напряжение на щит.
12. Установить заданную интенсивность водного потока с помощью регулятора напряжения ЛАТР, для чего установить значение напряжения в соответствии с данными табл. 9.2.
13. Подать высокое напряжение на испытываемый изолятор после пребывания его под дождем не менее 5 мин.

Рис. 9.1. Схема подключения электронасоса

14. Плавно повышать напряжение до перекрытия изолятора. Снять показания киловольтметра в момент перекрытия изолятора. Испытание повторить три раза с интервалом между приложением напряжения 1 мин. Снятые данные записать в табл. 9.1, отключить высоковольтный трансформатор.
15. Вывести из работы дождевальную установку, для чего установить регулятор напряжения ЛАТРа в нулевое положение и отключить питание ЛАТРа выключателем на щите.
16. Установить изолятор в вертикальное положение, подключить высоковольтный провод к нижнему полюсу изолятора.
17. Подать дождь в соответствии с п. 9–12.
18. Провести испытание аналогично п. 14.
19. По заданию преподавателя установить другой тип изолятора и произвести его испытание под дождем. Испытание под дождем производить при двух положениях изоляторов:
 - а) под углом 45° к вертикальной оси изолятора;
 - б) вертикально.
20. Снять показания и занести в табл. 9.1.
21. Отключить дождевальную установку от сети.
22. Испытательные сухоразрядные и мокроразрядные напряжения, полученные в условиях опыта, привести к нормальным условиям по методике, изложенной в подразд.

9.2. Данные расчета записать в табл. 9.1 в графу «Приведенное напряжение».
Приведенные значения разрядных напряжений, полученные в лабораторных условиях, необходимо сравнивать с нормированными испытательными напряжениями, приведенными в табл. 9.3.
По результатам полученных данных произвести сравнительную оценку разрядных напряжений в зависимости от условий испытания и сделать выводы.

6.4 Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- описание цели работы;
- принципиальные электрические схемы дождевальной установки и высоковольтного аппарата АИД-70;
- таблицы результатов измерения;
- заключение о пригодности изоляторов к эксплуатации;
- выводы о влиянии состояния поверхности изоляторов на разрядные характеристики.

6.5 Контрольные вопросы

1. От каких факторов зависят величины мокроразрядных напряжений?
2. Объясните физический смысл сопротивления утечки R_u , как оно влияет на разрядное напряжение?
3. Каким образом можно увеличить сопротивление R_u ?
4. Почему при испытании изоляции ГОСТ 1516.2–76 регламентируются параметры дождя?
5. Какие мероприятия необходимо реализовать, чтобы обеспечить надежную работу изоляционных конструкций в условиях увлажненной и засоленной атмосферы?
6. Почему разрядные напряжения по поверхности изоляторов ниже, чем пробой воздушного промежутка?
7. Что такое удельная эффективная длина пути утечки гирлянды изоляторов и от каких параметров она зависит?
8. Как влияет расположение изоляции на высоте более 1000 м над уровнем моря на разрядные напряжения?

Лабораторная работа № 7

Импульсные процессы в грозозащитных заземлителях

Цель работы – изучение импульсных процессов в протяженных грозозащитных заземлителях при стекании с них больших токов молнии с применением программы Matlab.

Общие сведения

Импульсное сопротивление грозозащитных заземлителей в значительной степени определяет уровень воздействия напряжений на изоляцию ЛЭП и изоляцию подстанционного оборудования. На процесс стекания импульсных токов протяженных заземлителей оказывает влияние процессы искрообразования, которые обуславливают нелинейность и реактивный характер заземлителей.

Известно, что в общем случае электрические характеристики грунта (удельное объемное сопротивление и диэлектрическая проницаемость) являются частотозависимыми. При наличии частотной дисперсии электрических параметров грунта частотные характеристики активной проводимости и емкости будут повторять по форме характеристики удельной проводимости и диэлектрической проницаемости.

Однако, в настоящее время отсутствуют работы, описывающие импульсные процессы в протяженных заземлителях, нелинейность, обусловленную процессом искрообразования и частотную зависимость электрических параметров грунта.

Для исследования физических процессов в протяженных заземлителях разработана математическая модель, учитывающая нелинейность параметров заземлителя и частотную дисперсию грунта.

В высокоомных грунтах для обеспечения необходимой величины сопротивления заземлителя приходится увеличивать геометрические размеры электродов. Заземлители большой длины называют протяженными заземлителями.

На процесс стекания импульсных токов с протяженных заземлителей оказывают влияние реактивные параметры заземлителя и процессы искрообразования, поэтому протяженные заземлители принято рассматривать как длинные линии с нелинейной поперечной погонной проводимостью. В данной лабораторной работе для расчета потенциалов на протяженном заземлителе при стекании импульсных токов рассматривается возможность использования системы MatLAB. Рассмотрен процесс протекания импульса тока молнии по горизонтальному заземлителю заданной длины l_z , расположенному на глубине h в грунте с удельным сопротивлением ρ . Этот заземлитель рассматривается как линия с распределенными параметрами и разбит на одинаковые участки длиной 1 м. Каждый участок представлен Г-образной цепочкой (см. рис. 1) с параметрами r , L , C , R_n .

Рис. 1. Схема замещения для расчета протяженного заземлителя с учетом его емкости и искровых процессов в земле. r – погонное продольное активное сопротивление заземлителя, L и C — соответственно индуктивность и емкость единицы длины заземлителя, R_n — нелинейное поперечное сопротивление единицы длины заземлителя

Численный расчет погонных параметров протяженного заземлителя

Погонное продольное активное сопротивление, Ом:

(1)

где ρ – удельное сопротивление стали, Ом мм²/м, $\rho_{ст} = 0,14$ Ом мм²/м,

S – площадь поперечного сечения заземлителя, мм²,

l – длина участка заземлителя (длина одной Г-образной цепочки принята 1м)

Погонная индуктивность заземлителя, Гн/м.

Для численного расчета погонной индуктивности L принимаем [1]:

$$L = \mu_0 / \pi \ln 2 / (\gamma' m_2 \sqrt{(2r_0 h)}), \quad (2)$$

где $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6}$ Гн/м – магнитная постоянная;

$\gamma' = 1,781 \dots$ – постоянная Эйлера;

m_2 – поперечное волновое число грунта, 1/м:

$$m_2 = \sqrt{(k_2^2 + \gamma^2)}$$

Значение m_2 для неизолированного провода можно приближенно принять равным $\sqrt{2} k_2$ [2], k_2 – волновое число грунта:

$$k_2 = \omega \sqrt{(\epsilon_2 \mu_2)}$$

r_0 – радиус заземлителя, м,

$$31416 \text{ рад/с.}$$

Принимаем также $\epsilon_2 = \epsilon_0$ (ϵ_0 – магнитная постоянная).

$$[\epsilon']_2 = \epsilon_0 \epsilon_2 + 1/j\omega\rho,$$

где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная,

$\epsilon_2 = 10$ – относительная диэлектрическая проницаемость грунта.

Погонная емкость заземлителя, Ф/м.

Для численного расчета погонной емкости принимаем модуль величины C выражения [3]:

$$C = \epsilon_0 \epsilon_2 \cdot 2\pi / (\ln 2 / (\gamma' m_2 \sqrt{(2r_0 h)})), \quad (3)$$

ρ – удельное сопротивление грунта, Ом/м;

h – глубина заложения горизонтального заземлителя, м.

Погонное поперечное сопротивление единицы длины заземлителя.

Особенностью расчета нелинейного сопротивления участка 1 м горизонтального

заземлителя является учет отсутствия искрообразования при малых токах, протекающих по заземлителю и возникновение зоны искрообразования при больших токах. Предельный ток, при меньшем значении которого искрообразования нет, находится из условия, что зона искрообразования ограничена поперечной плоскостью электрода, т. е. фиктивный радиус зоны искрообразования $r_{\text{ф}}$ равен радиусу электрода r_0 . При этом условии ток равен [4]:

(4)

где $E_{\text{пр}}$ – электрическая прочность грунта, В/м,

ρ – удельное сопротивление грунта, Ом·м.

При протекании по горизонтальному заземлителю тока молнии, вызывающего электрическое поле напряженностью меньше электрической прочности грунта $E_{\text{пр}}$, то есть при отсутствии искрообразования в диапазоне тока $[0; I_{\text{пр}}]$, сопротивление является величиной постоянной, не зависящей от протекающего по заземлителю тока, и рассчитывается по выражению [4]:

$$R_0 = \rho / 2\pi l \ln(l^2 / (2hr_0)) \quad (5)$$

Превышение протекающим по заземлителю током значения $I_{\text{пр}}$ вызывает процесс искрообразования, что объясняет нелинейный характер сопротивления R_n , принимающего вид [4]:

$$R_n = \rho / 2\pi l \ln((\pi l^3 E_{\text{пр}}) / h I_{\text{пр}}) \quad (6)$$

где I – ток, протекающий по участку заземлителя, А.

Таким образом, вольт-амперная характеристика (ВАХ) нелинейного сопротивления R_n имеет 2 участка (см. рис. 2): линейный в диапазоне $[0; I_{\text{пр}}]$, где поперечное сопротивление рассчитывается по выражению (5), и нелинейный диапазоне $(I_{\text{пр}}; I_{\text{мах}}]$, где R_n рассчитывается по выражению (6).

