

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего профессионального образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Методические указания

по организации лабораторных работ обучающихся
по дисциплине «Техника высоких напряжений» для студентов направления
подготовки /специальности
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
Направленность (профиль) Цифровые технологии в электроэнергетике

Ставрополь, 2025

Оглавление

Лабораторная работа №1	4
Лабораторная работа №2	19
Лабораторная работа №3	29
Лабораторная работа №4	74

Введение

Целью дисциплины «Техника высоких напряжений» является формирование профессиональных компетенций ПК-3, ПК-5, будущего бакалавра по направлению 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника. Дисциплина предполагает знание студентами следующих дисциплин: «Теоретические основы электротехники», «Электротехническое и конструкционное материаловедение», «Высшая математика», «Физика» «Химия». В результате выполнения практикума у студента формируются указанные выше компетенции, приобретаются знания по устройству изоляции высоковольтных установок, профилактическому контролю изоляции, причин возникновения и методов ограничения перенапряжений в электроэнергетических системах, появляются навыки практического применения теоретических знаний для контроля состояния изоляции высоковольтных установок.

Лабораторная работа №1

Пробой газового промежутка в однородных и неоднородных полях

Цель работы: Исследование разрядных напряжений воздушных промежутков с различными системами электродов: сфера – сфера, стержень – стержень, стержень - плоскость; определение воздействия границы раздела твердый диэлектрик – воздух на разрядное напряжение межэлектродного промежутка, изучение особенностей работы изоляции в проходном и опорном изоляторе.

Теоретическая часть

В обычных условиях воздух является диэлектриком, то есть не проводит электрический ток. Однако за счет ионизации от внешних источников, в основном за счет ионизирующего излучения от солнца и других источников, в газе образуются свободные электрические заряды, за счет которых начинает протекать электрический ток. Основной причиной появления заряженных частиц в воздухе на начальном этапе является фотоионизация. Это приводит к незначительному количеству заряженных частиц в газе при нормальных внешних условиях (например в воздухе содержится 1000 ионов в 1 см^3). При приложении большой напряженности электрического поля в газе возникает ударная ионизация, за счет чего поддерживается протекание тока через газ и разряд становится

самостоятельным. Подробно развитие разряда в газе описано в литературе и лекциях.

Пробоем изоляции называют потерю диэлектриком изолирующих свойств при превышении некоторого критического значения напряжения, приложенного к электродам, такое напряжение называется пробивным U_{np} . Соответствующая напряженность электрического поля, при которой происходит пробой, называется электрической прочностью газа при данных условиях $E_{np} = U_{np}/h$, где h – расстояние между электродами.

Пробивное или разрядное напряжение газового промежутка зависит от формы электродов и степени однородности электрического поля. В однородном или практически однородном электрическом поле, которое образуют системы электродов плоскость – плоскость, сфера – сфера при расстоянии между сферами меньше их диаметра, разряд развивается сразу по всей длине промежутка, что приводит к образованию искрового или, при достаточной мощности источника питания, дугового разряда. В поле с большой неоднородностью (электроды типа стержень – плоскость, стержень – стержень) сначала возникает коронный разряд, который при дальнейшем увеличении напряжения переходит в искровой разряд. Электрическая прочность промежутка с неоднородным полем в несколько раз меньше, чем с однородным электрическим полем.

На величину разрядного напряжения газового промежутка влияет несколько факторов. 1) основными частицами, участвующими в пробое газа, являются отрицательно заряженные электроны, так как их подвижность намного выше, поэтому при постоянном или импульсном напряжении пробивное напряжение газового промежутка с несимметричными системами электродов зависит от полярности приложенного напряжения. 2) После ионизации нейтральных молекул в газе появляются положительные ионы, отличающиеся малой подвижностью, которые уменьшают или резко усиливают поле вблизи электрода с меньшим радиусом кривизны. 3) на

развитие стримера оказывает влияние фотоионизация, термоионизация и процессы на электродах.

По этой причине промежуток с резконеоднородным полем меньшей электрической прочностью. В системе электродов стержень – плоскость пробивное напряжение зависит от полярности приложенного напряжения.

Зависимость пробивного напряжения от расстояния для промежутка с однородным и практически однородным полем описывается зависимостью Пашена – пробивное напряжение увеличивается с ростом расстояния между электродами, а электрическая прочность уменьшается.

Присутствие в межэлектродном газовом промежутке твердых тел или наличие поверхности раздела твердый диэлектрик – газ приводит к снижению пробивного напряжения промежутка. Это обусловлено возникновением неоднородности электрического поля вследствие различия в диэлектрических проницаемостях твердого диэлектрика и газа. Разряд по поверхности твердого диэлектрика называется перекрытием по поверхности.

Оборудование и материалы

В ходе лабораторной работы используются аппараты АИД-70/50, а также различные системы электродов.

1 Устройство и работа лабораторной установки. Аппарат АИД-70/50 выполнен в виде двух переносных блоков, соединенных кабелем: блока высокого напряжения (БВН) и блока управления (БУ). Конструкция блоков представлена на рисунках 1.2 и 1.3.

БВН состоит из следующих компонентов: высоковольтный испытательный трансформатор, короткозамыкатель, высоковольтный резистор, выпрямительные диоды. Все это расположено в баке, заполненном трансформаторным маслом.

Верхняя панель БВН выполнена из гетинакса. БВН выполнен герметично для предотвращения контакта воздуха с трансформаторным маслом.

Проходной изолятор используется для вывода высокого напряжения из БВН, к данному изолятору подключается испытываемый объект.

Под кожухом БВН находится электромагнит механизма заземлителя, конденсаторы и разрядники.

На кожухе БВН закреплена табличка «Аппарат АИД-70/50. Блок высокого напряжения. Зав. №... » (номер состоит из 6-ти цифр: две первые - заводской номер аппарата, четыре последние - год выпуска).

БУ включает в себя регулируемый автотрансформатор, предназначенный для изменения первичного напряжения испытательного высоковольтного трансформатора, разъёмы для подключения кабелей питания и блока высокого напряжения, компенсационный трансформатор, схему защиты и органы управления.

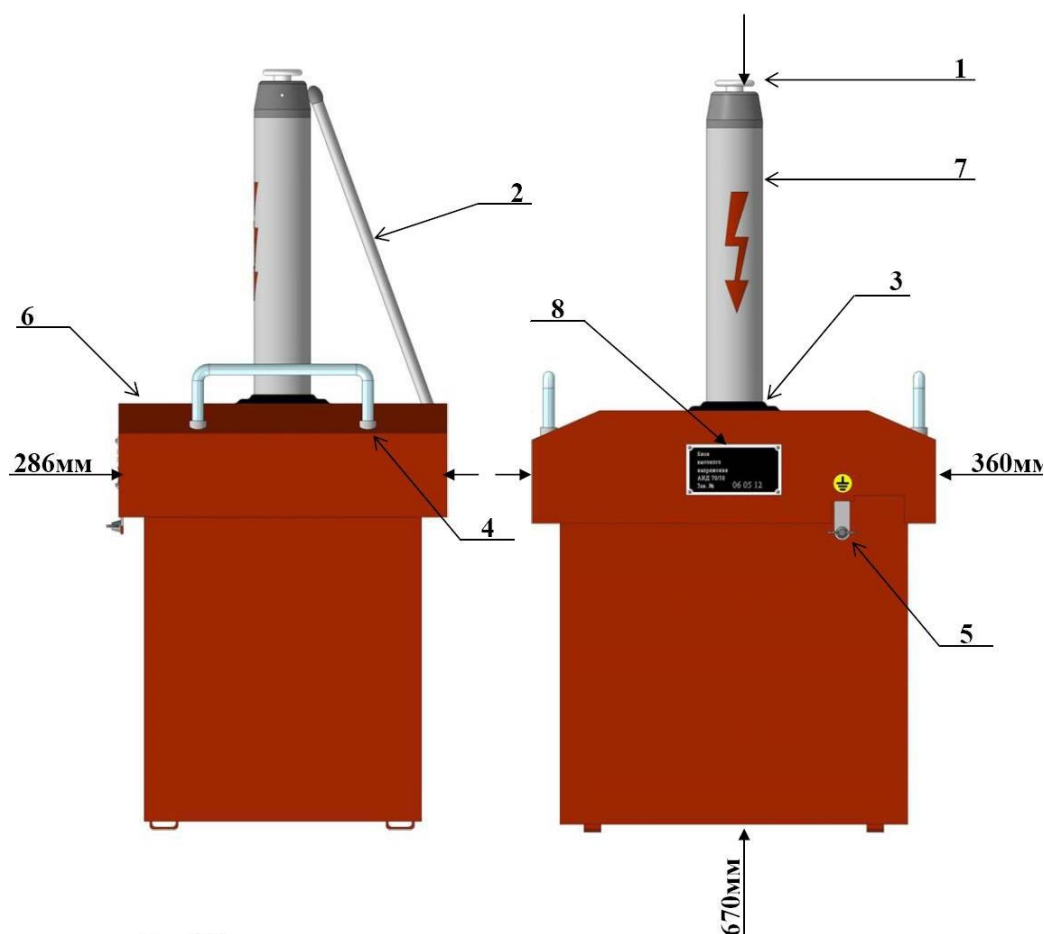


Рисунок 1.1 – Блок высокого напряжения

На рисунке 1.1 приняты следующие обозначения: 1 – зажим для

присоединения испытываемого объекта; 2 – штанга механизма короткозамыкателя; 3 – уплотнительное кольцо; 4 – болт крепления ручки кожуха; 5 – клемма заземления; 6 – кожух; 7 – проходной высоковольтный изолятор; 8 – шильдик блока высокого напряжения.

На лицевой панели БУ (рисунок 1.2) расположены измерительные приборы, органы управления и сигнализации.

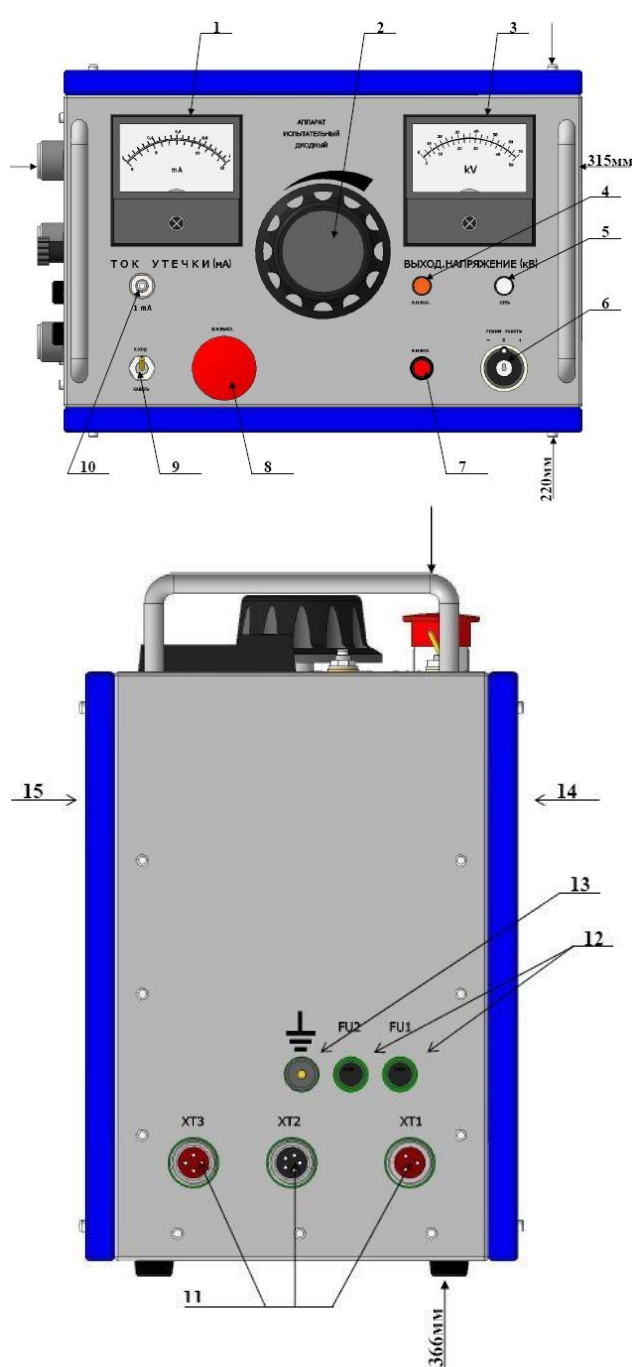


Рисунок 1.2 – Блок управления:

На рисунке 1.2 приняты следующие обозначения: 1 – миллиамперметр измерения тока утечки в мА; 2 – ручка регулятора испытательного напряжения; 3 – киловольтметр измерения выходного напряжения в кВ; 4 – красная сигнальная лампа (включение испытательного напряжения); 5 – зеленая сигнальная лампа (включение сети); 6 – переключатель со спецключом для переключения вида испытательного напряжения и для включения аппарата в сеть; 7 – кнопка включения испытательного напряжения; 8 – кнопка выключения испытательного напряжения; 9 – кнопка переключения градуировки киловольтметра; 10 – кнопка переключения диапазона миллиамперметра – 1мА; 11 – разъёмы подключения; 12 – предохранители; 13 – клемма заземления; 14 – крышка нижняя; 15 – крышка верхняя.

На боковой панели БУ расположены разъёмы для соединения с БВН, подключения питания, винт заземления.

Принцип действия аппарата АИД-70/50 заключается в следующем: Напряжение питания подается на БУ, а затем, через плавкие вставки попадает на пускатель и переключатель 6 (рисунок 1.3).

При установке переключателя 6 в положение « ~ » или « – » включается пускатель и электромагнит штанги заземлителя, который отводит штангу от верхнего кольца проходного изолятора БВН. Включается зеленая сигнальная лампа 6 (рисунок 1.2). Включение короткозамыкателя БВН происходит только при установке переключателя 6 в положение «~». В этом случае выпрямительные диоды БВН шунтируются. На выходе проходного изолятора БВН появляется переменное испытательное напряжение.

Включение испытательного напряжения производится нажатием кнопки 7, при этом необходимо, чтобы напряжение на регуляторе было установлено равным 0. Пускатель включается и подает напряжение на первичную обмотку высоковольтного трансформатора БВН, включается красная сигнальная лампа 4. Величина испытательного напряжения

регулируется поворотом ручки 2, а измеряется вольтметром РА2 в кВ. При работе на постоянном напряжении ток через объект испытания измеряется амперметром 1.

Высоковольтный резистор применяется для измерения испытательного напряжения. Вольтметр 3 (рисунок 1.2) имеет две шкалы: нижняя для измерения переменного напряжения с пределом 50 кВ, и верхняя для измерения постоянного напряжения с пределом 70 кВ.

Вольтметр настраивается на правильные показания при различных условиях работы: при переменном испытательном напряжении, при постоянном испытательном напряжении для нагрузки с малой емкостью (до 750 пФ), при постоянном напряжении для нагрузки с большой емкостью (более 750 пФ), так как при этом будет различная форма выходного напряжения. Это обусловлено тем, что в аппарате реализовано однополупериодное выпрямление. При малой емкости среднее значение выпрямленного напряжения меньше, а при большой емкости объекта – большее за счет эффекта емкостного сглаживающего фильтра.

При работе аппарата на постоянном напряжении необходимо строго следить за положением тумблера 9 "Х.ХОД-КАБЕЛЬ" (для правильного измерения испытательного напряжения и во избежание выхода из строя БВН за счёт превышения предельного значения напряжения, равного 70 кВ).

При испытании изоляции диэлектриков и объектов с малой емкостью переключатель 9 должен находиться в положении "Х.ХОД".

Переключение пределов измерения амперметра и его отключение на переменном токе производится специальным реле в блоке управления

Для защиты аппарата от токов перегрузки служит специальное реле.

При работе аппарата на постоянном напряжении реле защиты от перегрузки срабатывает при токах нагрузки, находящихся в пределах от 13 до 14 мА, а при работе на переменном напряжении – при токах нагрузки в пределах от 45 до 46 мА.

По окончании испытания, для снятия остаточного заряда, ручка регулятора напряжения БУ переводится в крайне положение вращением против часовой стрелки, и при снижении напряжения на испытываемом объекте до 0,5... 1 кВ (во избежание повреждения вторичной обмотки трансформатора БВН), аппарат отключается кнопкой 8 "ВЫКЛ". При этом отключается пускатель блока управления и срабатывает короткозамыкатель блока высокого напряжения. Отсутствие остаточного заряда можно контролировать киловольтметром 3.

При отключении аппарата от сети переключателем 6, заземлитель РЕ блока высокого напряжения касается высоковольтного вывода лока высокого напряжения. Таким образом, происходит наложение заземления на испытываемый объект и источник испытательного напряжения.

Указания по мерам безопасности.

Все лица, работающие по эксплуатации и техническому обслуживанию аппарата, должны быть предварительно обучены безопасным методам работы на данном аппарате, и знать в соответствующем объёме "Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей" и "Правила безопасной эксплуатации электроустановок потребителей" (ПТЭЭП и ПБЭЭП).

Рабочее место персонала должно соответствовать требованиям пожарной безопасности по ГОСТ 12.1.004-76.

Прежде чем приступить к работе на аппарате, необходимо:

- удалить блок управления от БВН на безопасное расстояние, но не менее чем 3 м;

- надёжно заземлить БУ и БВН с помощью прилагаемых к аппарату гибких медных проводов сечением 6 мм², с кольцевыми наконечниками с одной стороны и зажимами типа «крокодил» – с другой. Каждый блок должен заземляться на шину заземления отдельным проводником.

Рабочее место должно быть снабжено ограждениями, автоматическим отключением при проникновении за ограждение, световой сигнализацией,

предупреждающими плакатами. Работать на аппарате возможно только с под надзором преподавателя.

ЗАПРЕЩАЕТСЯ:

- работа аппарата без заземления;
- последовательное соединение блоков БУ и БВН по заземлению;
- работа на аппарате с неисправными заземлителем и световой сигнализацией;
- находиться ближе 3 м от БВН в момент включения аппарата в сеть, а также при включенном испытательном напряжении.
- Работать без средств индивидуальной защиты (диэлектрический коврик и перчатки)

Прежде чем отсоединить испытуемый объект от БВН, необходимо **обязательно** убедиться в том, что:

- стрелка киловольтметра находится на отметке шкалы "0";
- аппарат отключен от сети;
- штанга заземлителя БВН касается высоковольтного вывода. При необходимости наложить заземляющую штангу на объект испытаний или высоковольтный вывод БВН для предотвращения случайного включения высокого напряжения.

4. Порядок работы на аппарате АИД 70/50.

Прежде чем приступить к работе на аппарате, необходимо убедиться в исправности цепей заземления аппарата визуальным осмотром, проверить правильность подключения соединительных проводов. Рабочее положение блока управления - вертикальное (лицевая панель блока управления - горизонтальна!). В том случае, если блок управления будет установлен горизонтально, погрешность показаний измерительных приборов может превышать 3%; надёжно заземлить блок управления и БВН гибкими медными проводами сечением 6 мм, прилагаемыми к аппарату.

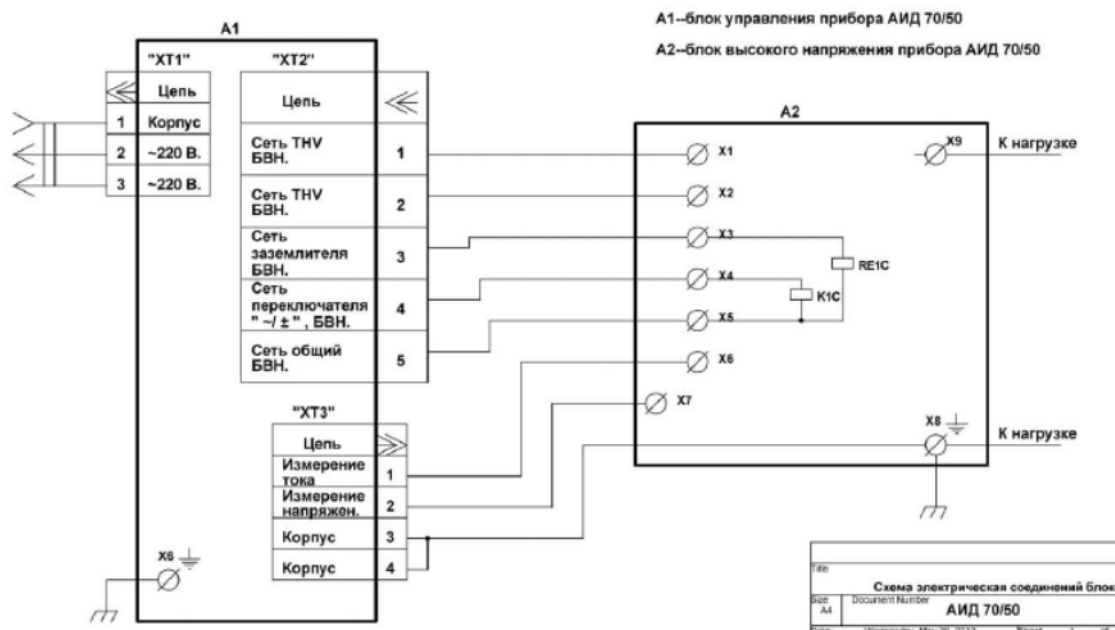


Рисунок 1.3 – Схема электрическая принципиальная соединения
БВН и БУ аппарата АИД-70/50

РАБОТА БЕЗ ЗАЗЕМЛЕНИЯ ЗАПРЕЩАЕТСЯ!

Подключить объект испытаний с помощью прилагаемого высоковольтного кабеля (входит в состав лабораторной установки) к высоковольтному выводу и клемме заземления БВН; подключить сетевой кабель к блоку управления и к сети.

Лица, присутствующие при испытании, должны быть удалены от БВН на расстояние не менее 3 м или за ограждение. Ключом включить блок управления на необходимый вид испытательного напряжения. При этом должна загореться зелёная сигнальная лампочка «Сеть».

При работе на выпрямленном напряжении (ключ переключателя в положении « – ») во избежание выхода из строя БВН, а также для правильного измерения величины испытательного напряжения, строго следить за положением тумблера «Х. ХОД-КАБЕЛЬ».

Поворачивая ручку регулятора испытательного напряжения против движения часовой стрелки, установить её в исходное положение,

соответствующее минимуму испытательного напряжения.

Включить испытательное напряжение кнопкой «Испытание» при этом должна загореться красная лампочка «Испытание».

Перемещая ручку регулятора испытательного напряжения по часовой стрелке установить необходимую величину испытательного напряжения по показаниям вольтметра.

При работе с объектами, обладающими большой емкостью, необходимо помнить, что испытательное напряжение на объекте увеличивается по мере заряда ёмкости, и поэтому подъем напряжения продолжается и после прекращения вращения ручки регулятора напряжения.

В этом случае следует ограничить скорость вращения ручки регулятора напряжения минимально возможными значениями, подъём напряжения надо осуществлять медленно и плавно, не допуская превышения допустимой величины испытательного напряжения на объекте и не допуская превышения наибольшего рабочего напряжения аппарата, равного 70 кВ.

При работе на постоянном напряжении измерение тока до 1 мА следует производить миллиамперметром аппарата при нажатой кнопке «1 мА».

По окончании испытания установить регулятор испытательного напряжения в начальное положение, повернув ручку против часовой стрелки до упора. Отключить кнопкой "СТОП" испытательное напряжение и только после этого отключить аппарат от сети, повернув ключ в положение «0».

После испытания объекта с большой емкостью, например конденсатора или кабеля, необходимо уменьшить испытательное напряжение регулятором до минимума, а затем дождаться снижения напряжения на испытуемом объекте до 0,5 – 1 кВ. Контроль над снятием остаточного ёмкостного заряда с испытуемого объекта необходимо

осуществлять, наблюдая за показанием измерительного прибора аппарата. Только после снижения напряжения до 0,5 – 1 кВ нужно нажать кнопку «СТОП» и затем отключить аппарат от сети, установив переключатель 6 БУ в положение «0». Вольтметр при этом должен показывать нулевые значения.

При испытании объектов, величина емкости которых более 0,02 мкФ (20 нФ), остаточный емкостной заряд необходимо снимать только с помощью заземляющей штанги с ограничительным сопротивлением. Такой способ позволит избежать выхода из строя высоковольтной обмотки трансформатора БВН.

Перед отключением испытуемого объекта от БВН необходимо визуально убедиться в том, что штанга заземлителя касается высоковольтного ввода БВН, при этом также рекомендуется дополнительно наложить временное заземление на высоковольтный вывод.

Указания по технике безопасности

1. К работе на стендах допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности при выполнении работ в лабораториях кафедры «Автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения» и ознакомившиеся с настоящими методическими указаниями. Прохождение инструктажа по технике безопасности фиксируется преподавателем в специальном журнале.

2. Лабораторная работа должна выполняться не менее чем двумя студентами.

3. Перед началом работы необходимо убедиться в надежном заземлении корпуса аппарата.

4. Замену образца диэлектрика производят после отключения аппарата сетевым выключателем.

5. По окончании испытания или при перерыве в работе установку

отключают от напряжения питания.

Задания

1 Исследование электрической прочности газовых диэлектриков
Исследование разряда в однородном поле производится в системе электродов сфера-сфера, расстояние между которыми изменяется в пределах от 0,5 до 2 см.

Исследование разряда в неоднородном поле производится в системе электродов стержень-плоскость, стержень-стержень, расстояние между которыми изменяется в пределах от 0,5 до 8 см. Для системы электродов стержень – плоскость исследование проводится на постоянном токе при различных полярностях стержня (положительной и отрицательной).

Исследование поверхностного разряда производится на следующих конструкциях (рисунок 1.4):

- модель опорного изолятора (рисунок 1.4,а с металлическими кольцами 1 и 2 и трубкой из диэлектрического материала 3);
- модель проходного изолятора (рисунок 1.4,а при этом внутри трубки размещается металлический стержень 4, электрически соединенный с кольцом 2);

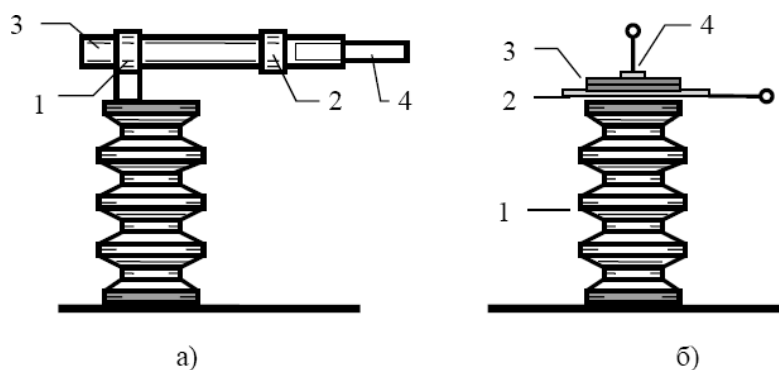


Рисунок 1.4 – Модель для испытания проходных и опорных изоляторов

На рисунке 1.4 изображена модель опорного и проходного изоляторов. Распределение электрических полей в опорном изоляторе моделируется при подаче напряжения на металлические кольца 1 и 2, насаженные на трубку 3, а поля для случая проходного изолятора формируются при добавке внутреннего стержня 4, соединяемого с кольцом 2.

Таблица 1.1 – Результаты измерений

Форма Электродов, полярность напряжения	Расстояние S , см		U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_{cp}	E_{cp} , кВ/мм
		U_{np} , кВ							
		$U_{кор}$,кВ							
		U_{np} , кВ							
		$U_{кор}$, кВ							
		U_{np} , кВ							
		$U_{кор}$, кВ							
		U_{np} , кВ							
		$U_{кор}$,кВ							
		U_{np} , кВ							
		$U_{кор}$, кВ							
		U_{np} , кВ							
		$U_{кор}$, кВ							

На переменном напряжении измерить пробивные напряжения U_{np} промежутка сфера – сфера при пяти разных расстояниях между электродами. Расстояние между сферами S не должно превышать 3 см. Прodelать подобные опыты с электродами типа стержень-стержень, стержень плоскость. Для последней пары электродов опыты повторить при постоянном напряжении и различных полярностях на плоскости. Данные занести в таблицу 1.1.

2. По данным таблицы 1.1 построить графики зависимостей пробивного напряжения и электрической прочности от расстояния между электродами, сделать выводы по полученным результатам.

3. Проанализировать результаты и сделать выводы по полученным результатам.

Содержание отчета

Каждый студент, выполнивший лабораторную работу, должен оформить отчет и предоставить его преподавателю.

Отчет должен содержать:

1. Название и цель работы.
2. Таблицы экспериментальных и расчетных данных.
3. Графики зависимостей, полученных в результате эксперимента и расчета.
4. Выводы по результатам работы, в которых должна быть дана оценка исследуемых явлений, подтверждение в выполнении законов, объяснение характера кривых.

Отчет должен иметь титульный лист с указанием Ф.И.О. студента, номера группы и даты выполнения работы.

Контрольные вопросы

1. Зависимость электрической прочности газа от расстояния между электродами.
2. Зависимость электрической прочности газа от формы электродов.
3. Зависимость электрической прочности газа от температуры.
4. Зависимость электрической прочности газа от давления.
5. Развитие пробоя в газах.
6. Лавина электронов.
7. Развитие стримера.
8. Однородные и неоднородные поля, коэффициент неоднородности.
9. Коронный разряд.

10. Ударная ионизация.
11. Закон Пашена.
12. Влияние времени приложения напряжения на электрическую прочность газа.
13. Особенности разряда по поверхности твердого диэлектрика.
14. Различие в моделях проходного и опорного изолятора.
15. Симметричные и несимметричные системы электродов.

Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме

Основная литература

1. Электроснабжение сельского хозяйства: учебник / т. Б. Лещинская, и. В. Наумов ; [ред. Г. В. Лихачёва]. - М. : Колос, 2008. - 655 с. – ISBN 978-5-9532-0560-3.
2. Расчет электрических полей устройств высокого напряжения : учеб. пособие / И. П. Белоедова, Ю. В. Елисеев, Е. С. Колечицкий и др. ; ред. Е. С. Колечицкий. - М.: ИД МЭИ, 2008. - 248 с. – ISBN 978-5-383-00072-4

Дополнительная литература

3. Техника высоких напряжений : учебник для вузов / под ред. Д. В. Разевига. – 2-е изд., пер. и доп. – М. : Энергия, 1976. – 488 с.
4. Техника высоких напряжений(изоляция и перенапряжение в электрических установках) : учебник для техникумов / В. П. Ларионов, В. В. Базуткин, Ю. Г. Сергеев ; под ред. В. П. Ларионова. – М. : Энергоиздат, 1982. – 296 с.