Рис. 2. ВАХ нелинейного сопротивления, рассчитываемого по выражениям (5) и (6)

Здесь $I_{\text{мах}}$ – максимальное значение тока ВАХ нелинейного элемента.

(7)

где e – постоянная экспонента;

$U_{\text{мах}}$ – максимальное значение напряжения ВАХ нелинейного элемента:

(8)

Из выражения (8) видно, что $U_{\text{мах}}$ не зависит от ρ и будет одинаковым для грунтов с разными удельными сопротивлениями.

Для расчета принят стальной заземлитель круглого сечения радиусом $r_0 = 0,005$ м, длиной $l_z = 50$ м, проложенный параллельно плоскости земли на глубине 0,7 м. В таблице 1 приведены погонные параметры горизонтального заземлителя (участок длиной 1 м) для грунтов с разными объемными удельными сопротивлениями, рассчитанными по выражениям (1), (2), (3), (5), принимая значения относительной диэлектрической проницаемости постоянной и равной 10, электрической прочности грунта $E_{\text{пр}} = 10$ кВ/см (106 В/м).

Таблица 1. Параметры заземлителя длиной 1 м

№ п/п Удельное объемное сопротивление грунта, Ом·м Активное продольное сопротивление r , Ом Индуктивность L , Гн Емкость C , Ф Активное поперечное сопротивление R_0^* , Ом

1	30	1,78	10-3	2,2268	10-6	9,993	10-11	23,69
2	100		2,4675	10-6	9,0178	10-11	178,97	
3	500		2,7894	10-6	7,9772	10-11	1394,85	
4	1000		2,9281	10-6	7,5995	10-11	1789,70	

5 5000 3,2499 10-6 6,8469 10-11 3948,51

* Сопротивление R_0 является величиной постоянной при величине протекающего по нему тока меньше $I_{пр}$ (4), то есть, когда отсутствует процесс искрообразования. При силе тока, превышающей значение $I_{пр}$, поперечное активное сопротивление носит нелинейный характер и рассчитывается по выражению (6).

На рисунке 3 показаны ВАХ поперечных активных сопротивлений при различных удельных объемных сопротивлениях грунта. Пределы для построения ВАХ (U_{max} , I_{max}) рассчитаны по выражениям (7) и (8) (см. таблицу 2).

Таблица 2. Пределы для построения ВАХ (U_{max} , I_{max}) для различных удельных объемных сопротивлений грунта

№ п/п	Удельное	объемное сопротивление грунта	, Ом м	U_{max} , кВ	I_{max} , кА
1	30	262,771		55,034	
2	100		16,510		
3	500		3,302		
4	1000		1,651		
5	5000		0,330		

Рис. 3. ВАХ нелинейного элемента при разных удельных сопротивлениях грунта
В результате проведенных расчетов получены параметры схемы замещения, показанной на рисунке 1, для создания модели протяженного заземлителя, а именно: индуктивность и емкость единицы длины заземлителя, величина его продольного активного сопротивления, а также поперечное активное сопротивление с учетом процесса искрообразования.

Моделирование протяженного заземлителя

Модель участка заземлителя с учетом процесса искрообразования.

Составление модели производится в среде Simulinc программного комплекса MatLAB. Продольное активное сопротивление, индуктивность и емкость моделируются с помощью блока Series RLC Branch (рис. 4) и задаются своими параметрами, рассчитанными в таблице 1 (рис. 5,а-в).

Рис. 4. Модель участка заземлителя длиной 1м

Рис. 5,а. Диалоговое окно бока активного сопротивления r

Рис. 5,б. Диалоговое окно бока индуктивности L
активного емкости C

Рис. 5,в. Диалоговое окно бока

Рис. 6. Диалоговое окно бока Arrester

Для создания модели участка длиной 1 м горизонтального заземлителя с нелинейной вольт-амперной характеристикой используется блок Arrester (ограничитель перенапряжений). ВАХ данного элемента задается тремя линейными участками (сегментами), характеризующимися параметрами k_i и α_i . Задание вольт-амперной характеристики нелинейного сопротивления R_n , соответствующей своему удельному

объемному сопротивлению в модели, осуществляется заполнением полей диалогового окна блока Arrester (см. рис. 6), а именно:

- «Protection voltage Vref(V)» – соответствует значению U_{max} таблицы 2;
- «Number of columns» – 1;
- «Reference current per column Iref(A)» – соответствует значению I_{max} таблицы 2;
- «Segment 1 characteristics [k1 alpha1]» – [0 0];
- «Segment 2 characteristics [k2 alpha2]» – [0 0];
- «Segment 3 characteristics [k3 alpha3]» – [1 2].

В таблице 3 приведены параметры модели нелинейного сопротивления R_n участка 1 м горизонтального заземлителя в зависимости от удельного объемного сопротивления грунта.

Таблица 3. Параметры модели нелинейного сопротивления участка 1 м горизонтального заземлителя

№ п/п	$\rho, \text{ Ом } \cdot \text{ м}$	$U_{max}, \text{ кВ}$	$I_{max}, \text{ кА}$	Number of columns	[k1 alpha1]	[k2 alpha2]	[k3 alpha3]
1	30	262,771	55,034	1	[0 0]	[0 0]	[1 2]
2	100	16,510					
3	500	3,302					
4	1000	1,651					
5	5000	0,330					

На рис. 7,а-д показаны ВАХ, рассчитанные в модели, в соответствии с таблицей 3.

Рис. 7,а. ВАХ нелинейного элемента модели, $\rho = 30 \text{ Ом } \cdot \text{ м}$ Рис. 7,б. ВАХ нелинейного элемента модели, $\rho = 100 \text{ Ом } \cdot \text{ м}$

Рис. 7,в. ВАХ нелинейного элемента модели, $\rho = 500 \text{ Ом } \cdot \text{ м}$ Рис. 7,г. ВАХ нелинейного элемента модели, $\rho = 1000 \text{ Ом } \cdot \text{ м}$

Рис. 7,д. ВАХ нелинейного элемента модели, $\rho = 5000 \text{ Ом } \cdot \text{ м}$

2. Модель всего заземлителя.

Модель одного участка заземлителя длиной 1 м показана на рис. 4, модель всего заземлителя — на рис. 8, где каждая из подсистем (Subsystem1 – Subsystem5) представляет собой 10-метровый участок заземлителя, включающая в свою очередь 10 Г-образных цепочек (участков по 1м) (рис. 9).

Рис. 8. Модель горизонтального заземлителя (осциллограмма напряжения фиксируется в начале, в конце и через каждые 10 м)

Рис. 9. Участок заземлителя длиной 10 м

Импульсный источник тока молнии состоит из блока программируемого источника напряжения (Controlled Voltage Source) и источника сигнала (блок функций Fcn). Функция блока Fcn представлена выражением:

$$U = e^{(-\alpha t)} - e^{(-\beta t)} \quad (9)$$

где α – коэффициент затухания, β – коэффициент фазы.

В качестве источника времени используется генератор постоянно увеличивающегося или

уменьшающегося сигнала (Clock) (см. рис. 10).

Осциллографирование импульсов напряжения производится в начале заземлителя и в конце каждые 10 метров. На рисунках 11 – 15 показаны осциллограммы импульсов напряжения вдоль горизонтального заземлителя при различных удельных сопротивлениях грунта .

Рис. 10. Модель импульсного источника тока

Рис. 11. Осциллограммы импульсов напряжения вдоль заземлителя (через каждые 10 м) при $\rho = 30 \text{ Ом} \cdot \text{м}$

Рис. 12. Осциллограммы импульсов напряжения вдоль заземлителя (через каждые 10 м) при $\rho = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$

Рис. 13. Осциллограммы импульсов напряжения вдоль заземлителя (через каждые 10 м) при $\rho = 500 \text{ Ом} \cdot \text{м}$

Рис. 14. Осциллограммы импульсов напряжения вдоль заземлителя (через каждые 10 м) при $\rho = 1000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$

Рис. 15. Осциллограммы импульсов напряжения вдоль заземлителя (через каждые 10 м) при $\rho = 5000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$

3. Расчет целесообразной длины заземлителя.

Найдем с помощью полученной модели целесообразную длину горизонтального заземлителя при протекании тока молнии 200 кА и удельном сопротивлении грунта 100 Ом·м. Условно в данной работе критерием нецелесообразного использования более длинного заземлителя будет уменьшение импульсного сопротивления $R_{\text{и}}$ менее, чем на 5% при увеличении длины заземлителя на 1м.

На рисунках 16а,б представлены графики зависимости соответственно импульсного сопротивления $R_{\text{и}}$ и относительного изменения импульсного сопротивления $\delta R_{\text{и}}$ (в процентах) от длины заземлителя при учете реактивных параметров L и C , и при пренебрежении ими.

Рис. 16,а. Зависимость импульсного сопротивления заземлителя $R_{\text{и}}$ от длины с учетом и без учета влияния реактивных параметров L и C Рис. 16,б. Зависимость относительного изменения импульсного сопротивления заземлителя $\delta R_{\text{и}}$ от длины с учетом и без учета влияния реактивных параметров L и C

Из рисунков видно, что импульсное сопротивление заземлителя $R_{\text{и}}$ (при удельном сопротивлении грунта 100 Ом·м), рассчитанное с учетом влияния реактивных параметров, перестает изменяться более, чем на 5%, при длине электрода 3 м и более (т. е. целесообразная длина заземлителя равна 3 м). Без учета влияния L и C целесообразная длина заземлителя составит 11 м.