Лабораторная работа №2

Испытание изоляции повышенным напряжением, измерение сопротивления изоляции, контроль линейной изоляции

Цель: Изучение распределения напряжения по изоляторам гирлянды с помощью электрической схемы замещения. Исследование распределения напряжения по гирлянде подвесных изоляторов методом непосредственного измерения напряжения. Ознакомление с порядком испытания изоляции электрооборудования повышенным постоянным напряжением.

Теоретическая часть

На рисунке 2.1 показана гирлянда подвесных изоляторов и ее электрическая схема замещения. Здесь C - собственные емкости изоляторов; C_1 - емкости изоляторов относительно заземленных частей опоры (емкость на землю); C_2 - емкость изоляторов относительно токоведущего провода.

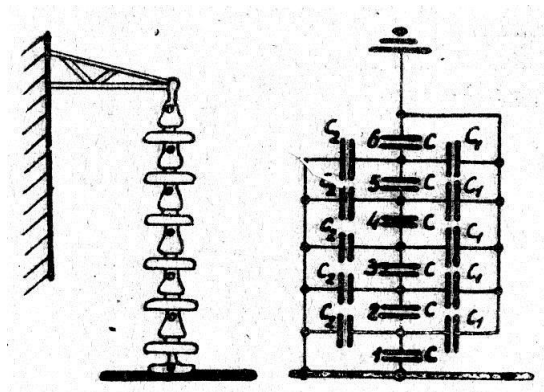


Рисунок 2.1 Гирлянда подвесных изоляторов и схема ее замещения

Так как гирлянда комплектуется из однотипных изоляторов, можно принять емкости C одинаковыми. Если бы емкости C_1 и C_2 отсутствовали, то напряжение распределялось по гирлянде равномерно (рисунок 2.2). В этом случае через емкости изоляторов протекает один и тот же емкостной ток I , вызывающий одинаковые падения ΔU на емкостях C :

$$\Delta U = I \frac{1}{j\omega C} \quad (2.1)$$

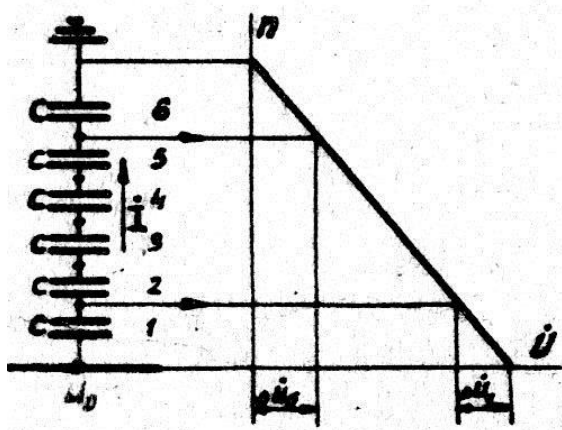


Рисунок 2.2 – Распределение напряжения по гирлянде в случае отсутствия паразитных емкостей

На рисунке 2.3 дана схема замещения и показано распределение токов при наличии емкости относительно земли C_1 и отсутствие емкости C_2 .

По мере удаления от провода токи $I_1, I_2, \dots, I_6$ уменьшаются на величину $\Delta I_1, \Delta I_2, \Delta I_6$ и, следовательно, $\Delta U_1 > \Delta U_2 > \Delta U_6$

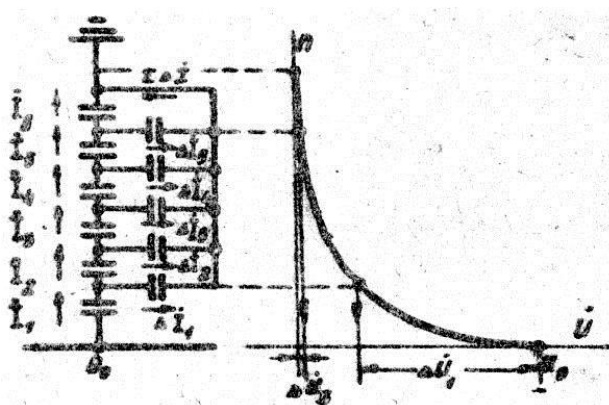


Рисунок 2.3 – Распределение напряжения по гирлянде в случае присутствия паразитных емкостей на землю.

Наибольший ток протекает через емкость элемента, ближайшего к проводу, наименьший - через элемент, ближайший к земле. Следовательно, согласно формуле (1) наибольшее напряжение приходится на первый элемент гирлянды

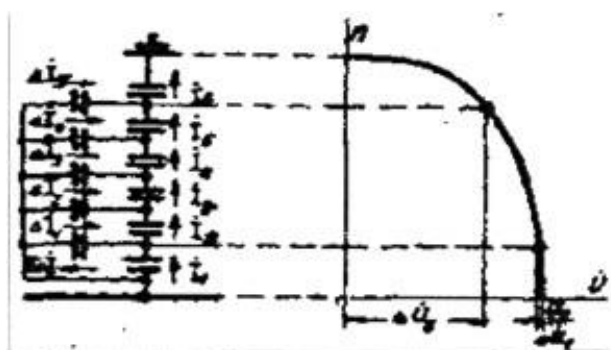


Рисунок 2.4 – Распределение напряжения по гирлянде в случае присутствия паразитных емкостей на провод.

На рисунке 2.4 показано влияние емкостей относительно провода на распределение напряжения по элементам гирлянды в предположении, что емкости относительно земли отсутствуют. Рассуждения, аналогичные предыдущим, показывают, что наличие емкостей C_2 обуславливает наибольшее напряжение на элементе, ближайшем к земле.



Рисунок 2.5 - Распределение напряжения по гирлянде в случае присутствия паразитных емкостей на провод и на землю.

На рисунке 2.5 показано распределение напряжения по гирлянде изоляторов в случае наличия емкостей относительно токоведущего провода C_2 и емкостей относительно земли C_1 когда для всех элементов гирлянды эти емкости одинаковы, т. е. $C_1=C_2$. В этом случае вблизи провода ток, протекающий через емкости C_1 велик (так как велико напряжение относительно земли), а ток, протекающий через емкости C_2 , мал. Вблизи земли наоборот: токи, протекающие через емкости C_1 малы, а токи, протекающие через емкости C_2 , велики. Из - за указанного соотношения токов и получается такая кривая распределения напряжения по элементам гирлянды.

Практически емкости C_1 и C_2 различны для различных элементов гирлянды зависят от положения данного изолятора в гирлянде, а совместное влияние этих емкостей складывается обычно таким образом, что наибольшее напряжение приходится на изолятор, расположенный около провода, а наименьшее - на изолятор, находящийся в средней части гирлянды ближе к заземленному концу.

Для выравнивания распределения напряжения вдоль гирлянды изоляторов применяется специальная арматура в виде колец или рогов, которая укрепляется в месте подвески провода. Арматура увеличивает емкость C_2 , в основном изоляторов, ближайших к проводу, тем самым уменьшает долю напряжения, приходящуюся на них.

Оборудование и материалы

В работе используется аппарат АИД-70/50, описание и работа с которым аналогична описанной в лабораторной работе №1.

Указания по технике безопасности

1. К работе на стендах допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности при выполнении работ в лабораториях кафедры «Автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения» и ознакомившиеся с настоящими методическими указаниями. Прохождение инструктажа по технике безопасности фиксируется преподавателем в специальном журнале.

2. Лабораторная работа должна выполняться не менее чем двумя студентами.

3. Перед началом работы необходимо убедиться в надежном заземлении корпуса аппарата.

4. Замену образца диэлектрика производят после отключения аппарата сетевым выключателем.

5. По окончании испытания или при перерыве в работе установку отключают от напряжения питания.

Задания

Высоковольтная схема установки показана на рисунке 2.6, источником напряжения служит аппарат АИД-70/50, для измерения напряжения применяется киловольтметр С96 с делителем Д6-2

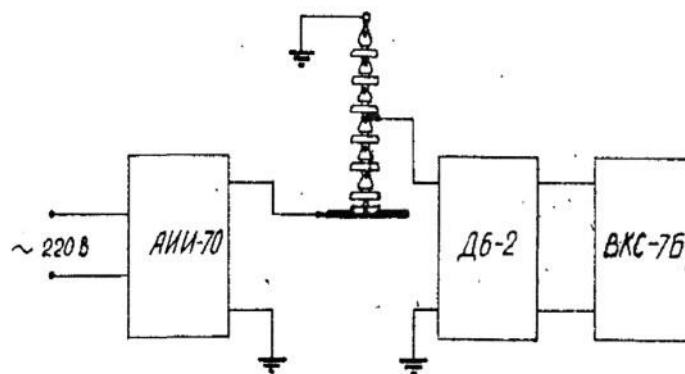


Рисунок 2.6 – Схема измерения распределения напряжения по гирлянде изоляторов

Методика и порядок выполнения работы

1. С помощью схемы замещения рассчитать напряжение и построить кривые $U = f(n)$ для следующих случаев:

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

Результаты расчетов занести в таблицу 2.1

Таблица 2.1 – Измерение распределения напряжения на модели

Номер изолятора, n	Напряжение U, В			
	$C \neq 0$	$C \neq 0$	$C \neq 0$	$C \neq 0$
	$C_1 = 0$	$C_1 = 0$	$C_1 \neq 0$	$C_1 \neq 0$
	$C_2 = 0$	$C_2 \neq 0$	$C_2 = 0$	$C_2 \neq 0$

По данным таблицы 2.1 построить графики распределения напряжения по модели для каждого случая.

Измерить напряжение на отдельных элементах гирлянды. Для измерения собрать схему по рисунку 2.6.

Результаты измерений занести в таблицу. 2.2

Таблица 2.2 – Измерение распределения напряжения по гирлянде изоляторов

Номер изолятора	Показания вольтметра U, кВ
-----------------	----------------------------

По данным таблицы 2.2 построить график распределения напряжения по гирлянде изоляторов.

Измерить токи утечки в изоляции электрооборудования при испытании повышенным напряжением. Для этого подключить испытываемую изоляцию к высоковольтному выводу блока АИД -70/50, другие выводы испытываемого оборудования и корпус заземлить, по результатам заполнить таблицу 2.3.

Таблица 2.3 – Измерение токов утечки

Наименование оборудования и соединение обмоток	Напряжение, кВ	Ток утечки, мА

Содержание отчета

Каждый студент, выполнивший лабораторную работу, должен оформить отчет и предоставить его преподавателю.

Отчет должен содержать:

1. Название и цель работы.
2. Таблицы экспериментальных и расчетных данных.
3. Графики зависимостей, полученных в результате эксперимента и расчета.
4. Выводы по результатам работы, в которых должна быть дана оценка исследуемых явлений, подтверждение в выполнении законов, объяснение характера кривых.

Отчет должен иметь титульный лист с указанием Ф.И.О. студента, номера группы и даты выполнения работы.

Контрольные вопросы

1. Изоляция воздушных линий электропередач, основные составляющие и принципы построения.
2. Виды внешних воздействий на изоляцию линий электропередач.
3. Устройство подвесного изолятора. Виды подвесных изоляторов.
4. Основные параметры и маркировка подвесных изоляторов.
5. Гирлянды подвесных изоляторов и распределение напряжения по изоляторам.
6. Схема замещения гирлянды подвесных изоляторов.
7. Пути развития разряда вдоль гирлянды подвесных изоляторов.
8. Методы улучшения распределения напряжения по гирлянде подвесных изоляторов.
9. Методы контроля изоляторов в гирлянде.
10. Расчет числа изоляторов в гирлянде на основе допустимой длины пути утечки.
11. Распределение напряжения по гирлянде изоляторов при постоянном напряжении.
12. Особенности работы изоляции на постоянном напряжении.
13. Допустимые испытательные постоянные напряжения для оборудования переменного тока.

14. Контроль изоляции с применением повышенного постоянного напряжения.
15. Маркировка силовых кабелей.
16. Кабели на напряжение до 1 кВ.
17. Кабели с полиэтиленовой изоляцией.
18. Кабели с бумажно-масляной изоляцией.
19. Особенности конструкции кабелей на напряжение 35 кВ и выше.
20. Электрический расчет кабеля.
21. Особенности работы кабельной изоляции при постоянном напряжении.

Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме

Основная литература

1. Электроснабжение сельского хозяйства: учебник / т. Б. Лещинская, и. В. Наумов ; [ред. Г. В. Лихачёва]. - М. : Колос, 2008. - 655 с. – ISBN 978-5-9532-0560-3.

2. Расчет электрических полей устройств высокого напряжения : учеб. пособие / И. П. Белоедова, Ю. В. Елисеев, Е. С. Колечицкий и др. ; ред. Е. С. Колечицкий. - М.: ИД МЭИ, 2008. - 248 с. – ISBN 978-5-383-00072-4

Дополнительная литература

3. Техника высоких напряжений : учебник для вузов / под ред. Д. В. Разевига. – 2-е изд., пер. и доп. – М. : Энергия, 1976. – 488 с.

4. Техника высоких напряжений(изоляция и перенапряжение в электрических установках) : учебник для техникумов / В. П. Ларионов, В. В. Базуткин, Ю. Г. Сергеев ; под ред. В. П. Ларионова. – М. : Энергоиздат, 1982. – 296 с.

Лабораторная работа №3

Исследование тангенса угла диэлектрических потерь электроэнергетического оборудования

Цель работы – исследование тангенса угла диэлектрических потерь электроизоляционных конструкций, измерение сопротивления и коэффициента абсорбции, приобретение навыков работы с оборудованием для контроля состояния изоляции электроэнергетического оборудования.

Теоретическая часть

Испытания изоляции высоковольтного оборудования производят как на стадии его изготовления, так и в течение его эксплуатации с целью выявления возможных дефектов и предотвращения возникновения аварийных ситуаций. Наиболее распространенный дефект изоляции это уменьшение ее сопротивления, увеличение электрической емкости и диэлектрических потерь. Причиной этого может служить проникновение влаги, старение и воздействия различных перенапряжений. Все это приводит к дополнительному нагреву изоляции, в связи с чем снижается механическая прочность твердой изоляции, уменьшается срок ее службы. При значительном ухудшении характеристик изоляции происходит ее пробой.

Согласно нормативной документации испытания изоляции различных видов электрооборудования предусматривают измерение емкости изоляции

и угла диэлектрических потерь, сопротивления изоляции и коэффициента абсорбции.

Диэлектрическими потерями называют электрическую мощность, которая преобразуется в тепловую энергию внутри диэлектрика. Основным следствием является нагрев изоляции, который тем больше, чем больше угол диэлектрических потерь. При очень больших значениях диэлектрических потерь изоляция может нагреваться до очень высоких температур, вплоть до теплового разрушения.

Диэлектрические потери пропорциональны квадрату приложенного к изоляции напряжения, поэтому для характеристики изоляции характеристика – тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$.

Углом диэлектрических потерь δ называют угол, дополняющий до 90 градусов угол сдвига фаз между током и напряжением на изоляции.

При рассмотрении изоляции электрооборудования ее обычно замещают параллельной или последовательной схемой замещения. Параметры схем замещения (C , C_s и R , r) зависят от различных факторов. Величина емкости конденсатора с реальным диэлектриком, вообще говоря, зависит от применяемой схемы замещения, но для изоляции с малыми диэлектрическими потерями, когда $\operatorname{tg}\delta \ll 1$, емкости конденсатора по последовательной и параллельной схеме замещения одинаковы, а сопротивление параллельной схемы R намного больше сопротивления последовательной схемы r . Связь между мощностью, выделяемой вследствие диэлектрических потерь и $\operatorname{tg}\delta$ определяется формулой (3.1):

$$P = \omega C U^2 \operatorname{tg}\delta \quad (3.1)$$

а потери в единице объема равны

$$p = \omega \varepsilon_0 \varepsilon_r E^2 \operatorname{tg}\delta \quad (3.2)$$

где U – напряжение, приложенное к изоляции, E – напряженность электрического поля в изоляции, ω – круговая частота, C – емкость изоляции, ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость изоляции.

Измерение величины $tg\delta$ является одним из наиболее распространенных способов контроля состояния изоляции, который чувствителен к различным дефектам изоляции и позволяет сделать вывод об общем состоянии изоляции. Увеличение $tg\delta$ говорит о наличии влаги, появлении проводящих примесей, микротрещин и т.п. в изоляции. Увеличение угла диэлектрических потерь с ростом приложенного напряжения говорит об ионизации газовых включений в твердой изоляции. Так как основное требование к изоляции сводится к отсутствию ее нагрева вместе со свойством не проводить сквозной проводимости, то становится очевидным, что $tg\delta$ действительно является одной из наиболее важных характеристик изоляции, а испытание изоляции по величине $tg\delta$ – является наиболее распространенным методом контроля состояния изоляции.

Токи абсорбции и сквозной проводимости. Если к диэлектрику прикладывается постоянное напряжение U , то ток в диэлектрике будет иметь следующие составляющие, показанные на рисунке 3.1: а) тока i_∞ заряда геометрической емкости C_∞ ; б) ток абсорбции $i_{abc} = \frac{U}{r} \cdot e^{-\frac{t}{T}}$, обусловленный медленными процессами поляризации, изменяющийся с постоянной времени T ; в) активный ток сквозной проводимости $i_{np} = U/R$.

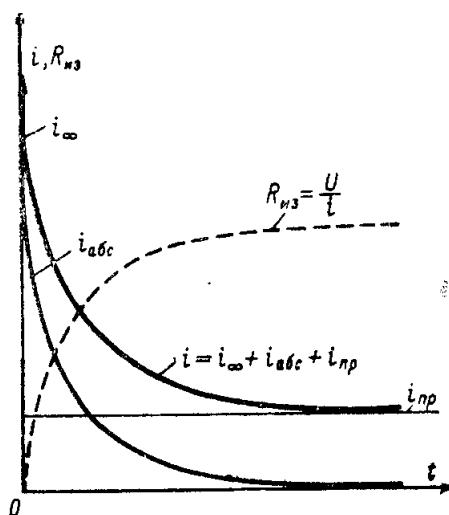


Рисунок 3.1 – Ток абсорбции и изменение сопротивления изоляции с течением времени.

Явления медленной поляризации, также как и появление областей с повышенной проводимостью вызваны в основном попаданием влаги в изоляцию. Поэтому характеристики качества изоляции являются преимущественно показателями увлажнения изоляции.

Измерение сопротивления изоляции обычно осуществляется приборами с некоторой инерционностью, и, следовательно, на показание приборов влияют только процессы медленной поляризации. На рисунке 3.1 пунктиром отмечено изменение сопротивление изоляции, определенное как $R_{из} = U/i$. Соответственно спаду тока i сопротивление изоляции $R_{из}$ растет во времени. Экспериментально установлено, что для большинства типов изоляции постоянная времени поляризации T меньше 1 мин. Это означает, что к моменту $T=1$ мин после приложения напряжения U сопротивление изоляции $R_{из}$ достигает установившегося значения R , которое определяет наличие проводящих каналов в изоляции. Резкое падение R показывает, что имеется далеко зашедшее развитие дефекта в изоляции. Обычно вывод о состоянии изоляции осуществляется на основании сравнения с результатами предыдущих измерений R или заводских данных.

Изоляция может характеризоваться также поляризационным спадом тока или нарастанием сопротивления изоляции во времени. Это нарастание

выражается отношением R_{T2}/R_{T1} где R_{T1} и R_{T2} – сопротивления изоляции, измеренные при двух моментах времени $T1$ и $T2$ (обычно $T2 = 60$ сек и $T1 = 15$ сек). Чем больше изоляция содержит посторонних включений, в частности, чем больше увлажнена изоляция, тем меньше отношение R_{T2}/R_{T1} . Измерение сопротивления изоляции осуществляется мегомметрами, состоящими из маломощного источника постоянного напряжения величиной 0,5—2,5 кВ и измерительного блока.

Оборудование и материалы

Лабораторная установка создана на базе высоковольтного автоматического моста переменного тока СА-7100-3 (рисунок. 3.2), объектом исследований являются различные образцы твердых диэлектриков.

Устройство и работа лабораторной установки

Основные составные части моста СА-7100-3 и выполняемые ими функции.

Структурная схема моста приведена на рисунке 3.2.

БУ (Блок управления) предназначен для управления процессом измерения, а также для диалога оператора с Мостом.

ЗУ (Зарядное устройство) обеспечивает формирование питающего напряжения *БУ*, преобразование электрических сигналов в оптические, а также используется для заряда аккумулятора.

БУ и *ЗУ* размещаются на рабочем месте оператора, а Блок измерительный располагается в огражденной высоковольтной зоне.

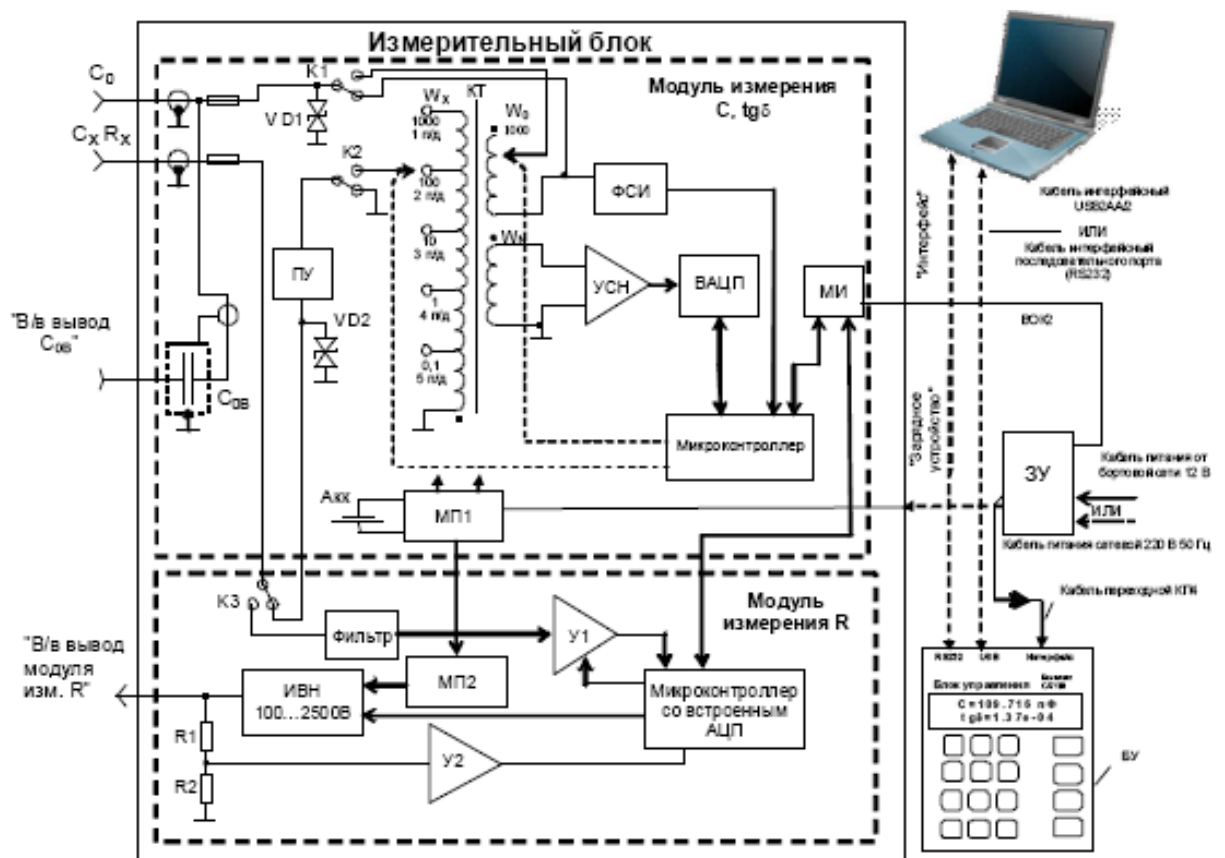


Рисунок 3.2 – Структурная схема моста СА-7100-3

На рисунке 3.2 приняты следующие обозначения: КТ – компаратор токов; ФСИ – формирователь синхроимпульсов; УСН – усилитель сигнала неравновесия; ВАЦП – вектормерный аналого-цифровой преобразователь; ПУ – пороговое устройство; МИ – модуль интерфейса; МП1, МП2 – модули питания; АКК – свинцово-кислотный аккумулятор; ЗУ – зарядное устройство; У1 – усилитель с переменным коэффициентом усиления; У2 – усилитель; ИВН – источник высокого напряжения; «Высоковольтный вывод C_0 » – высоковольтный вывод встроенного эталонного конденсатора; «Высоковольтный вывод модуля изм. R » – высоковольтный вывод модуля измерения R ; C_0 – разъем для подключения внешнего эталонного конденсатора; C_x – разъем для подключения объекта измерения.

Связь БУ, ЗУ и Блока измерительного осуществляется через полностью диэлектрический волоконно-оптический кабель, что позволяет

обеспечить безопасность персонала. В БУ предусмотрены последовательные интерфейсные порты для связи с ПК (RS232 и USB). При использовании Моста с ПК расширяются диалоговые возможности прибора, а также возможности по сохранению и дальнейшей обработке результатов измерений стандартными программами.

МИ (модуль интерфейса) осуществляет функцию преобразования оптических сигналов в электрические.

МП1 (модуль питания) служит для формирования питающих напряжений модуля измерения C , $tg\delta$, а также обеспечивает контроль заряда аккумулятора.

КТ (компаратор токов), внешний эталонный конденсатор (C_0) (или встроенный эталонный конденсатор C_{0B}) и объект измерения (C_x) образуют мостовую схему измерения.

УСН (усилитель сигнала неравновесия) усиливает сигнал неравновесия до уровня, необходимого для эффективной работы ВАЦП.

ВАЦП (вектормерный аналого-цифровой преобразователь) представляет собой комбинацию двух синхронных детекторов с взаимно квадратурными опорными колебаниями и двух АЦП, подключенных к их выходам. Значения кодов, считываемых микроконтроллером с указанных АЦП, пропорциональны соответствующим квадратурным составляющим сигнала неравновесия.

Микроконтроллер осуществляет преобразование команд, поступающих из БУ, в сигналы управления узлами модуля измерения C , $tg\delta$, а также передает в БУ через ВОК2 (волоконно-оптический кабель) значения кодов, вырабатываемых АЦП, информацию о перегрузке входных цепей по току и о разряде аккумулятора.

КТ содержит обмотки W_x и W_0 , через которые протекают сравниваемые токи (ток эталонного конденсатора и ток объекта измерения) и обмотку W_N , которая служит для выделения сигнала неравновесия. В зависимости от выбранного поддиапазона измерения ток объекта измерения

(1 п/д-5 п/д) поступает на один из выводов обмотки W_x (на рисунке показано положение переключателя поддиапазонов, соответствующее 2 п/д измерения). 5 п/д реализован с помощью дополнительного двухступенчатого трансформатора тока, который не показан на схеме. Число витков обмотки W_0 может меняться от 1 до 1000. Изменением количества витков этой обмотки осуществляется уравнивание мостовой цепи в пределах поддиапазона измерения.

ФСИ (формирователь синхроимпульсов) вырабатывает импульсы, синхронные с измерительным сигналом. Период данных импульсов измеряется с помощью микроконтроллера. Благодаря этому формируемые им опорные колебания для синхронных детекторов ВАЦП когерентны с токами, сравниваемыми КТ.

Стабилитроны VD1, VD2, коммутаторы K1 и K2, а также предохранители предназначены для защиты измерительной цепи от перегрузок по току. Коммутатор K3 обеспечивает переключение сигнала от измеряемого объекта, в зависимости от режима работы (измерение C , $tg\delta$ или измерение R).

ПУ (пороговое устройство) обеспечивает отключение Блока измерительного при превышении допустимого значения силы тока в канале C_x .

Фильтр повышает помехозащищенность схемы, фильтруя помехи промышленной сети.

Усилитель с переменным коэффициентом усиления У1 усиливает измеряемый сигнал до уровня, необходимого для эффективной работы АЦП (аналого-цифровой преобразователь).

Усилитель У2 совместно с делителем R1, R2 обеспечивает необходимый уровень измеряемого напряжения для АЦП.

ИВН (источник высокого напряжения) вырабатывает высокое напряжение постоянного тока, уровень которого регулирует микроконтроллер.

Модуль питания МП2 обеспечивает питание цепей модуля измерения R.

Микроконтроллер со встроенным АЦП осуществляет преобразование команд, поступающих из БУ, в сигналы управления узлами модуля измерения R, аналого-цифровое преобразование измеряемых сигналов и передачу полученных кодов в БУ через ВОК2.

Основой процесса измерения C , $tg\delta$ является вариационный метод. Используемая в модуле измерения C , $tg\delta$ разновидность вариационного метода измерения предусматривает изменение (вариацию) измеряемой величины (отношения токов) на известное с необходимой точностью значение. Разность значений измеряемой величины до и после вариации используется в качестве калибровочного сигнала. Вычисления, необходимые для получения результата, осуществляет процессор, размещенный в Блоке управления.

Процесс измерения C , $tg\delta$ можно условно разделить на следующие основные этапы:

- 1) выбор чувствительности и измерение рабочего напряжения;
- 2) выбор п/д;
- 3) уравнивание измерительной цепи в пределах п/д;
- 4) измерение значения остаточного сигнала неравновесия и "нулей" прибора (при отключенных с помощью коммутаторов K1 и K2 сравниваемых токах);
- 5) вычисление результата измерения по равновесным значениям декадных коммутаторов и значению остаточного сигнала неравновесия;
- 6) коррекция результата с учетом влияния сопротивлений подводящих проводов, обмоток и коммутаторов в цепи объекта измерения и эталонного конденсатора.

Выбор чувствительности осуществляется изменением коэффициента передачи УСН. Смена п/д осуществляется переключением числа витков обмотки W_x , а уравнивание в пределах п/д - переключением витков

обмотки W_0 . После уравнивания с помощью ВАЦП измеряется остаточный сигнал неравновесия.

Используя результат этого измерения, равновесные значения числа витков обмоток КТ, а также значения емкости и тангенса угла потерь C_0 , БУ производит вычисление и выводит на экран значения емкости и тангенса угла потерь объекта измерения и действующего значения первой гармоники рабочего напряжения и его частоты.