В таблице 4 приведены целесообразные длины заземлителей с учетом и без учета влияния

реактивных параметров L и C при разных удельных сопротивлениях грунта.

Таблица 4. Целесообразные длины заземлителей

№ п/п Удельное объемное сопротивление грунта, Ом·м Целесообразная длина заземлителя с учетом влияния L и C , м Целесообразная длина заземлителя без учета влияния L и C , м

1	30	2	11
2	100	3	11
3	500	4	11
4	1000	5	11
5	5000	6	11

Из таблицы 4 видно, что целесообразная длина заземлителя без учета влияния реактивных параметров не зависит от удельного объемного сопротивления грунта, что не отвечает действительности. Учет реактивных параметров отражает более реальную картину процессов протекания тока молнии по протяженному заземлителю и в практическом применении позволяет увеличить экономию средств при проектировании и монтаже заземляющих устройств, особенно при малых значениях удельных объемных сопротивлений грунта.

Аналитический расчет импульсного сопротивления заземлителя, не учитывающий реактивные параметры и процесс искрообразования, не дает полного представления о процессе протекания тока молнии по заземлителю с учетом реактивных параметров. Напротив, использование математической модели позволяет учесть нелинейный характер искрообразования, учесть реактивные параметры и рассмотреть протяженный заземлитель как линию с распределенными параметрами.

Программа выполнения работы по определению целесообразной длины протяженного горизонтального заземлителя

В соответствии с выбранным вариантом (см. таблицу 5) запустить в программе Matlab файл с моделью горизонтального заземлителя без учета реактивных параметров.

Таблица 5.

№ варианта Удельное объемное сопротивление грунта, Ом·м Название файлов моделей

1	30	30Omm.mdl
2	100	100Omm.mdl
3	500	500Omm.mdl
4	1000	1000Omm.mdl
5	5000	5000Omm.mdl

В соответствии с выбранным вариантом (см. таблицу 6) запустить файл (в формате *.xls).

Таблица 6.

№ варианта Удельное объемное сопротивление грунта, Ом·м Название файлов моделей

1	30	Расчет I_{Σ} (30 Ом).xls
2	100	Расчет I_{Σ} (100 Ом).xls
3	500	Расчет I_{Σ} (500 Ом).xls
4	1000	Расчет I_{Σ} (1000 Ом).xls
5	5000	Расчет I_{Σ} (5000 Ом).xls

Поочередно удаляя из модели ячейки длиной 1 м, производить расчет напряжения

и тока в начале заземлителя и заносить их в желтое поле таблицы файла *.xls.

Определить целесообразную длину заземлителя. Критерием нецелесообразной длины заземлителя будет уменьшение относительного изменения импульсного сопротивления ΔR менее 5%.

Выполнить указания пунктов 1 – 4 (см. выше) для горизонтального заземлителя с учетом реактивных параметров по вариантам. При этом расчет напряжений и токов в начале заземлителя производится в моделях:

Таблица 7.

№ варианта	Удельное объемное сопротивление грунта , Ом м	Название файлов моделей
1	30	30OmmLC.mdl
2	100	100OmmLC.mdl
3	500	500OmmLC.mdl
4	1000	1000OmmLC.mdl
5	5000	5000OmmLC.mdl

Произвести сравнение расчета целесообразной длины горизонтального протяженного заземлителя с учетом и без учета реактивных параметров L и C.

5.1.3 Методические указания для обучающихся по самостоятельной работе:

Подготовка к практическим занятиям включает в себя самостоятельное изучение методических указаний, знакомство с теоретическим материалом, подготовку к ответам на вопросы по каждой работе с использованием рекомендуемой нормативной, учебной и научной литературы, тщательное и осознанное ознакомление с методикой выполнения практической работы.

Промежуточный контроль знаний проводится в виде устных опросов и предусматривает предварительную работу обучающегося с учебными материалами, конспектами лекций, с использованием теоретических и практических материалов, а также дополнительной учебной литературы и ресурсов Интернета.

Самостоятельное изучение разделов курса включает в себя работу с источниками, которую необходимо начинать с ознакомительного чтения, т.е. просмотреть текст, выделяя его структурные единицы.

По результатам самостоятельной работы обучающийся способен подготовить обоснованный ответ по заданной теме.

6 Фонд оценочных средств для контроля текущей успеваемости и проведения промежуточной аттестации по дисциплине

6.1 Оценочные средства для проведения текущего контроля

6.1.1 семестр 1 | Отчет

Описание процедуры.

Защита отчёта во время занятия

Критерии оценивания.

- 1) полнота и правильность выполнения;
- 2) степень осознанности, понимания изученного;

6.2 Оценочные средства для проведения промежуточной аттестации

6.2.1 Критерии и средства (методы) оценивания индикаторов достижения компетенции в рамках промежуточной аттестации

Индикатор достижения компетенции	Критерии оценивания	Средства (методы) оценивания промежуточной аттестации
ПК-1.5	уметь: - выполнять необходимые расчёты и выбор изоляции и изоляционных конструкций; - выполнить необходимые расчёты и оценку перенапряжений, воздействующих на электроустановки в системе электроснабжения; - выполнять необходимые расчёты и выбор устройств защиты от перенапряжений; - выполнять необходимые расчёты и проектирование молниезащиты объектов электроэнергетики промышленных зданий и сооружений; - выполнить типовые измерения при высоковольтных испытаниях. Владеть: терминалогией	Устное собеседование по теоретическим вопросам и выполнение лабораторных и практических работ
ПК-5.1	уметь: - выполнять необходимые расчёты и выбор изоляции и изоляционных конструкций; - выполнить необходимые расчёты и оценку перенапряжений, воздействующих на электроустановки в системе электроснабжения; - выполнять необходимые расчёты и выбор устройств защиты от перенапряжений; - выполнять необходимые расчёты и проектирование молниезащиты объектов электроэнергетики промышленных зданий и сооружений; - выполнить типовые измерения при высоковольтных испытаниях. Владеть: терминалогией	Устное собеседование по теоретическим вопросам и выполнение лабораторных и практических работ

6.2.2 Типовые оценочные средства промежуточной аттестации

6.2.2.1 Семестр 1, Типовые оценочные средства для проведения экзамена по дисциплине

6.2.2.1.1 Описание процедуры

Экзамен проходит в формате собеседования с обучающимся. К экзамену допускаются обучающиеся, которые присутствовали на всех занятиях и выполнили все работы. Оценивается понимание пройденного материала. В случае невыполнения критерия оценивания назначается дата пересдачи, но не более 2 раз с последующим опросом по всем темам дисциплины.

Пример задания:

1. Дайте классификацию конфигурации электрических полей.
2. Объясните процесс образования лавины электронов.
3. В чем заключается сущность ударной ионизации.
4. В чем заключается сущность фотоионизации.
5. Приведите графическое представление закона Пашена.
6. Объясните поправку на относительную плотность воздуха: смысл и математическое выражение.
7. В чем заключается эффект полярности при пробое газа.
8. Объясните барьерный эффект в газе при положительной полярности острия.
9. Объясните барьерный эффект в газе при отрицательной полярности острия.
10. Дайте объяснение процесса развития разряда вдоль сухой и чистой поверхности в поле с преобладающей тангенциальной составляющей.
11. Дайте объяснение процесса развития разряда вдоль сухой и чистой поверхности в поле с преобладающей нормальной составляющей.
12. Объясните суть процесса коронирования на переменном напряжении.
13. Дайте определение вольт-секундным характеристикам изоляции и их назначению.
14. Как происходит пробой жидких диэлектриков?
15. Как происходит пробой твердой изоляции?
16. Перечислите условия работы и требования, предъявляемые к высоковольтной изоляции оборудования.
17. Сформулируйте назначение и конструктивные особенности изоляции воздушных ЛЭП.
18. Назовите особенности назначения и конструктивного исполнения проходных изоляторов.
19. Объясните особенности высоковольтных вводов по назначению, типу изоляции, конструктивному исполнению.
20. Объясните особенности силовых трансформаторов по назначению, конструктивному исполнению изоляции.
21. В чем заключаются особенности силовых кабелей по назначению и конструктивному исполнению.
22. В чем заключаются особенности конструктивного исполнения силовых кабелей с вязкой пропиткой.
23. Объясните особенности изоляции вращающихся машин высокого напряжения по типу и материалу изоляции, конструктивному исполнению.
24. Перечислите и дайте характеристику основным методам профилактических испытаний изоляции высоковольтного оборудования в эксплуатационных условиях.
25. Как классифицируются трансформаторы в высоковольтной технике?
26. Какие требования предъявляются к испытательным трансформаторам?
27. Приведите способы получения высокого напряжения постоянного тока.
28. Какие существуют схемы выпрямления?
29. Приведите основные элементы схемы выпрямления?
30. Каким образом можно получить высокое импульсное напряжение? Где и для чего

используется высокое импульсное напряжение?

31. Объясните схему и принцип работы генератора Аркадьева- Маркса.
32. Каким образом можно получить большие импульсные токи? Где и для чего они применяются?
33. Объясните схему и принцип работы генератора импульсных токов?
34. В чем принципиальное различие в работе ГИН и ГИТ?
35. Назовите способы измерения высоких напряжений. В чем состоят сложности при измерении на высоком напряжении?
36. Каким образом осуществляется измерение больших импульсных токов?
37. Дайте классификацию перенапряжений и их кратности.
38. В чем принципиальное отличие внешних перенапряжений от внутренних?
39. Почему грозовые перенапряжения наиболее опасны для сетей средних классов напряжений, а коммутационные – для сетей высших классов напряжений?
40. Объясните принцип грозозащиты ЛЭП и подстанций.
41. Дайте графическое представление зоны защиты двух стержневых молниеотводов.
42. Объясните принцип защиты подстанций от набегающих волн с ЛЭП.
43. В чем заключается принцип защиты тросовым молниеотводом.
44. Почему при прохождении по воздушной ЛЭП импульсов высокого напряжения происходит значительное изменение фронта импульса?
45. Как импульсная корона влияет на параметры грозового импульса, распространяющегося по линии электропередач.
46. Дайте анализ коэффициентов преломления и отражения.
47. Почему при воздействии на обмотку трансформатора импульсного напряжения возникает неравномерное распределение напряжения по виткам обмотки?
48. Дайте графическое представление волновым процессам в трехобмоточном трансформаторе, когда его обмотки соединены в треугольник.

Тест

N01 (Ларионов, § 1.1)

Какие виды ионизации присутствуют при разрядах в газах?

1. Ударная и термическая ионизация.
2. Все виды, указанные в других ответах.
3. Фотоионизация в объеме газа.
4. Поверхностная ионизация на электродах.

N02 (Ларионов, § 1.1)

Каков основной вид ионизации в газах при нормальных атмосферных условиях разряда?

1. Фотоионизация в объеме газа.
2. Термическая ионизация.
3. Ударная ионизация.
4. Поверхностная ионизация на электродах.

N03 (Ларионов, § 1.1)

Каков основной вид ионизации в газах при высокой температуре разряда?

1. Термическая ионизация.
2. Ударная ионизация.
3. Фотоионизация в объеме газа.
4. Плверхностная ионизация на электродах.

N04 (Ларионов, § 1.2)

Что обозначает коэффициент ударной ионизации электронами при разряде в газах?

1. Число ионизаций, совершенных всеми электронами на пути в 1 см по направлению

движения в электрическом поле.

2. Число ионизаций, совершенных одним электроном в течение 1 с по направлению движения в электрическом поле.

3. Число ионизаций, совершенных одним электроном при увеличении температуры межэлектродного пространства на 1 °С.

4. Число ионизаций, совершенных одним электроном на пути в 1 см по направлению движения в электрическом поле.

N05 (Ларионов, § 1.2)

Что влияет на величину коэффициента ударной ионизации электронами при разряде в газах?

1. Материал электродов и вид напряжения.
2. Скорость нарастания напряжения и влажность газа.
3. Напряженность электрического поля E и давление газа p .
4. Все факторы, указанные в других ответах.

N06 (Ларионов, § 1.2)

Какие процессы вторичной ионизации обеспечивают выполнение условия самостоятельности разряда в газах?

1. Поверхностная ионизация на катоде при нормальном и большом давлении и фотоионизация в объеме газа при малом давлении газов.
2. Поверхностная ионизация на катоде при малом давлении газов и фотоионизация в объеме газа при нормальном и большом давлении газов.
3. Поверхностная фотоионизация на катоде при любом давлении газов.
4. Фотоионизация в объеме газа при любом давлении газа в промежутке

N07 (Ларионов, § 1.3)

Что называется стримером при разряде в газах?

1. Пространство, заполненное плазмой (отрицательными и положительными частицами с высокой степенью плотности).
2. Начальная лавина электронов у катода.
3. Вторичные лавины в объеме газа.
4. Электрическая дуга при разряде.

N08 (Ларионов, § 5.1)

По каким последовательным этапам происходит развитие разряда в газах в однородном поле?

1. Появление эффективного электрона, образование стримера, образование лавины электронов, выполнение условия самостоятельности разряда и перекрытие промежутка.
2. Появление эффективного электрона, образование лавины электронов, выполнение условия самостоятельности разряда, образование стримера и перекрытие промежутка.
3. Образование лавины электронов, появление эффективного электрона, образование стримера, выполнение условия самостоятельности разряда и перекрытие промежутка.
4. Появление эффективного электрона, выполнение условия самостоятельности разряда, образование стримера, образование лавины электронов и перекрытие промежутка.

N09 (Ларионов, § 5.1)

Как формулируется закон Пашена при пробое промежутка в однородном электрическом поле?

1. Пробивное напряжение газа является функцией произведения температуры газа на расстояние между электродами.

2. При неизменной температуре пробивное напряжение газа является функцией произведения давления газа на расстояние между электродами.
3. При неизменной температуре пробивное напряжение газа является функцией произведения плотности газа на расстояние между электродами.
4. При любой температуре пробивное напряжение газа является функцией произведения влажности газа на расстояние между электродами.

N10 (Ларионов, § 5.1)

Какой вид имеет графическая зависимость закона Пашена при пробое промежутка в однородном электрическом поле?

1. Зависимость обозначена буквой А.
2. Зависимость обозначена буквой Б.
3. Зависимость обозначена буквой В.
4. Зависимость обозначена буквой Г.

N11 (Ларионов, § 5.2)

Как формулируется закон Пашена при пробое промежутка в неоднородном электрическом поле (закон подобия разрядов)?

1. При неизменной температуре пробивное напряжение газа является функцией произведения давления газа на расстояние между электродами и отношения к этому расстоянию основных геометрических размеров промежутка.
2. Пробивное напряжение газа является функцией произведения температуры газа на расстояние между электродами.
3. При неизменной температуре пробивное напряжение газа является функцией произведения плотности газа на расстояние между электродами и отношения к этому расстоянию основных геометрических размеров промежутка.
4. При любой температуре пробивное напряжение газа является функцией произведения влажности газа на расстояние между электродами.

N12 (Ларионов, § 6.1)

Из каких составляющих складывается время разряда в газах?

1. Только из времени формирования разряда.
2. Из времени подъема напряжения и времени формирования разряда.
3. Из времени статистического запаздывания (время ожидания эффективного электрона) и времени формирования разряда.
4. Из времени подъема напряжения и времени горения дуги.

N13 (Ларионов, § 6.1)

Что называется вольт-секундной характеристикой изоляции?

1. Зависимость минимального напряжения разряда от времени горения дуги при разряде.
2. Зависимость приложенного напряжения к изоляции от времени его приложения.
3. Зависимость приложенного напряжения к изоляции от времени горения дуги.
4. Зависимость максимального напряжения разряда от времени действия импульса.

N14 (Ларионов, § 6.1)

Каким напряжением воздействуют на изоляцию для снятия ее вольт-секундной характеристики?

1. Любым импульсом высокой частоты.
2. Переменным напряжением 50 Гц различной амплитудой.

3. Постоянным напряжением различной амплитудой.
4. Стандартной волной напряжения $1,2/50$ мкс различной амплитудой.

N15 (Ларионов, § 6.1)

Как выглядят вольт-секундные характеристики изоляции в однородном и неоднородном полях?

1. Крутые для однородного и неоднородном полей.
2. Пологая в неоднородном поле и крутая в однородном поле.
3. Пологие для однородного и неоднородном полей.
4. Пологая в однородном поле и крутая в неоднородном поле.

N16 (Ларионов, § 7.1)

Как изменяется пробивное напряжение ($U_{пр}$) в однородном поле при внесении твердого диэлектрика в промежуток между электродами?

1. $U_{пр}$ уменьшается.
2. $U_{пр}$ увеличивается.
3. $U_{пр}$ не изменяется.
4. $U_{пр}$ при малых размерах диэлектрика уменьшается, а при больших – увеличивается.

N17 (Ларионов, § 7.1)

В однородном поле при внесении твердого диэлектрика в промежуток между электродами пробивное напряжение ($U_{пр}$) снижается. Чем это вызвано?

1. Наличием микротрещин в диэлектрике.
2. Различной величиной диэлектрической проницаемости воздуха и диэлектрика и наличием влаги на поверхности диэлектрика.
3. Различной величиной диэлектрической проницаемости воздуха и диэлектрика и нагревом электродов.
4. Различной величиной температуры воздуха и диэлектрика и наличием влаги на поверхности диэлектрика.

N18 (Ларионов, § 9.3)

Как влияет установка барьера в однородном электрическом поле на электрическую прочность промежутка?

1. Электрическая прочность незначительно повышается.
2. Электрическая прочность незначительно снижается.
3. Электрическая прочность не изменяется.
4. Электрическая прочность резко повышается.

N19 (Ларионов, § 9.3)

Как влияет установка барьера в неоднородном электрическом поле на электрическую прочность промежутка?

1. Электрическая прочность незначительно снижается.
2. Электрическая прочность незначительно повышается.
3. Электрическая прочность не изменяется.
4. Электрическая прочность значительно повышается.