В основе процесса измерения R лежит метод вольтметра-амперметра, т.е. значение сопротивления рассчитывается, исходя из результатов измерений приложенного напряжения и тока, протекающего через объект измерения.

Процесс измерения сопротивления с помощью модуля измерения R включает следующие основные этапы:

- 1) измерение "нулей" модуля измерения R ;
- 2) установка постоянного напряжения, прикладываемого к объекту при измерении сопротивления, U_R ;
- 3) выбор п/д;
- 4) измерение тока и напряжения;
- 5) расчет сопротивления.

Смена п/д осуществляется переключением коэффициента усиления усилителя $U1$.

БУ выполняет расчет результата и вывод на экран значения сопротивления и значения напряжения, при котором производилось измерение.

2. Дополнительные устройства

Расширитель диапазона СА7150 (далее – Расширитель СА7150) предназначен для расширения диапазона измерения емкости Моста за счет прецизионного преобразования тока в цепи объекта измерения (6-7 п/д). Подключение к объекту измерения происходит по четырехзажимной схеме.

Устройство согласования автоматизированное СА7140 совместно с Мостом осуществляет дифференциальный контроль изоляции объектов (например, трансформаторов тока), находящихся под рабочим напряжением, а также выполняет контроль параметров защитных резисторов устройств присоединения. Процесс измерения полностью автоматизирован.

Коммутатор высоковольтный СА7161 (далее – Коммутатор СА7161) предназначен для переключения вариантов измерительных схем ("прямая" - "инверсная"), а также для переключения режимов измерений " C , $tg\delta$ " <-> "> R " в измерительной цепи Моста СА7100-3.

Источник переменного рабочего напряжения (далее – ИПРН) предназначен для формирования рабочего напряжения при измерении тангенса угла потерь и емкости. ИПРН обеспечивает преобразование сетевого напряжения 220 В 50 Гц в напряжение от 1 до 10 кВ. Также ИПРН выполняет поворот фазы рабочего напряжения на 180° при реализации метода "двух отсчетов".

Устройство тестирующее СА7135 (далее – Устройство СА7135) предназначено для проверки работоспособности Моста в ручном и автоматическом режимах. В состав Устройства СА7135 входят 16 мер емкости и 2 меры сопротивления. При подключении Устройства СА7135 к Мосту на входах Моста имитируются необходимые измерительные сигналы, которые обеспечивают проверку работоспособности Моста.

ИПРН, Блок измерительный и Коммутатор СА7161 для удобства транспортирования на малые расстояния может быть размещен на тележке.

3. Конструкция моста

Базовый комплект моста состоит из:

- Блока измерительного;
- Блока управления (БУ);
- Зарядного устройства (ЗУ).

На рисунке 3.3 показан внешний вид передней панели и верхней стенки Блока измерительного, а на рисунке 3.4 – внешний вид БУ.

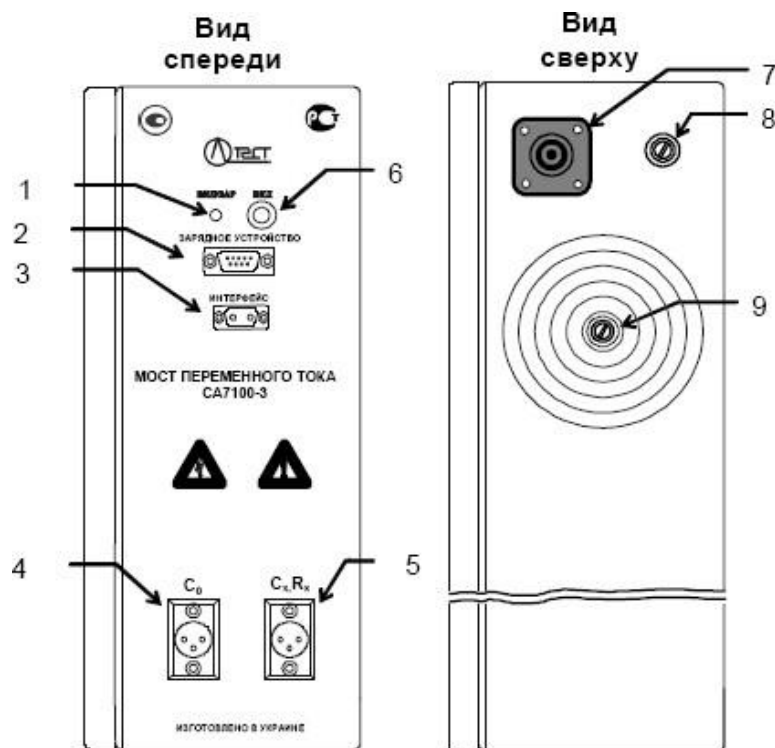


Рисунок 3.3 – Внешний вид передней панели и верхней стенки Блока измерительного.

На рисунке 3.3 приняты следующие обозначения: 1 – индикатор включения питания Блока измерительного и контроля заряда аккумулятора; 2 – разъем для подключения внешних устройств (устройства СА7135, коммутатора СА7161 и т.п.) или ЗУ при заряде аккумулятора; 3 – разъем для подключения ВОК2 или ВОК1 при наличии ИПРН; 4 – разъем для подключения внешнего эталонного конденсатора; 5 – разъем для подключения объекта измерения; 6 – кнопка включения питания; 7 – высоковольтный вывод модуля измерения R (Мост СА7100-3); 8 – корпусной зажим; 9 – высоковольтный вывод встроенного эталонного конденсатора (мосты СА7100-2, СА7100-3).

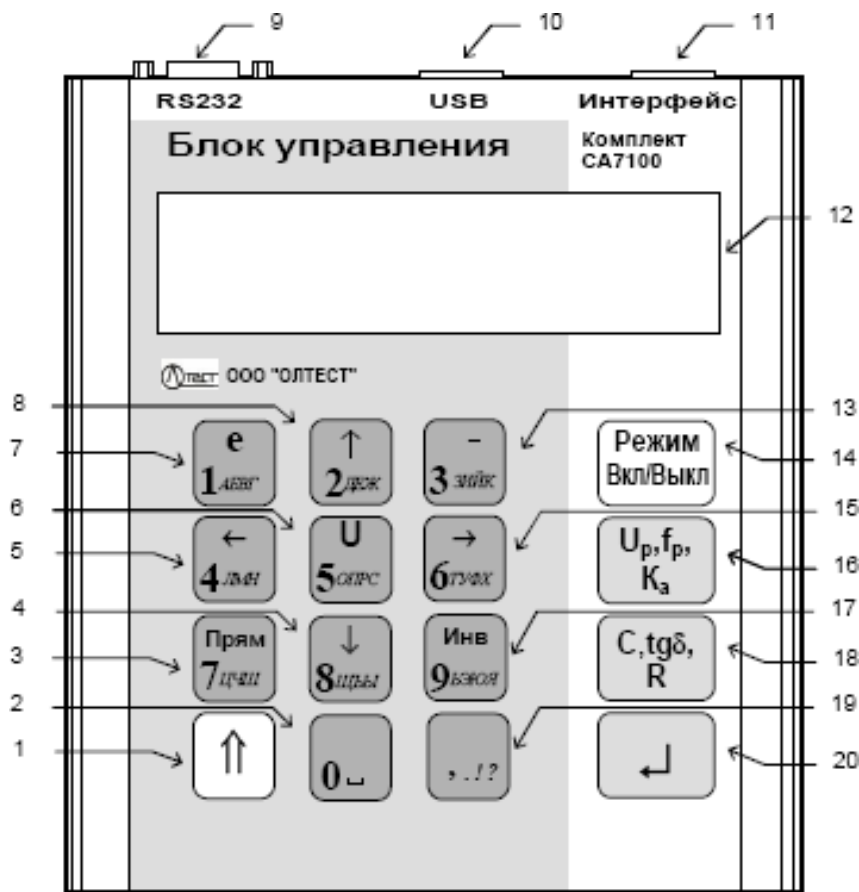


Рисунок 3.4 – Внешний вид БУ

На рисунке 3.4 приняты следующие обозначения: 1 – кнопка для включения регистра (для кнопок с двойным назначением); 2 – кнопка для ввода символов "О" и "i_1"; 3 – кнопка для включения «прямой» схемы измерений и ввода символов "7","Ц","Ч","Ш"; 4 – кнопка для ввода символов "8", "Щ", "Ъ", "Ы" и для перемещения курсора; 5 – кнопка для ввода символов "4", "Л", "М", "Н" и для перемещения курсора; 6 – кнопка для ввода символов "5", "О", "П", "Р", "С" и выбора величины устанавливаемого переменного напряжения при измерении C и $\text{tg}\delta$ или постоянного напряжения при измерении R ; 7 – кнопка для ввода символов "1", "А", "Б", "В", "Г" и для ввода основания степени (e); 8 – кнопка для ввода символов "2", "Д", "Е", "Ж" и для перемещения курсора; 9 – разъем RS232 для подсоединения ПК; 10 – разъем USB для подсоединения ПК; 11 – разъем для подключения ЗУ; 12 – двухстрочный ЖК-индикатор для вывода информации; 13 – кнопка для ввода символов "З", "З", "И", "Й", "К"

и для ввода знака "-"; 14 – кнопка для включения/выключения моста и переключения режимов; 15 – кнопка для ввода символов "6", "Г", "У", "Ф", "Х" и для перемещения курсора; 16 – кнопка для включения режима измерения напряжения U_P , частоты f_P и коэффициента абсорбции K_a ; 17 – для включения «инверсной» схемы измерений и ввода символов "9", "Ъ", "Э", "Ю", "Я"; 18 – кнопка для измерения C , $tg\delta$ и R ; 19 – кнопка для ввода знаков препинания ",", ".", "!", "?"; 20 – кнопка для входа в меню и подтверждения ввода.

4. Подготовка моста к работе и включение питания

1. Соединить составные части моста в соответствии с рисунком 3.5 (таблица 3.1), для этого:

1) присоединить корпусной зажим Блока измерительного и в/в вывод эталонного конденсатора к защитному заземлению;

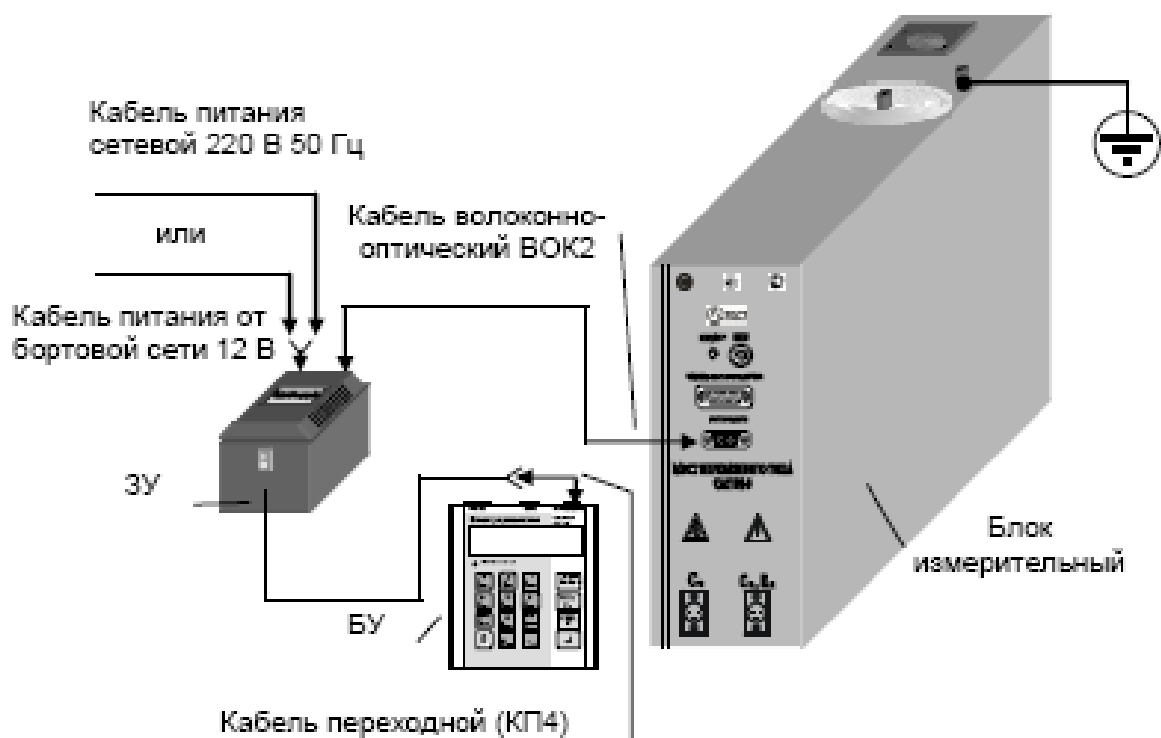


Рисунок 3.5 – Схема соединения блоков моста

2) подключить ЗУ к БУ, присоединив кабель ЗУ к кабелю переходному (КП4), а кабель переходной к разъему БУ "Интерфейс". Не

проводить это подсоединение при включенном ЗУ!

3) соединить ЗУ с Блоком измерительным, используя волоконно-оптический кабель (ВОК2), подключив его разъемы к разъему ЗУ "БОК" и разъему Блока измерительного "Интерфейс", соответственно.

Таблица 3.1 – Действия по включению моста СА-7100-3

№ п/п	Действия	Вид экрана БУ
1	2	3
1	Включить питание БУ. <i>При питании от сети 220 В 50 Гц:</i> 1) подключить к ЗУ кабель питания 220 В 50 Гц и установить выключатель "I/O", размещенный на ЗУ, в положение "О"; включить кабель питания сетевой в сеть 220 В 50 Гц;	
2	Включить питание БУ от сети 220 В 50 Гц, установив выключатель "I/O" в положение "1", выключатель должен подсветиться.	17:22 15/04/08 C, $\text{tg}\delta$ выкл Информация о включенном режиме измерения ("C, $\text{tg}\delta$" или "R"). После включения Моста устанавливается режим последнего сеанса работы.

Продолжение таблицы 3.1

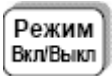
1	2	3
3	Включить Мост, для чего на БУ нажать кнопку  <i>Состояние заряда аккумулятора. В данном случае аккумулятор заряжен.</i>	После включения Моста на экране появится основное окно: Состояние заряда аккумулятора. В данном случае аккумулятор заряжен
4	При появлении на экране БУ одного из сообщений о разряде аккумулятора произвести заряд аккумулятора в соответствии с указаниями раздела 2.4.	Символ мигает! Аккумулятор разряжен. Работа возможна в течение не менее 20 минут. Зарядите аккумулятор! Аккумулятор полностью разряжен. Мост не включается.
5	Убедиться в правильности установки даты и времени. Если требуется корректировка, то выполнить указания раздела 2.4	
6	Выбрать формат отображения $tg\delta$ (в относительных единицах или в процентах) в соответствии с указаниями раздела 2.4.	
7	Мост готов к работе. Для предотвращения неоправданного разряда аккумулятора предусмотрено его автоматическое отключение, если в течение 25 минут не производились измерения.	