N20 (Ларионов, § 9.3)

Каково оптимальное расположение барьера (с наибольшим $U_{пр}$) в промежутке с неоднородным электрическим полем?

1. Непосредственно у коронирующего электрода.
2. На расстоянии $1/2$ длины промежутка от коронирующего электрода.

3. На расстоянии $1/5-1/6$ длины промежутка от коронирующего электрода.
4. Непосредственно у некоронирующего электрода.

N21 (Ларионов, § 4.1)

Какова прочность (Упр) воздушного промежутка с однородным электрическим полем длиной 1 см при нормальных ($T=20^\circ \text{C}$, $P=760 \text{ мм.рт.ст}$) атмосферных условиях?

1. 10 кВ.
2. 11,5 кВ.
3. 31,5 кВ.
4. 45 кВ

N22 (Стефанов, § 1-10)

Что физически представляет собой ток короны на проводах ВЛ переменного напряжения?

1. Движение объемного заряда от фазного провода к земле.
2. Движение объемного заряда между фазными проводами.
3. Процесс ударной ионизации вокруг провода.
4. Движение объемного заряда вокруг провода в зависимости от изменения переменного напряжения сети.

N23 (Стефанов, § 1-10)

Что вызывает явление короны на проводах ВЛ переменного напряжения?

1. Радиопомехи.
2. Потери электроэнергии.
3. Все указанное в других ответах.
4. Снижение уровня перенапряжений.

N24 (Стефанов, § 1-10)

Что вызывает потери энергии на местную корону на проводах ВЛ переменного напряжения?

1. Неровности (выступы, шероховатости и т.п.) на поверхности проводов ВЛ.
2. Состояние погодных условий вокруг ВЛ.
3. Протекающий по ВЛ ток нагрузки.
4. Все указанное в других ответах.

N25 (Стефанов, § 1-10)

На каких ВЛ высокого напряжения наиболее энергоемкая корона?

1. На ВЛ постоянного напряжения с расположением проводов по одну сторону от заземленной опоры (биполярная корона).
2. На ВЛ переменного напряжения.
3. На ВЛ постоянного напряжения с расположением проводов по обе стороны от заземленной опоры (униполярная корона).
4. Потери на корону не зависят от вида напряжения ВЛ.

N26 (Стефанов, § 1-10)

Какими способами можно снизить потери на корону на проводах ВЛ переменного напряжения?

1. Увеличением диаметра провода.
2. Расщеплением фазного провода ВЛ.
3. Всеми способами, указанными в других ответах.
4. Улучшением поверхности провода.

N27 (Стефанов, § 1-10)

- Каково значение расстояния между проводами в расщепленной фазе (шаг расщепления) на проводах ВЛ переменного напряжения?
1. 15 см.
 2. 40 см.
 3. 70 см.
 4. Не нормируется.

N28 (Стефанов, § 1-10)

На каких ВЛ переменного напряжения выполняется расщепление фазы провода?

1. На ВЛ напряжением 35 кВ и выше.
2. На ВЛ напряжением 110 кВ и выше.
3. На ВЛ напряжением 500 кВ и выше.
4. На ВЛ напряжением 220 кВ и выше.

N1 (Стефанов, § 6-1)

Каковы основные электрические характеристики изоляторов на ВЛ?

1. Пробивное напряжение.
2. Все указанные в других ответах.
3. Сухоразрядное и мокроразрядное напряжение.
4. Электромеханическая характеристика.

N2 (Стефанов, § 6-1)

Как соотносятся между собой основные электрические характеристики изоляторов на ВЛ?

1. Пробивное напряжение $U_{пр}$ на 30% выше сухоразрядного напряжения $U_{ср}$, которое в среднем на 30% выше мокроразрядного напряжения $U_{мр}$.
2. Пробивное напряжение $U_{пр}$ на 20% ниже сухоразрядного напряжения $U_{ср}$, которое в среднем на 30% выше мокроразрядного напряжения $U_{мр}$.
3. Пробивное напряжение $U_{пр}$ равно сухоразрядному напряжению $U_{ср}$, которое в среднем на 30% выше мокроразрядного напряжения $U_{мр}$.
4. Пробивное напряжение $U_{пр}$ на 70% выше сухоразрядного напряжения $U_{ср}$, которое в среднем на 5% выше мокроразрядного напряжения $U_{мр}$.

N3 (Стефанов, § 6.1)

Как производится выбор числа изоляторов на проводах ВЛ переменного напряжения?

1. По сухоразрядному напряжению, которое должно быть выше расчетного уровня внутренних перенапряжений электрической системы.
2. По мокроразрядному напряжению, которое должно быть выше расчетного уровня внутренних перенапряжений электрической системы.
3. По пробивному напряжению, которое должно быть выше расчетного уровня внутренних перенапряжений электрической системы.
4. По вольт-секундной характеристике, которая должна быть выше расчетного уровня атмосферных перенапряжений электрической системы.

N4 (Стефанов, § 6.2)

Как распределяется напряжение по элементам гирлянды изоляторов на ВЛ переменного напряжения?

1. Неравномерно, больше всего загружен изолятор в середине гирлянды изоляторов ВЛ.
2. Неравномерно, больше всего загружен первый изолятор от опоры ВЛ.
3. Неравномерно, больше всего загружен первый изолятор от провода ВЛ.
4. Равномерно по всем изоляторам гирлянды ВЛ.

N5 (Стефанов, § 6.2)

Чем объясняется неравномерное распределение напряжения по элементам гирлянды изоляторов на ВЛ переменного напряжения?

1. Наличием в гирлянде частичных емкостей ее элементов относительно заземленных частей опоры и относительно линейного провода.
2. Различной емкостью изоляторов гирлянды.

3. Только наличием в гирлянде частичных емкостей ее элементов относительно заземленных частей опоры.
4. Только наличием в гирлянде частичных емкостей ее элементов относительно линейного провода.

№6 (Стефанов, § 6.2)

Каким образом можно уменьшить неравномерность распределения напряжения по элементам гирлянды изоляторов на ВЛ переменного напряжения?

1. Применением изоляторов с полупроводящей глазурию.
2. Применением изоляторов большой емкости (например стеклянных).
3. Всеми способами, указанными в других ответах.
4. Установкой на гирлянде защитной арматуры в виде экранных колец, рогов, восьмерок.

№7 (Стефанов, § 9.2)

Каково устройство главной изоляции силовых высоковольтных трансформаторов напряжением 110 кВ и выше?

1. Изоляция выполняется бумажно-масляной.
2. Изоляция выполняется исключительно масляной.
3. Изоляция выполняется маслобарьерной с использованием бумажномасляной обмотки.
4. Изоляция выполняется только маслобарьерной.

№8 (Стефанов, § 9.2)

В изоляции силовых высоковольтных трансформаторов напряжением 110 кВ и выше на торцах обмотки ВН устанавливаются емкостные кольца. С какой целью они применяются?

1. Для снижения температуры нагрева обмотки ВН.
2. Для улучшения распределения напряжения в продольной изоляции обмотки и уменьшения степени неоднородности электрического поля в зоне торца обмотки ВН.
3. Для защиты от внутренних перенапряжений в процессе эксплуатации.
4. Для выполнения всех задач, указанных в других ответах.

№9 (Ларионов, § 33.2)

Основные виды изоляции кабельных линий высокого напряжения?

1. Для всех напряжений бумажно-масляная изоляция.
2. До 10 кВ бумажно-масляная изоляция, 35 кВ и выше газонаполненная.
3. До 110 кВ бумажно-масляная изоляция, 220 кВ и выше маслонеполненная.
4. До 35 кВ бумажно-масляная изоляция, 110 кВ и выше маслонеполненная.

№10 (Ларионов, § 33.2)

Каков основной недостаток изоляции с вязкой пропиткой кабельных линий высокого напряжения?

1. Недостаточная механическая прочность.
2. Образование газовых включений, в результате снижение электрической прочности.
3. Слабая термостойкость.
4. Повышенная пожароопасность при повреждениях.

№11 (Ларионов, § 33.2)

Каким образом определяется место повреждения кабельной линии высокого напряжения?

1. Абсолютным методом (акустическим или индукционным).
2. Сначала примерное место мегаомметром М 2500, затем точное место абсолютным методом (испытание повышенным U).
3. Относительным методом (прибор ИКЛ).
4. Сначала примерное место относительным методом (прибор ИКЛ), затем точное место – абсолютным методом (акустическим или индукционным).

N12 (Стефанов, § 10-3)

Каковы основные виды изоляции вращающихся машин высокого напряжения?

1. В машинах напряжением 6 кВ и выше непрерывная микалентная изоляция.
2. В машинах напряжением 6 кВ изоляция резиновая, 10 кВ и выше – пластмассовая изоляция.
3. В машинах напряжением 6 кВ изоляция гильзовая, 10 кВ и выше – непрерывная микалентная изоляция.
4. В машинах напряжением 6 кВ и выше гильзовая изоляция.

N13 (Стефанов, § 10-3)

Каковы способы борьбы с короной в изоляции машин высокого напряжения?

1. Все указанное в других ответах.
2. Применение железисто-асбестовой ленты по всей длине обмотки.
3. Увеличение расстояния воздушного промежутка в местах выхода провода обмотки из паза.
4. Нанесение полупроводящих лаков в местах выхода обмотки из паза.

N14 (Стефанов, § 10-3)

Какова норма испытательного напряжения главной изоляции машин высокого напряжения?

1. (1,5 - 1,7) $U_{ном}$.
2. (3 - 4) $U_{ном}$.
3. (2,5 - 3) $U_{ном}$.
4. (5 - 6) $U_{ном}$.

N15 (Ларионов, § 19.1)

Какие виды поляризации протекают при приложении переменного напряжения к диэлектрикам?

- 1.. Межслоевая поляризация.
2. Электронная и ионная поляризации.
3. Дипольная поляризация.
4. Все указанные в других ответах

N16 (Ларионов, § 19.1)

Каковы примерные нормы сопротивления изоляции электрооборудования напряжением до 1 кВ?

1. Не нормируется.
2. Не менее 1 МОм сопротивления на 1В напряжения сети.
3. Не менее 10 кОм.
4. 1 кОм сопротивления на 1В напряжения сети.

N17 (Ларионов, § 19.2)

Что такое коэффициент абсорбции?

1. Отношение емкости изоляции при напряжении с частотой 2 Гц к емкости при напряжении 50 Гц (C_2 / C_{50}).
2. Отношение сопротивления изоляции при времени приложения 30 с к сопротивлению при времени 5 с (R_{30} / R_5).
3. Отношение сопротивления изоляции при времени приложения 60 с к сопротивлению при времени 15 с (R_{60} / R_{15}).
4. Отношение емкости изоляции при напряжении с частотой 50 Гц к емкости при напряжении 2 Гц (C_{50} / C_2).

N18 (Ларионов, § 19.2)

Как изменяется коэффициент абсорбции ($K_{абс}$) с изменением влажности изоляции?

1. Для нормальной изоляции $K_{абс} = 1,2 - 1,3$, с ростом влажности стремится к 1.
2. Для нормальной изоляции $K_{абс} = 1,5 - 1,6$, с ростом влажности стремится к 3.
3. Для нормальной изоляции $K_{абс} = 1,1 - 1,2$, с ростом влажности стремится к 0,5.
4. Для нормальной изоляции $K_{абс} = 1,2 - 1,3$, с ростом влажности стремится к 2.

N19 (Ларионов, § 19.2)

Как изменяется отношение $C2 / C50$ с увеличением влажности изоляции, при определении качества изоляции путем измерения емкостных характеристик?

1. Для нормальной изоляции $C2 / C50 = 1,5 - 1,6$, с ростом влажности стремится к 1.
2. Для нормальной изоляции $C2 / C50 = 1,1 - 1,2$, с ростом влажности стремится к 0,5.
3. Для нормальной изоляции $C2 / C50 = 1,2 - 1,3$, с ростом влажности возрастает.
4. Для нормальной изоляции $C2 / C50 = 1,2 - 1,3$, с ростом влажности не изменяется.

N20 (Ларионов, § 19.3)

Что называется тангенсом угла диэлектрических потерь в изоляции?

1. Отношение емкостного тока в изоляции к активному току потерь в изоляции.
2. Отношение активного тока потерь в изоляции к емкостному току в изоляции.
3. Отношение активного тока потерь в изоляции к полному току в изоляции.
4. Отношение полного тока в изоляции к емкостному току в изоляции.

N21 (Ларионов, § 19.3)

Как изменяется тангенс угла диэлектрических потерь в изоляции с повышением температуры изоляции?

1. Тангенс не изменяется.
2. Тангенс уменьшается.
3. Тангенс возрастает.
4. Тангенс возрастает в диапазоне температур 20 - 60 °С, затем снижается.

N22 (Ларионов, § 19.3)

Как изменяется тангенс угла диэлектрических потерь в изоляции с увеличением частоты приложенного напряжения к изоляции?

1. Тангенс не изменяется.
2. Тангенс уменьшается, потери в изоляции снижаются.
3. Тангенс уменьшается, потери в изоляции возрастают.
4. Тангенс возрастает, потери в изоляции уменьшаются.

N1 (Стефанов, § 4-2)

В лабораториях для измерения высокого напряжения (ВН) часто применяются шаровые разрядники (искровые вольтметры). В схеме разрядника последовательно включается сопротивление порядка 1 МОм. Для чего это делается?

1. Для ограничения перенапряжений.
2. Для ограничения тока короткого замыкания при пробое и защиты гладкой поверхности шаров.
3. Для повышения класса точности вольтметра.
4. Для всего указанного в других ответах.

N2 (Стефанов, § 4-2)

В лабораториях для измерения высокого напряжения (ВН) часто применяются шаровые разрядники (искровые вольтметры).

Как изменяется погрешность измерения высокого напряжения с увеличением диаметра шаров разрядника?

1. Погрешность не изменяется.
2. Погрешность увеличивается.
3. Погрешность уменьшается.

4. Погрешность увеличивается при измерении переменного напряжения и уменьшается при измерении импульсного напряжения.

N3 (Стефанов, § 4-10)

В лабораториях для измерения высокого напряжения (ВН) с помощью осциллографов применяются делители напряжения (ДН).

Какие типы ДН применяются на разных частотах?

1. Емкостные ДН при любых частотах, омические при частотах ниже 100 кГц, смешанные 100 кГц и выше.
2. Емкостные ДН при частотах 100 кГц и ниже, омические при частотах выше 100 кГц, смешанные при любых частотах.
3. Емкостные ДН при частотах 100 кГц и выше, омические при частотах ниже 100 кГц, смешанные при любых частотах.
4. Емкостные и омические ДН при частотах 100 кГц и выше, смешанные при частотах ниже 100 кГц.

N4 (Стефанов, § 4-10)

По какой формуле измеряется высокое напряжение U , приложенное к емкостному делителю напряжения, при известных значениях емкостей C_1 , C_2 и измеренном на осциллографе напряжении U_2 ?

1. По формуле А.
2. По формуле Б.
3. По формуле В.
4. По формуле Г.

N5 (Стефанов, § 4-10)

Какие требования предъявляются к делителям напряжения (ДН) для осциллографов при измерении высокого напряжения?

1. Делитель должен быть неискажающим, т.е. обладать минимально возможной индуктивностью и паразитной емкостью на окружающие предметы.
2. Устойчивый и не зависящий от режима работы коэффициент деления.
3. Все указанные в других ответах.
4. Делитель должен не вносить помехи в режим работы исследуемой цепи.

N6 (Стефанов, § 4-10)

Каким образом следует подключать делитель напряжения (ДН) к осциллографу при измерении высокого напряжения?

1. Высокочастотным кабелем с согласующим сопротивлением R равным по величине волновому сопротивлению Z_v кабеля.
2. Медным кабелем длиной не более 10 м.
3. Высокочастотным кабелем с согласующим сопротивлением R больше по величине волнового сопротивления Z_v кабеля.
4. Алюминиевым кабелем сечением не менее 25 кв. мм.

N7 (Стефанов, § 5-2)

Каковы отличия высоковольтного испытательного трансформатора от силового трансформатора?

1. Малое сечение обмоток трансформатора.
2. Однофазное исполнение.
3. Возможность регулирования высокого напряжения от 0 до U_{ϕ} .
4. Все указанные в других ответах.

№8 (Стефанов, § 5-2)

Каким образом достигается повышение величины испытательного напряжения в каскадной схеме включения высоковольтных испытательных трансформаторов?

1. Трансформаторы соединяются последовательно, при этом начиная со второго обмотка НН соединяется с корпусом трансформатора, который изолируется от земли на соответствующий потенциал.
2. Трансформаторы соединяются параллельно, при этом начиная со второго обмотка НН соединяется с корпусом трансформатора.
3. Трансформаторы соединяются последовательно, при этом начиная с первого обмотка НН соединяется с корпусом трансформатора, который изолируется от земли на потенциал Уф.
4. Трансформаторы соединяются в последовательно-параллельную схему, при этом начиная с первого обмотка НН соединяется с корпусом трансформатора, который изолируется от земли на любой потенциал.

№8 (Стефанов, § 5-3)

Выпрямительные полупроводниковые диоды обладают рядом технических преимуществ по сравнению с кенотронами и газотронами.

Каковы эти преимущества?

1. Простота конструктивного выполнения.
2. Большая пропускная способность по току.
3. Отсутствие устройств накала и подогрева.
4. Все указанные в других ответах.

№9(Стефанов, § 5-4)

Каков принцип действия схемы генераторов импульсных напряжений (ГИНа)?

1. В схеме ГИНа высоковольтные конденсаторы заряжаются параллельно, а при разряде через искровые промутки соединяются последовательно, при этом суммарное напряжение умножается.
2. В схеме ГИНа высоковольтные конденсаторы заряжаются параллельно, и при разряде через искровые промутки соединяются параллельно, при этом суммарное напряжение складывается.
3. В схеме ГИНа высоковольтные конденсаторы заряжаются последовательно, а при разряде через искровые промутки соединяются параллельно, при этом суммарное напряжение умножается.
4. В схеме ГИНа высоковольтные конденсаторы заряжаются последовательно, а при разряде через искровые промутки соединяются параллельно, при этом суммарное напряжение уменьшается.

№10 (Стефанов, § 5-4)

Каково назначение схемы генераторов импульсных напряжений (ГИНа)?