Таблица 3.2 – Действия по заряду аккумулятора моста СА-7100-3

№	Действия	Вид индикатора
---	----------	----------------

п/п		на Блоке измерительном
1	2	3
1	Собрать схему для заряда аккумулятора в соответствии с рисунком 3. Присоединить корпусной зажим Блока измерительного и в/в вывод эталонного конденсатора к защитному заземлению; присоединить кабель ЗУ к разъему "ЗАРЯДНОЕ УСТРОЙСТВО" Блока измерительного. Не проводить это подсоединение при включенном ЗУ! подключить к ЗУ кабель питания сетевой 220 В 50 Гц и установить переключатель "I/O" в положение "O"; включить кабель питания сетевой 220 В 50 Гц в розетку сети 220 В 50 Гц.	
2	Начать заряд аккумулятора, установив выключатель "I/O" в положение "I"	Индикатор "ВКЛ/ЗАР" на передней панели Блока измерительного начнет мигать.
3	Время заряда полностью разряженного аккумулятора – 7 часов. Используемый в Мосте свинцово-кислотный аккумулятор не обладает эффектом памяти, который присущ щелочным аккумуляторам, и не требует специальных режимов для его обслуживания.	Прекращение мигания индикатора "ВКЛ/ЗАР" свидетельствует о полном заряде аккумулятора. При этом подача тока от ЗУ автоматически прекращается, что исключает возможность перезаряда аккумулятора и выход его из строя.

Продолжение таблицы 3.2

4	Отключить ЗУ от сети, для чего: установить выключатель "I/O" в положение "О"; отключить кабель питания сетевой от сети 220 В 50 Гц.	
5	Отключить ЗУ от Блока измерительного.	

Заряд аккумулятора можно проводить только при температуре окружающей среды от 0 до +40 °С, как от сети 220 В 50 Гц, так и от бортовой сети автомобиля 12 В.

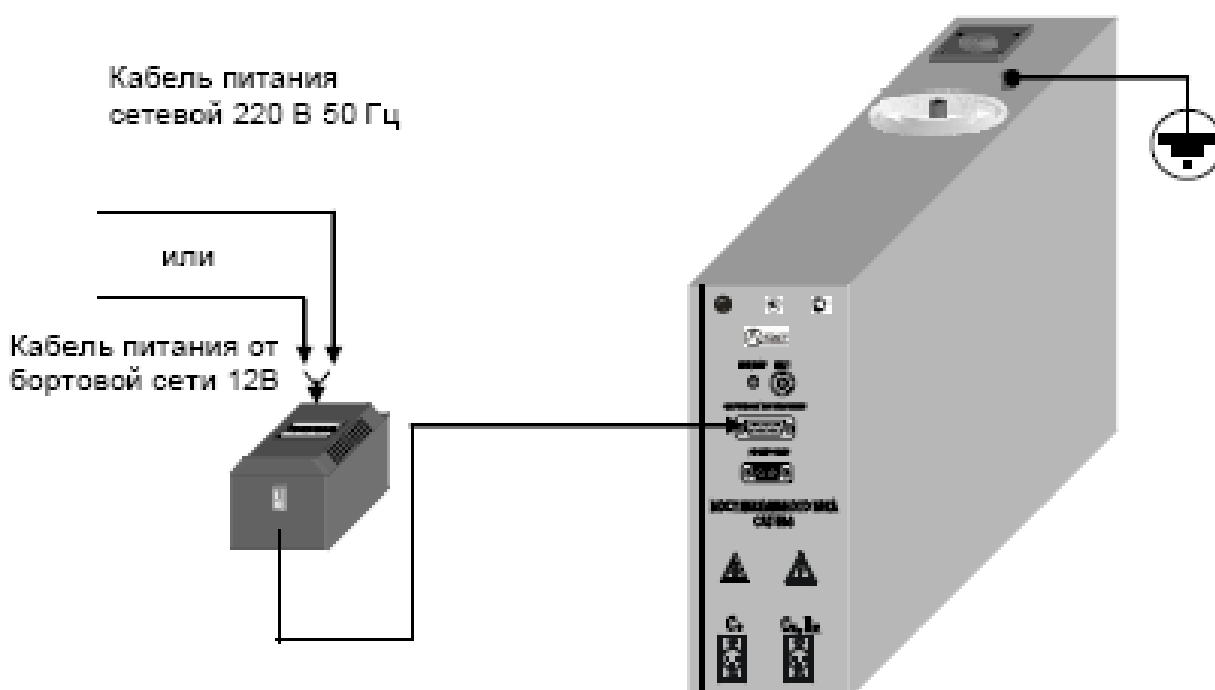


Рисунок 3.6 – Схема включения моста при зарядке аккумулятора

Таблица 3.3 – Действия установке даты и времени

№ п/п	Действия	Вид экрана БУ
----------	----------	---------------

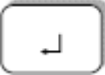
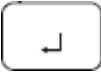
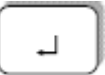
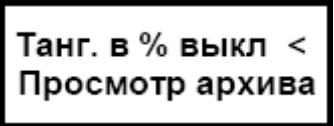
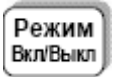
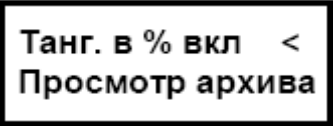
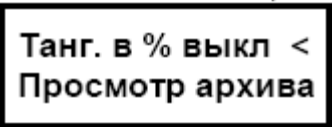
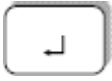
1	Войти в меню режимов и выбрать режим "Дата/Время": нажать кнопку  Используя кнопки  и  установить курсор на строку "Дата/Время".	Назв. объекта Дата / Время <
2	Включить режим "Дата/Время". для чего нажать кнопку 	Дата: 15/04/07 Время: 17:22:05
3	Ввести текущие дату и время: установить курсор на строку "Дата" или "Время", используя кнопки  +  или  +  ; ввести дату и время, используя кнопки  ÷  (после ввода цифры курсор автоматически перемещается на соседнее знакоместо, перемещение осуществляется циклически).	
4	Для возврата в основное окно на БУ нажать кнопку 	17:22 15/04/08 C, tgδ вкл {■}

Таблица 3.4 – Выбор формата отображения $tg\delta$

№ п/п	Действия	Вид экрана БУ
----------	----------	---------------

1	Войти в меню режимов и выбрать режим выбора формата (в относительных единицах или в процентах) отображения $tg\delta$: нажать кнопку  Используя кнопки  и  установить курсор на строку "Танг. в % выкл".	
№ п/п	Действия	Вид экрана БУ
2	Выбрать формат отображения, для чего нажать кнопку .	Включен формат отображения в процентах.  Включен формат отображения в относительных единицах. 
3	Для возврата в основное окно на БУ нажать кнопку .	

5. Работа с мостом при управлении от блока управления

Внимание! Для обеспечения безопасности персонала при подготовительных операциях к проведению измерений корпусной зажим и высоковольтный вывод эталонного конденсатора Блока измерительного должны быть соединены с защитным заземлением!

Измерение C и $tg\delta$ объекта при использовании встроенного эталонного конденсатора. Номинальное значение емкости встроенного эталонного конденсатора указано в руководстве по эксплуатации и равно 27,804 пФ.

Подключение оборудования для проведения измерений C и $tg\delta$.
Подготовить мост к работе в соответствии с разделом 2.4.

Вставить заглушку экранирующую в разъем "C₀" Блока измерительного. Подключить оборудование для проведения измерений с помощью Моста по "прямой" (нормальной) или "инверсной" (перевернутой) схемам (рисунок 3.7, а, б) для этого: соединить высоковольтный вывод встроенного эталонного конденсатора и корпусной зажим моста с выходами вторичной обмотки испытательного трансформатора, если применяются кабели собственного изготовления, то их изоляция должна быть рассчитана на рабочее напряжение 10 кВ; соединить Мост и объект измерения.

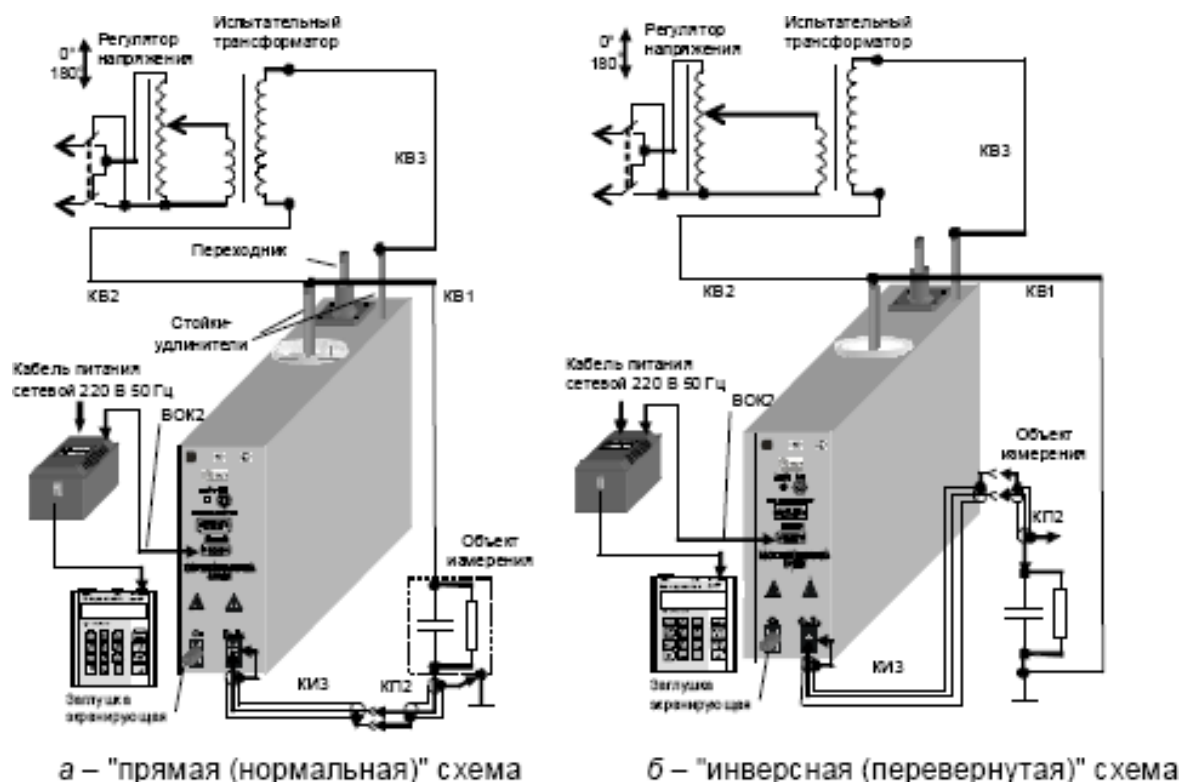


Рисунок 3.7 – Схема соединений моста СА-7100-3

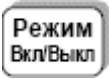
при проведении измерений C и $tg\delta$

ВНИМАНИЕ! При измерении C и $tg\delta$ вывод модуля измерения R должен быть отключен от измерительной схемы! Невыполнение этого требования может привести к выходу из строя моста!

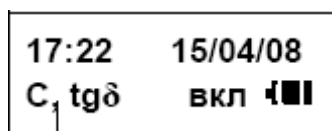
При измерениях по "перевернутой" схеме установить мост на изолирующую подставку, причем подставка должна быть рассчитана на рабочее напряжение.

Включение моста.

Включить питание в соответствии с п.2 таблицы 3.1 раздела 2.4.

Включить Мост, для чего нажать кнопку , появится один из вариантов основного окна на экране БУ:

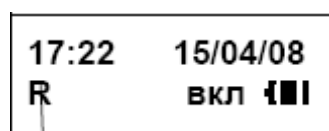
Для СА7100-1, СА7100-2, СА7100-3



Установлен
режим измерения C и $tg\delta$

или

Для СА7100-3



Установлен
режим измерения R

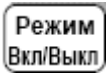
Если в мосту СА7100-3 режим измерения C и $tg\delta$ не установлен, то установить его, для чего нажать  + 

Таблица 3.5 – Измерение C и $tg\delta$ при отсутствии токов влияния

№ п/п	Действия	Вид экрана БУ
1	2	3
1	Отсоединить корпусной зажим Блока измерительного и высоковольтный вывод эталонного конденсатора от защитного заземления.	

Продолжение таблицы 3.5

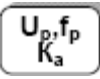
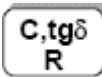
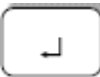
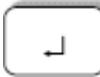
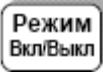
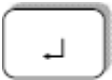
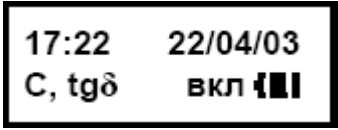
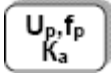
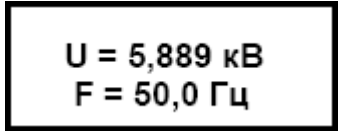
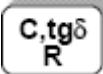
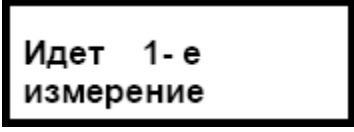
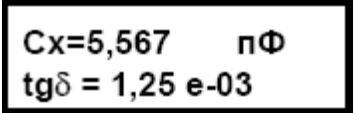
2	Установить рабочее напряжение: нажать кнопку  ; отрегулировать рабочее напряжение, контролируя его значение и частоту по показаниям Моста на экране БУ.	Например: U = 5,889 кВ F = 50,0 Гц
3	Измерить параметры объекта <i>C</i> и <i>tgδ</i>: - нажать кнопку  ; - по окончании измерения на экране БУ появятся параметры объекта.	Идет измерение Cx=115,5 пФ tgδ = 1,37 e-02
4	Для возврата в основное окно на БУ нажать кнопку 	17:22 15/04/08 C, tgδ вкл 

Таблица 3.6 – Измерение *C* и *tgδ* при отсутствии токов влияния в режиме накопления результатов

№ п/п	Действия	Вид экрана БУ
1	Войти в меню режимов и выбрать режим накопления: нажать кнопку  Используя кнопки  и  установить курсор на строку "Накопление".	Ввод C0 Накопление <

Продолжение таблицы 3.6

1	2	3
2	Войти в окно установок режима накопления, для чего нажать кнопку 	
3	Включить режим накопления и ввести число усредняемых измерений N: нажать кнопку  и ввести N (не менее 2 и не более 50), нажимая кнопки  и  По окончании ввода нажать кнопку 	 
4	Отсоединить корпусной зажим Блока измерительного и высоковольтный вывод эталонного конденсатора от защитного заземления.	
5	Установить рабочее напряжение: нажать кнопку  отрегулировать рабочее напряжение, контролируя его значение и частоту на экране БУ	
6	Измерить усредненные параметры объекта C и tgδ: нажать кнопку  по окончании измерения на экране БУ появятся параметры объекта.	 Номер измерения будет меняться синхронно с прохождением каждого последующего измерения из запущенной серии. 

Продолжение таблицы 3.6

1	2	3
7	Отобразить статистические характеристики проведенной серии измерений, для чего нажать кнопку Для возврата в предыдущее окно нажать кнопку . На экране появятся значения среднеквадратических отклонений емкости СКО(C), в %, и тангенса СКО(tgδ).	СКО(C)% 2,4 e-04 СКО(tgδ) 1,1e-06
8	Для проведения повторных измерений параметров C и tgδ этого же объекта, повторить п.п. 5-6 данной таблицы.	
9	Закончить измерения, для чего на БУ нажать кнопку	17:22 15/04/08 C, tgδ вкл
10	Выключить режим накопления, если последующие измерения будут выполняться без накопления: Войти в меню режимов и выбрать режим накопления: нажать кнопку . Используя кнопки и установить курсор на строку "Накопление". нажать кнопку , а затем	Ввод C0 Накопление < Накопление N= 05 выкл
11	Для возврата в основное окно на БУ нажать кнопку	17:22 15/04/08 C, tgδ вкл

Измерение C и tgδ объекта при использовании внешнего эталонного конденсатора. Подключение оборудования для проведения измерений:

- 1) Подготовить Мост к работе в соответствии с разделом 2.4.