1. Схеме ГИНа создает высокочастотные перенапряжения, которые воздействуя на изоляцию, имитирует внутренние перенапряжения.
2. Схеме ГИНа создает волну импульсного напряжения, которая воздействуя на изоляцию, имитирует внутренние перенапряжения.
3. Схеме ГИНа создает волну переменного напряжения, которая воздействуя на изоляцию, имитирует любые перенапряжения.
4. Схеме ГИНа создает волну импульсного напряжения, которая воздействуя на изоляцию, имитирует атмосферные перенапряжения.

№11 (Стефанов, § 5-4)

Каковы параметры стандартной волны напряжения, создаваемой генератором импульсных напряжений (ГИНом)?

1. Не нормируется.
2. Фронт волны 2 мкс, длительность волны 40 мкс.
3. Фронт волны 0,3 мкс, длительность волны 80 мкс.
4. Фронт волны 1,2 мкс, длительность волны 50 мкс.

N12 (Стефанов, § 5-4)

Каким образом можно регулировать параметры стандартной волны напряжения, создаваемой генератором импульсных напряжений (ГИНом)?

1. Фронт волны – изменением фронтового сопротивления R_f , длительность волны – изменением разрядного сопротивления R_r , амплитуду волны – расстоянием между искровыми промежутками.
2. Фронт и длительность волны – изменением фронтового сопротивления R_f , амплитуду волны – расстоянием между искровыми промежутками.
3. Фронт волны – изменением фронтового сопротивления R_f , длительность волны – изменением разрядного сопротивления R_r , амплитуду волны – расстоянием между искровыми промежутками.
4. Амплитуду, фронт и длительность волны – изменением емкости ГИНа.

N13 (Стефанов, § 5-6)

Каков принцип действия схемы генераторов импульсных токов (ГИТа)?

1. В схеме ГИТа высоковольтные конденсаторы заряжаются последовательно, а при разряде через искровые промежутки соединяются параллельно, при этом импульсный ток усиливается.
2. В схеме ГИТа высоковольтные конденсаторы заряжаются параллельно, а при разряде через искровые промежутки соединяются последовательно, при этом импульсный ток усиливается.
3. В схеме ГИТа высоковольтные конденсаторы заряжаются последовательно, а при разряде через искровые промежутки соединяются параллельно, при этом суммарное напряжение умножается.
4. В схеме ГИТа высоковольтные конденсаторы заряжаются последовательно, а при разряде через искровые промежутки соединяются параллельно, при этом суммарное напряжение уменьшается.

N14 (Стефанов, § 5-6)

Каково назначение схемы генераторов импульсных токов (ГИТа)?

1. Схеме ГИТа создает высокочастотные перенапряжения, которые воздействуя на изоляцию, имитирует внутренние перенапряжения.
2. Схеме ГИТа создает волну импульсного напряжения, которая воздействуя на изоляцию, имитирует внутренние перенапряжения.
3. Схеме ГИТа создает волну переменного тока, которая воздействуя на изоляцию, имитирует любые перенапряжения.
4. Схеме ГИТа создает волну импульсного тока, который воздействуя на изоляцию, имитирует атмосферные перенапряжения (протекание тока молнии).

N1 (Стефанов, § 5-6)

Что представляют собой внутренние перенапряжения в электрических системах?

1. Косоугольный импульс напряжения.
2. Высокочастотные затухающие колебания повышенной амплитуды.
3. Волна синусоидальной формы повышенной амплитуды.
4. Прямоугольный импульс напряжения.

N2 (Ларионов, § 20.2)

Какие параметры грозовой деятельности учитываются при проектировании защиты от атмосферных перенапряжений электроустановок?

1. Все указанные в других ответах.
2. Амплитуда тока молнии i_m .
3. Крутизна тока молнии i_m/t .
4. Количество грозовых дней (часов) в году.

N3 (Ларионов, § 21.2)

Как осуществляется молниезащита производственных корпусов большой протяженностью?

1. С помощью индивидуальных молниеотводов, устанавливаемых на крыше корпуса.
2. С помощью молниеприемной сетки, укладываемой под кровлю и через каждые 50 м соединяемую с контуром заземления.
3. С помощью грозозащитного троса, который натягивается над крышей корпуса.
4. Всеми способами, указанными в других ответах.

N4 (Ларионов, § 22.3)

С какой целью при установке трубчатых разрядников предусматривается внешний искровой промежуток размером примерно 0,5–1 см?

1. Промежуток предотвращает протекание емкостных токов, разрушающих газогенерирующий материал трубки в процессе эксплуатации.
2. Промежуток улучшает гашение дуги сопровождающего тока (тока КЗ).
3. Промежуток расширяет возможности вольт-секундной характеристики разрядника.
4. Промежуток уменьшает зону выхлопа разрядника.

N5 (Ларионов, § 22.3)

Чем обусловлено наличие нижнего и верхнего пределов отключаемых токов в трубчатых разрядниках?

1. Всеми факторами, указанными в других ответах.
2. Гашением дуги способом продольного дутья.
3. Недостаточной механической прочностью разрядника.
4. Автогазовым принципом гашения дуги в разрядниках.

N6 (Ларионов, § 22.3)

Трубчатые разрядники имеют определенный диапазон отключаемых токов, вызванный автогазовым принципом гашения электрической дуги. В процессе эксплуатации после нескольких отключений первоначальный диаметр трубки (20 мм) увеличивается.

Как при этом изменяется диапазон отключаемых токов разрядника?

1. Диапазон токов не изменяется.
2. Диапазон токов смещается в сторону меньших токов.
3. Диапазон токов смещается в сторону больших токов.
4. Диапазон токов равномерно увеличивается в сторону меньших и больших токов.

N7 (Ларионов, § 22.3)

Где на воздушных линиях электропередач устанавливаются трубчатые разрядники?

1. На подходах к подстанциям.
2. В местах, указанных в других ответах.
3. В местах пересечений с другими ВЛ, особенно других классов напряжений.
4. На отдельных опорах в ослабленных местах (в местах подключения кабельных воронок, опорах с малой импульсной прочностью и т. д.).

N8 (Ларионов, § 22.4)

Каков принцип действия вентильных разрядников для защиты от перенапряжений?

1. Срез импульсной волны с помощью искровых промежутков, ограничение сопровождающего тока рабочим сопротивлением и гашение дуги в искровых промежутках.
2. Срез импульсной волны с помощью искровых промежутков, ограничение сопровождающего тока рабочим сопротивлением и гашение дуги в рабочем

сопротивлении.

3. Ограничение импульсной волны с помощью рабочего сопротивления, ограничение сопровождающего тока искровыми промежутками и гашение дуги в искровых промежутках.

4. Срез импульсной волны с помощью рабочего сопротивления, ограничение сопровождающего тока рабочим сопротивлением и гашение дуги в искровых промежутках.

№9 (Ларионов, § 22.4)

Почему искровой промежуток вентильных разрядников выполняется многократным?

1. Единичный промежуток имеет резконеоднородное поле, для быстрого срабатывания, за счет равномерного распределения напряжения, промежуток выполнен многократным, кроме того облегчается гашение дуги.

2. Единичный промежуток имеет однородное поле, для быстрого срабатывания, за счет неравномерного распределения напряжения, промежуток выполнен многократным, кроме того облегчается гашение дуги.

3. Единичный промежуток имеет однородное поле, для быстрого срабатывания, за счет равномерного распределения напряжения, промежуток выполнен многократным, но при этом затрудняется гашение дуги.

4. Такой промежуток выполнен из-за конструктивных соображений.

№10 (Ларионов, § 22.4)

В единичном искровом промежутке вентильного разрядника между двумя плоскими электродами находится механическая шайба. С какой целью применяется эта шайба?

1. Шайба, за счет разницы диэлектрической проницаемости с воздухом, создает область пониженной напряженности, упрочняя промежуток.

2. Шайба способствует успешному гашению электрической дуги в разряднике.

3. Шайба способствует равномерному распределению напряжения по искровым промежуткам.

4. Шайба, за счет разницы диэлектрической проницаемости с воздухом, создает область повышенной напряженности, подготавливая промежуток к пробое.

№11 (Ларионов, § 22.4)

Каков принцип действия и устройство ограничителей перенапряжений (ОПН)?

1. ОПН содержат искровые промежутки и кольцевую камеру с магнитным дуэтом, в которой гасится возникающая дуга.

2. ОПН включает искровые промежутки и рабочее сопротивление, которые срезают волну перенапряжений и ограничивают импульсный ток.

3. ОПН включает только искровые промежутки, которые срезают волну перенапряжений и гасят дугу сопровождающего тока.

4. ОПН состоит из высоконелинейного материала ZNO, который резко снижает сопротивление при увеличении напряженности электрического поля и пропускает импульсный ток на землю, затем снова резко увеличивает сопротивление.

№12 (Стефанов, § 12-6)

Какую роль играет грозозащитный подход к подстанциям?

1. Подход защищает от прямых ударов молнии всю ВЛ и ограничивает волну перенапряжений.

2. Подход защищает от прямых ударов молнии прилегающий к подстанции С какой целью устраивается грозозащитный подход к подстанции? участок ВЛ и срезает набегающую и отраженную волну перенапряжений.