2) Собрать схему подключения оборудования для проведения измерений C и $tg\delta$ с помощью Моста по "прямой" (нормальной) или "инверсной" (перевернутой) схемам в соответствии с рисунком 3.8, а, б.

ВНИМАНИЕ! При измерении C и $tg\delta$ высоковольтного вывода модуля измерения $R11$ должен быть отключен от измерительной схемы! Невыполнение этого требования может привести к выходу из строя моста!

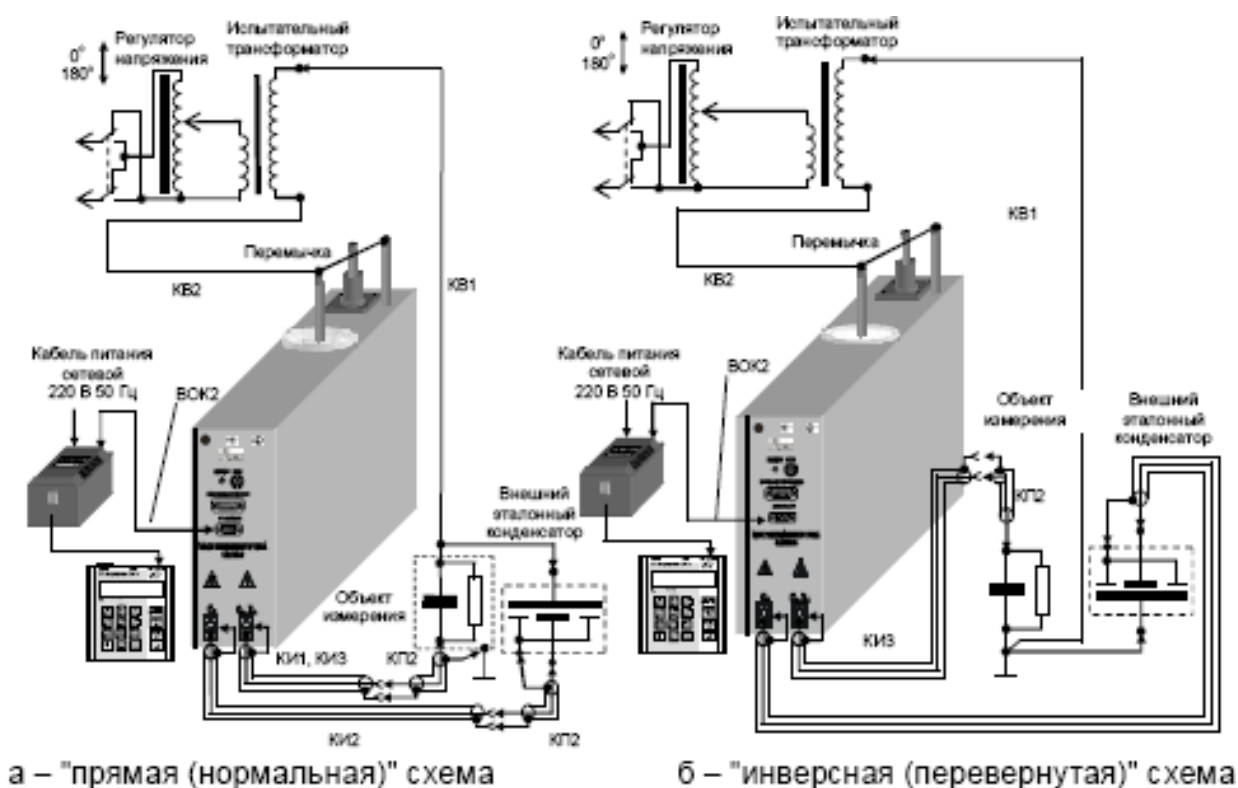


Рисунок 3.8 – Схема включения моста при использовании внешнего эталонного конденсатора

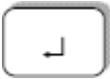
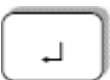
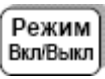
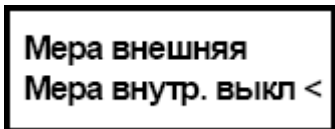
При проведении измерений по "перевернутой" схеме для подключения внешнего эталонного конденсатора рекомендуется использовать кабели из комплекта моста, а также кабели собственного изготовления. На рисунке 3.8 кабели собственного изготовления не поименованы. При этом внешняя изоляция измерительного экранированного кабеля собственного изготовления должна быть рассчитана на рабочее напряжение.

Соединить в/в вывод встроенного эталонного конденсатора с корпусным зажимом моста с помощью перемычки, входящей в комплект моста.

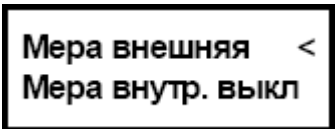
При измерениях по "перевернутой" схеме установить мост и эталонный конденсатор на изолирующие подставки, причем подставки должны быть рассчитаны на рабочее напряжение. Включить мост, выполнив указания раздела 2.4

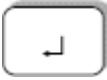
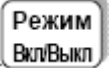
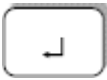
При наличии в составе измерительной схемы коммутатора СА7161 это требование выполняется автоматически.

Таблица 3.9 – Ввод параметров внешнего эталонного конденсатора

№ п/п	Действия	Вид экрана БУ
1	2	3
1	Войти в меню режимов и установить режим ввода параметров эталонного конденсатора C_0: нажать кнопку  Используя кнопки  и  установить курсор на строку "Ввод C_0"; нажать кнопку .	
2	Отключить режим встроенного эталонного конденсатора, для чего: Используя кнопки  и  установить курсор на строку "Мера внутр. вкл"; нажать кнопку .	

Продолжение таблицы 3.9

1	2	3
3	Ввести паспортные параметры внешнего эталонного конденсатора используя кнопки установить курсор на строку "Мера внешняя";	

	нажать кнопку  перемещение курсора знакоместа: по строкам –  + . по знакоместам –  +  и  + . ввод значений: ВВОД 0–9 –  . ввод "запятой" – . -ВВОД "-" –  + . -ввод "е" –  + . удаление предыдущего символа – .	
4	Для возврата в основное окно на БУ нажать кнопку 	17:22 C, tgδ 15/04/08 вкл 

Измерение C и $tg\delta$ при использовании ИПРН. ИПРН предназначен для формирования рабочего напряжения при измерении тангенса угла потерь и емкости путем преобразования напряжения сети 220 В 50 Гц в напряжение от 1 до 10 кВ. Также ИПРН выполняет поворот фазы рабочего напряжения на 180° при реализации метода "двух отсчетов" (режим смены фаз).

Управление работой ИПРН осуществляется при помощи БУ Моста, что позволяет полностью автоматизировать процесс измерения тангенса угла потерь и емкости.

ИПРН может использоваться только в режиме измерений при использовании встроенного эталонного конденсатора.

Общий вид ИПРН показан на рисунке 3.9

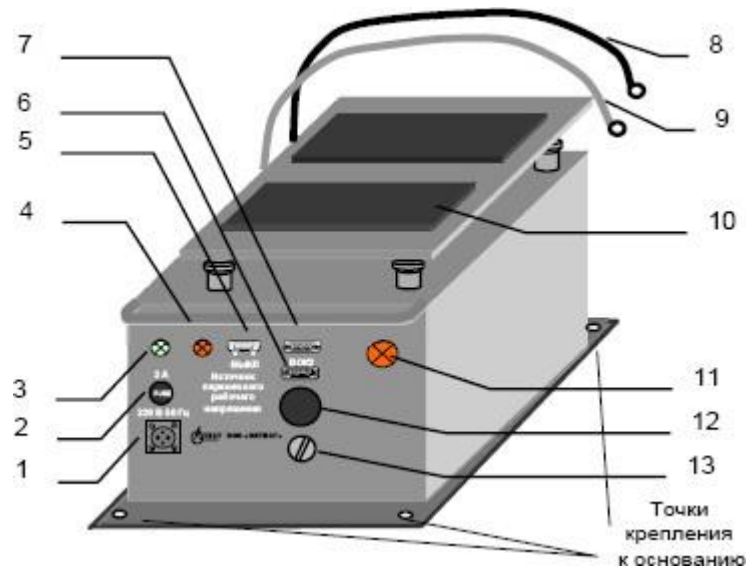


Рисунок 3.9 – Внешний вид ИПРН

На рисунке 3.9 приняты следующие обозначения: 1 – разъем для подключения кабеля питания ИПРН; 2 – предохранитель 2 А; 3 – индикатор "СЕТЬ" (включение питания ИПРН); 4 – индикатор "ОШИБКА" (загорается при неисправном предохранителе 2 А); 5 – выключатель питания ИПРН; 6 – разъем для подключения кабеля волоконно-оптического ВОК1, идущего от Блока измерительного; 7 – разъем для подключения кабеля волоконно-оптического ВОК2, идущего от ЗУ; 8 – кабель для подключения к корпусному зажиму Блока измерительного; 9 – кабель для подключения к высоковольтному выводу встроенного эталонного конденсатора Блока измерительного; 10 – место для установки Моста в сумке укладочной; 11 – индикатор включения рабочего напряжения; 12 – устройство для подачи звукового сигнала при включении/выключении рабочего напряжения; 13 – зажим защитного заземления

Подключение оборудования и включение ИПРН.

Внимание! Подключение ИПРН выполнять только при отключенном кабеле питания ИПРН от сети 220 В 50 Гц!

Собрать схему, приведенную на рисунке 3.10.

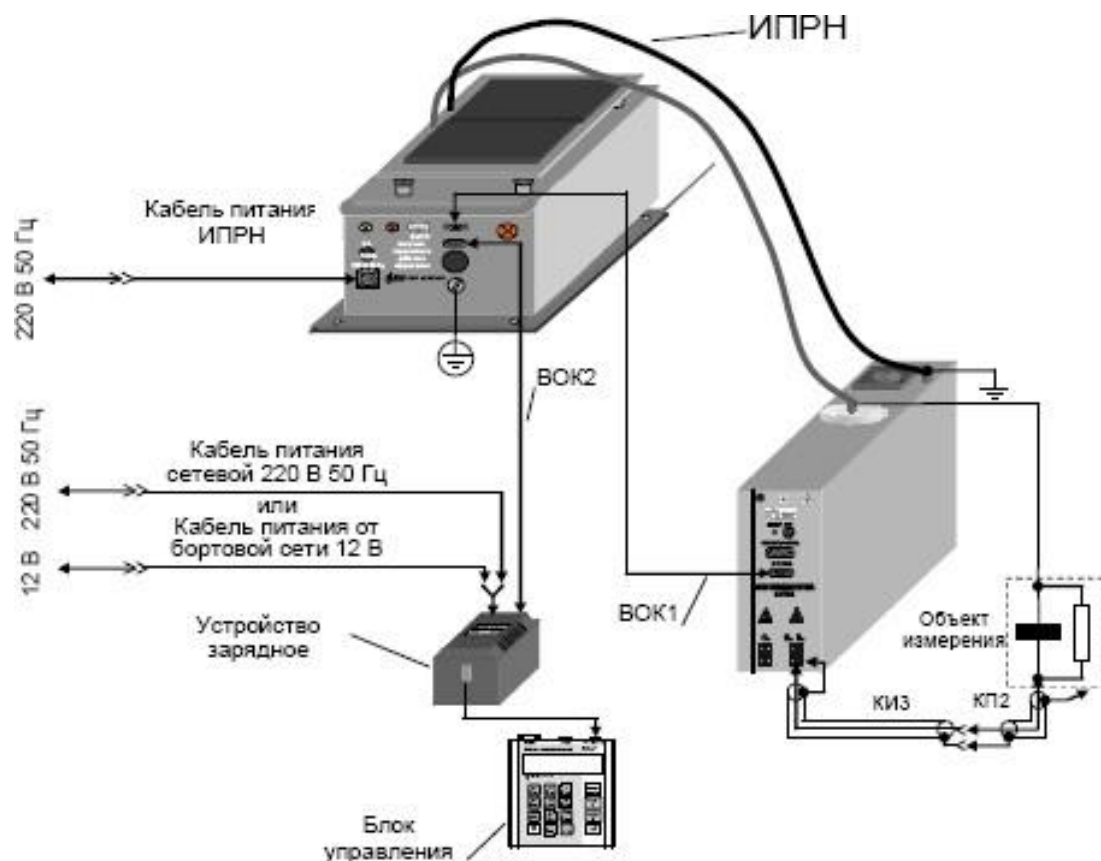


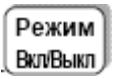
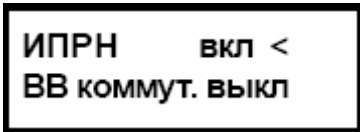
Рисунок 3.10 – Схема подключения ИРПН к мосту СА-7100-З

Включить Мост и установить режим измерения C и $tg\delta$ в соответствии с разделом 2.5. Подключить кабель питания ИРПН к сети 220 В 50 Гц.

Измерения рекомендуется проводить в режиме накопления результатов при числе усредняемых значений $N = 5$.

Таблица 3.10 – Включение ИРПН

№ п/п	Действия	Вид экрана БУ
1	Войти в меню режимов и установить режим ввода параметров эталонного конденсатора C_0: нажать кнопку Используя кнопки и , установить курсор на строку "ИРПН"	

	ВЫКЛ".	
2	Включить ИПРН, для чего нажать кнопку  .	

Измерение R объекта.

В этом режиме могут быть измерены:

1. сопротивление изоляции постоянному току R ;

2 сопротивление изоляции постоянному току R_{T1} , измеренное через время $T1$ после подачи постоянного напряжения U , и сопротивление изоляции постоянному току R_{T2} , измеренное через время $T2$ после подачи постоянного напряжения U .

По умолчанию $T1=15$ сек, $T2=60$ сек. Значения $T1$ и $T2$ могут быть установлены пользователем в диапазоне от 15 до 600 с, причем $T2$ должно быть больше $T1$.

По результатам измерений автоматически рассчитывается коэффициент абсорбции K_a

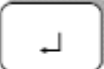
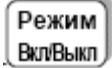
Подключение оборудования для проведения измерения R .
Подготовить мост к работе в соответствии с разделом 2.4.

Внимание! В условиях большой напряженности электромагнитного поля вывод кабеля высоковольтного (КВ1), который подключается к объекту измерения, должен быть во время подключения соединен с защитным заземлением!

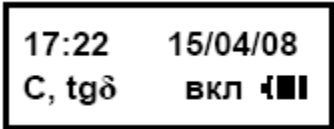
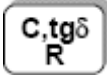
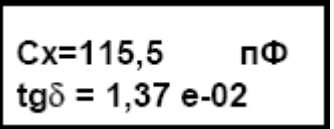
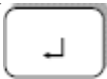
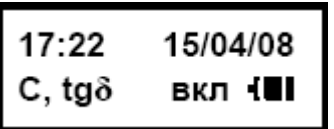
Собрать схему подключения оборудования для проведения измерения R с помощью моста в соответствии с рисунком 3.11.