3. Подход ограничивает отраженную волну перенапряжений.
4. Подход облегчает работу вентильных разрядников на подстанции.

N13 (Стефанов, § 12-6)

С какой целью в схеме грозозащитного подхода к подстанции устанавливается комплект трубчатых разрядников 2РТ?

1. Для среза отраженной волны перенапряжений от подстанции в случае отключенного выключателя Q на подстанции.
2. Для среза набегающей волны перенапряжений от подстанции в случае отключенного выключателя Q на подстанции.
3. Для среза набегающей волны перенапряжений от подстанции.
4. Для резервирования срабатывания основного комплекта разрядников 1РТ.

N14 (Стефанов, § 12-6)

С какой целью в схеме грозозащитного подхода к подстанции с вводом через кабельную вставку необходимо разместить комплект разрядников 2РТ от кабельной воронки на один пролет воздушной линии?

1. Для улучшений условий срабатывания разрядников, т. к. волна перенапряжений переходит из линии с высоким Z_v в линию с низким Z_v .
2. Для улучшений условий срабатывания разрядников, т. к. волна перенапряжений переходит из линии с низким Z_v в линию с высоким Z_v .
3. Это вызвано сложностью монтажа на опоре ВЛ кабельной воронки и комплекта разрядников.
4. Для улучшений условий гашения электрической дуги в разрядниках. N15 (Стефанов, § 12-6)

С какой целью в схеме грозозащитного подхода к подстанции с вращающимися машинами ВН устанавливается конденсатор С и индуктивность L?

1. Для среза набегающей волны перенапряжений от подстанции в случае отключенного выключателя Q на подстанции.
2. Для сглаживания фронта волны перенапряжения и уменьшения ее амплитуды.
3. Для среза набегающей волны перенапряжений от подстанции.
4. Для резервирования срабатывания основного комплекта разрядников 1РТ.

N16 (Стефанов, § 12-6)

Каково значение сопротивления растекания контура заземления электроустановки напряжением 110 кВ и выше?

1. Не нормируется.
2. Не более 4,0 Ом.
3. Не более 10 Ом.
4. Не более 0,5 Ом.

N17 (Стефанов, § 12-6)

В каких случаях допускается заземление молниеотводов присоединять к общему контуру подстанции?

1. Не допускается во всех случаях.
2. Допускается для подстанций напряжением 35 кВ и выше.
3. Допускается во всех случаях.
4. Допускается для подстанций напряжением 110 кВ и выше.

N18 (Стефанов, § 13-1)

Какие виды внутренних перенапряжений (ВП) могут возникать в электрических системах?

1. Резонансные перенапряжения.
2. Коммутационные перенапряжения.
3. Все указанные в других ответах.
4. Дуговые перенапряжения.

N19 (Стефанов, § 13-1)

В каких электрических системах уровень внутренних перенапряжений (ВП) является более высоким?

1. В системах с изолированной нейтралью (6-35 кВ).
2. В системах с глухо заземленной нейтралью (110 кВ и выше).
3. В системах с заземленной нейтралью (до 1 кВ).
4. Уровень внутренних перенапряжений одинаков для всех систем.

N20 (Стефанов, § 13-2)

Что является основной причиной внутренних перенапряжений при включении и отключении линий и трансформаторов?

1. Все указанное в других ответах.
2. Неодновременность расхождения контактов разных фаз выключателя.
3. Наличие отраженных волн напряжений в процессе коммутации.
4. Повторные зажигания дуги между расходящимися контактами выключателя.

N21 (Стефанов, § 13-3)

Что является основной причиной дуговых внутренних перенапряжений (3-4 Уф) в системах с изолированной нейтралью?

1. Наличие отраженных волн напряжений в процессе коммутации.
2. Неодновременность расхождения контактов разных фаз выключателя.
3. Наложение высокочастотных колебаний на основную гармонику при однофазном замыкании на землю.
4. Все указанное в других ответах.

N22 (Стефанов, § 13-3)

Каким образом уменьшают уровень дуговых внутренних перенапряжений (3-4 Уф) в сетях с изолированной нейтралью?

1. Установкой ограничителей перенапряжений.
2. Включением в нейтраль дугогасящего реактора и настройкой его на компенсацию емкостного тока замыкания.
3. Установкой трубчатых разрядников.
4. Устройством грозозащитных подходов к подстанции.

N23 (Стефанов, § 13-3)

Уровень дуговых внутренних перенапряжений (3-4 Uф) в сетях с изолированной нейтралью можно снизить путем включения в нейтраль дугогасящей катушки (ДГК).

При каких значениях емкостного тока замыкания на землю рекомендуется применять ДГК?

1. В сетях 20 - 35 кВ при токах свыше 50 А, в сетях 6 - 10 кВ при токах свыше 70 А.
2. В сетях 20 - 35 кВ при токах свыше 30 А, в сетях 6 - 10 кВ при токах свыше 10 А.
3. В сетях 20 - 35 кВ при токах свыше 10 А, в сетях 6 - 10 кВ при токах свыше 30 А.
4. При токах свыше 5 А в любых сетях.

N24 (Стефанов, § 13-3)

Уровень дуговых внутренних перенапряжений (3-4 Uф) в сетях с изолированной нейтралью можно снизить путем включения в нейтраль дугогасящей катушки (ДГК).

Каким образом настраивается такая катушка?

1. С перекомпенсацией 10-15% емкостного тока замыкания на землю.
2. С недокомпенсацией 5-10% емкостного тока замыкания на землю.
3. С полной компенсацией емкостного тока замыкания на землю (настройкой в резонанс).
4. Режим настройки не нормируется.

N25 (Стефанов, § 13-3)

Уровень дуговых внутренних перенапряжений (3-4 Uф) в сетях с изолированной нейтралью можно снизить путем включения в нейтраль дугогасящей катушки (ДГК).

При наличии нескольких трансформаторов на подстанции в нейтраль какого трансформатора следует включать ДГК?

1. В нейтраль любого трансформатора.
2. В нейтраль трансформатора наименьшей мощности.
3. В нейтраль трансформатора наибольшей мощности.
4. В этом случае включение ДГК нецелесообразно.

N26 (Стефанов, § 13-4)

Каким образом можно уменьшить в электрических системах резонансные перенапряжения?

1. Всеми способами, указанными в других ответах.
2. Путем исключения коммутационных операций с ненагруженными трансформаторами и линиями.
3. Путем шунтирования контактов выключателей высокоомными резисторами.
4. Путем изменения одного из параметров резонанса (С или L).

6.2.2.1.2 Критерии оценивания

Отлично	Хорошо	Удовлетворительно	Неудовлетворительно
отличное понимание предмета, всесторонние знания, отличные умения и владения.	достаточно полное понимание предмета, хорошие знания, умения и владения.	приемлемое понимание предмета, удовлетворительные знания, умения и владения.	результаты обучения не соответствуют минимальным требованиям

7 Основная учебная литература

1. Техника высоких напряжений : учебник для электроэнерг. спец. вузов / Под общ. ред. Д. В. Разевига, 1976. - 488.

2. Техника высоких напряжений : программа и контрол. задание / Иркут. политехн. ин-т, 1985. - 16.

[Сайт] – URL: <http://elib.istu.edu/viewer/view.php?file=/files/er-9678.pdf>

3. Техника высоких напряжений [Электронный ресурс] : методические указания к выполнению лабораторных работ / Иркут. гос. техн. ун-т, 2012. - 72.

[Сайт] – URL: <http://elib.istu.edu/viewer/view.php?file=/files/er-5047.pdf>

8 Дополнительная учебная литература и справочная

1. Стефанов К. С. Техника высоких напряжений / К. С. Стефанов, 1967. - 495.

2. Степанчук К. Ф. Техника высоких напряжений : учеб. пособие для электроэнерг. спец. вузов / К. Ф. Степанчук, Н. А. Тиняков, 1982. - 367.

3. Бабинов М. А. Техника высоких напряжений : учебное пособие для энергетических специальностей техникумов / М. А. Бабинов, Н. С. Комаров, А. С. Сергеев, 1963. - 671.

[Сайт] – URL: <http://elib.istu.edu/viewer/view.php?file=/files3/er-21737.pdf>

4. Техника высоких напряжений : учеб. пособие для электроэнергет. специальностей вузов / Г. Н. Александров [и др.], 1973. - 528.

9 Ресурсы сети Интернет

1. <http://library.istu.edu/>

2. <https://e.lanbook.com/>

10 Профессиональные базы данных

1. <http://new.fips.ru/>

2. <http://www1.fips.ru/>

11 Перечень информационных технологий, лицензионных и свободно распространяемых специализированных программных средств, информационных справочных систем

1. Microsoft Office 2003 VLK (поставки 2007 и 2008)

12 Материально-техническое обеспечение дисциплины

1. Компьютер P4500/1024*2/160/GF256Mb/DVD-RW/Samsung LCD 19/кл/мышь/сет. фильтр

2. Комплект лабораторного оборудования "Качество электрической энергии в системах электроснабжения-3хфазная сеть" КЭЭСЭСТ1М-С-К (стендовое исполнение, компьютер. версия)

3. Комплект лабораторного оборудования "Умный счетчик электрической энергии"(стендовое исполнение,компьютеризованная версия) УСЭЭ1-С-К