Таблица 3.11 – Установка рабочего напряжения с помощью ИПРН

№ п/п	Действия	Вид экрана БУ
1	2	3
1	Выбрать значение рабочего напряжения, при котором будет выполняться измерение C и	

	<i>tgδ</i>. По умолчанию после включения ИПРН устанавливается значение рабочего напряжения равное 1 кВ.	
2	Для установки другого значения необходимо: нажать кнопку  Используя кнопки  и  выбрать значение напряжения. Можно выбрать фиксированные значения напряжения или с помощью пункта меню "Другое" ввести любое значение напряжения в диапазоне от 1 до 10 кВ. Если выбран пункт меню "Другое", нажать кнопку  и с помощью кнопок   ввести необходимое значение напряжения, в вольтах: перемещение курсора знакоместа   и   удаление предыдущего символа 	1 кВ 3 кВ < 5 кВ 7 кВ < 10 кВ Другое Введите напр.: U = 10000 В

Продолжение таблицы 3.11

1	2	3
3	Для подтверждения выбора значения напряжения нажать кнопку 	
4	Измерить параметры объекта <i>C</i> и $tg\delta$: нажать кнопку 	 
5	По окончании измерения на экране БУ появятся параметры объекта.	
6	Для проведения повторных измерений параметров этого же объекта повторить п.4 данной таблицы.	
7	Для возврата в основное окно на БУ нажать кнопку 	

ВНИМАНИЕ! К высоковольтному выводу модуля измерения R должен быть подключен только объект измерения, как показано на рисунке 3.11. На этот вывод категорически запрещена подача переменного напряжения относительно корпуса прибора. Невыполнение этого требования приведет к выходу из строя моста!

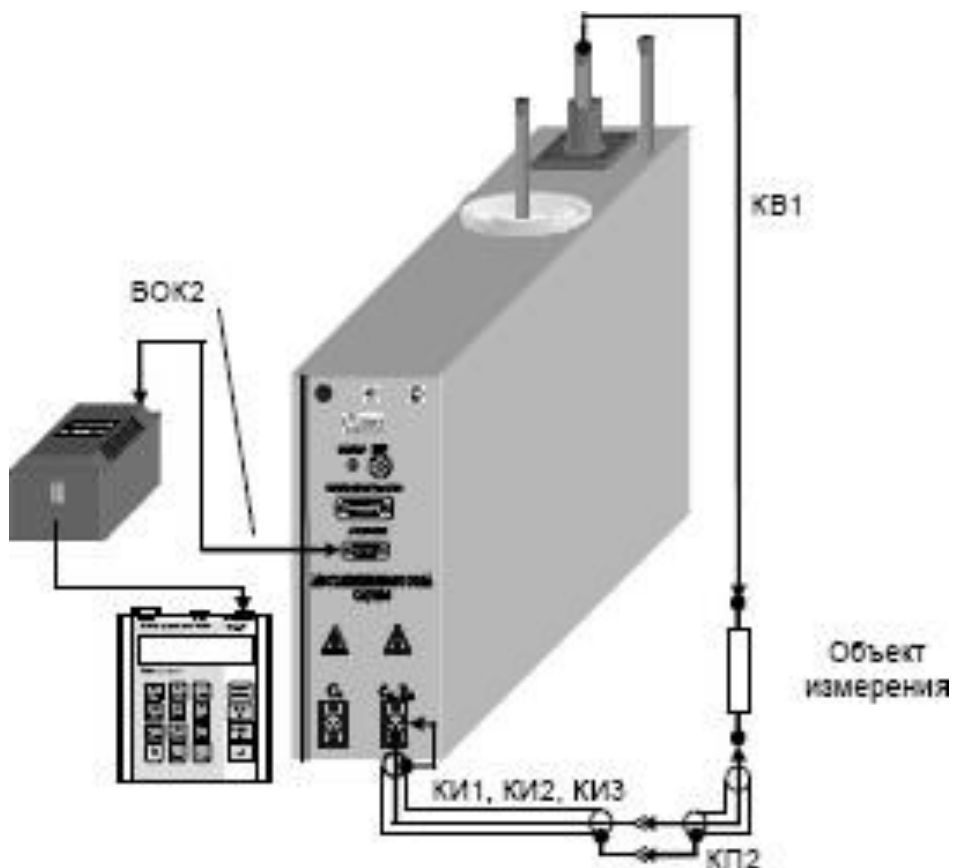


Рисунок 3.11 – Схема включения моста для измерения R .

2) Включить Мост, для чего нажать кнопку появится один из вариантов основного окна на экране БУ:

Для СА7100-1, СА7100-2, СА7100-3

17:22	15/04/08
C, $tg\delta$	вкл

Установлен
режим измерения C и $tg\delta$

Для СА7100-3

или

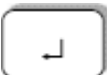
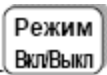
17:22	15/04/08
R	вкл

Установлен
режим измерения R

Если в мосту СА7100-3 режим измерения R не установлен, то установить его, для чего нажать +

Таблица 3.12 – Измерения сопротивления объекта

№ п/п	Действия	Вид экрана БУ
----------	----------	---------------

1	2	3
1	Выбрать значение напряжение U, при котором будет произведено измерение R. По умолчанию, после включения Моста устанавливается значение 2500 В. Для выбора другого значения необходимо: Войти в режим выбора значения напряжения, при котором будет произведено измерение R, для чего нажать кнопку ; Используя кнопки  и  установить выбранное значение напряжения.	
2	Можно выбрать фиксированные значения напряжения или с помощью пункта меню "Другое" ввести любое значение напряжения в диапазоне от 100 до 2500 В. Если выбран пункт меню "Другое", нажать кнопку  и с помощью кнопок  -  ввести необходимое значение напряжения, в вольтах: перемещение курсора знакоместа -  +  и  +  удаление предыдущего символа 	 

Продолжение таблицы 3.12

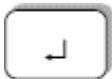
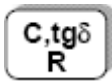
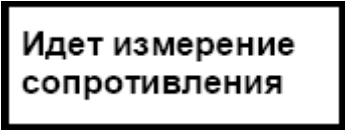
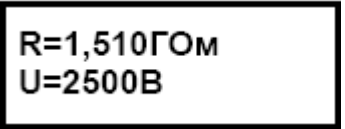
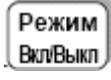
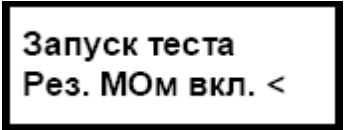
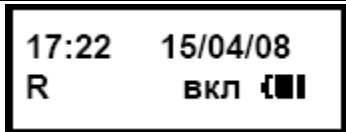
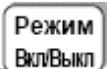
1	2	3
3	Отсоединить корпусной зажим Блока измерительного и в/в вывод эталонного конденсатора от защитного заземления.	
4	Для установки напряжения нажать 	
5	Измерить R , для чего нажать кнопку 	 
6	Результат измерения R можно отобразить в мегаомах, для чего: нажать кнопку  Используя кнопки  и  установить курсор на строку "Рез. в МОм выкл"; нажать кнопку 	 
7	Для возврата в основное окно нажать 	

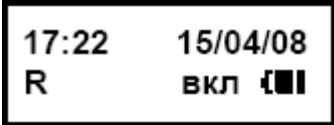
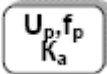
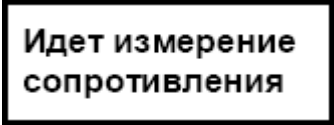
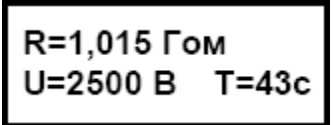
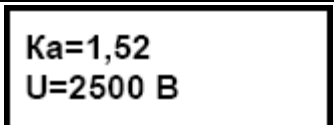
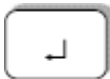
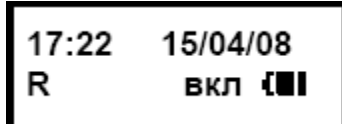
Таблица 3.13 – Измерение R с расчетом коэффициента абсорбции K_a

№ п/п	Действия	Вид экрана БУ
1	2	3
1	Установить напряжение, при котором будет произведено измерение R в соответствии с п.1 таблицы 3.12.	

Продолжение таблицы 3.13

1	2	3
2	Войти в меню режимов и выбрать режим выбора времени T1 и T2 измерения R: нажать кнопку  Используя кнопки  и  установить курсор на строку "Выбор T1, T2"; нажать кнопку 	Выбор T1, T2 < Выбор U
3	Установить отсчеты времени T1 и T2 измерения R, для чего: используя кнопки  и  установить курсор на нужный вариант; нажать кнопку  Можно выбрать фиксированные значения отсчетов времени или с помощью пункта меню "Другое" ввести любое значение в диапазоне от 15 до 600с, причем T2 должно быть больше T1. Если выбран пункт меню "Другое". нажать кнопку  перемещение курсора знакоместа: по строкам –  +  по знакоместам –  +  и  +  ввод значений: ВВОД 0–9 –   удаление предыдущего символа – 	T1=15с, T2=60с < T1=30с, T2=60с T1=60с, T2=600с < Другое T1=60 с < T2=600с

Продолжение таблицы 3.13

4	Для ввода заданных значений J нажать кнопку 	
5	Отсоединить корпусной зажим Блока измерительного и высоковольтный вывод эталонного конденсатора от защитного заземления.	
6	Измерить значения R_{T1} , R_{T2} и K_a , для чего нажать 	 
№ п/п	Действия	Вид экрана БУ
7	Просмотреть результаты измерения используя кнопки  и 	
8	Для возврата в основное окно нажать 	

Автоматическое коммутирование режимов измерений " C , $tg\delta$ " $\leftrightarrow$ " R " в измерительной цепи моста и схем измерений (Коммутатор СА7161).

В условиях большой напряженности электромагнитного поля для обеспечения устойчивой работы Моста корпусной зажим Блока измерительного во время коммутации должен быть соединен с защитным заземлением!

Коммутатор СА7161 предназначен для автоматического переключения вариантов измерительных схем ("прямая" - "инверсная") мостов СА7100-2 и СА7100-3, а также переключения режимов измерений " C , $tg\delta$ " $\leftrightarrow$ " R " Моста СА7100-3, установленных в передвижной лаборатории. Коммутатор СА7161 может использоваться только в режиме измерений при

использовании встроенного конденсатора.

Обязательным условием применения Коммутатора СА7161 является использование в измерительной цепи испытательного трансформатора, допускающего заземление любого из выводов высоковольтной обмотки (например, НОМ-10).

В Коммутатор СА7161 встроен датчик температуры, который обеспечивает измерение температуры окружающего воздуха при работе Коммутатора совместно с мостом СА7100-3. Рабочее напряжение Коммутатора СА7161 - не более 10 кВ. В состав Коммутатора СА7161, структурная схема которого показана на рисунке 3.12, входят: ключ К1 для переключения режимов измерения " $C, tg\delta$ " $\leftrightarrow$ " R " моста; сдвоенный ключ К2, обеспечивающий коммутацию схем.

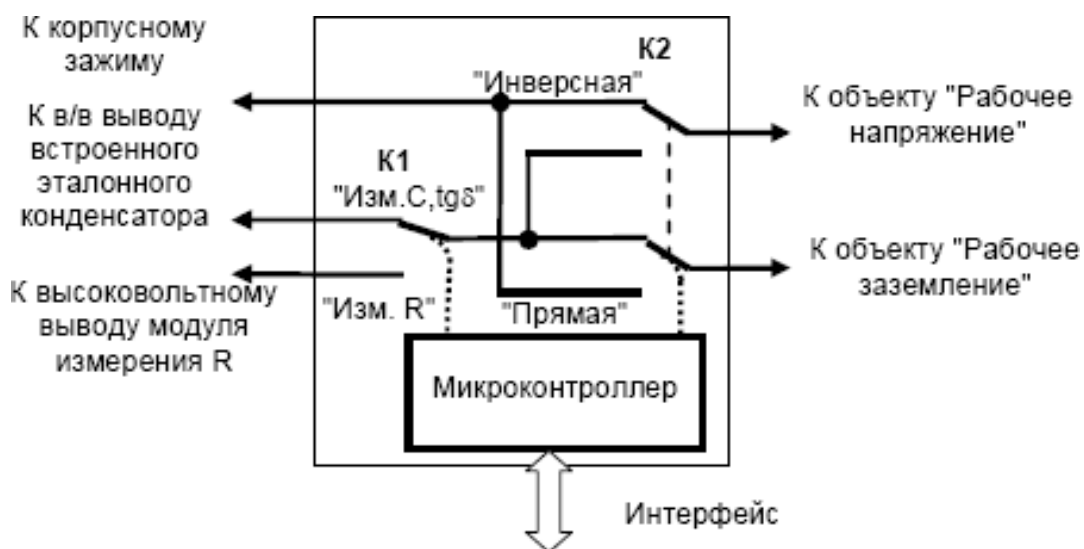


Рисунок 3.12 – Схема высоковольтного коммутатора СА7161

Управление переключением осуществляется микроконтроллером по командам БУ Мостов СА7100-2 и СА7100-3. Связь Коммутатора СА7161 с БУ осуществляется через интерфейсный кабель, подключаемый к входу "Зарядное устройство" Блока измерительного Моста.

Подготовка к работе коммутатора СА7161. Подключить разъемы Коммутатора к соответствующим входам Блока измерительного (рисунок 3.14). Подключение Коммутатора выполнять при отключенном рабочем

напряжении и выключенном мосте. Установить Блок измерительный Моста и Коммутатор СА7161 на изолирующие подставки и подключить кабель высоковольтный (KB4) к высоковольтному разъему "Рабочее напряжение" коммутатора (5, рисунок 3.13), а кабель высоковольтный (KB5) к высоковольтному разъему. "Рабочее заземление" коммутатора (6, рисунок 3.13.) к рабочему заземлению измерительной схемы. первым использованием. Коммутатор необходимо включить.

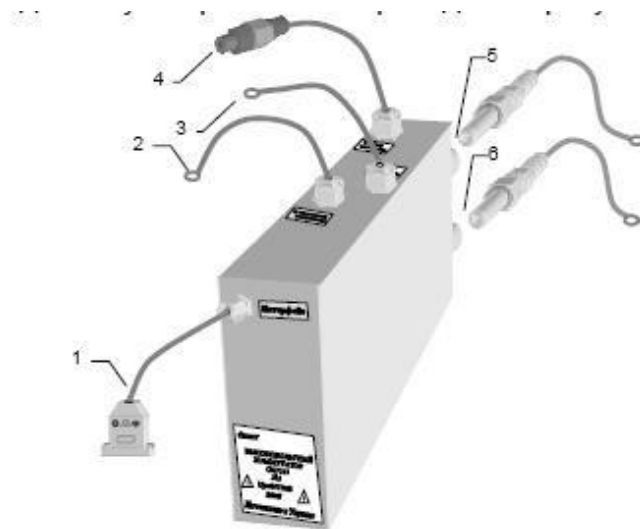


Рисунок 3.13 – Внешний вид коомутатора СА7161

На рисунке 3.13 приняты следующие обозначения: 1 – кабель интерфейсный с разъемом, подключаемым к входу "Зарядное устройство" Блока измерительного Моста; 2 – кабель с кольцевым наконечником, подключаемый к высоковольтному выводу встроенного эталонного конденсатора Блока измерительного Моста; 3 – кабель с кольцевым наконечником, подключаемым к корпусному зажиму Блока измерительного Моста; 4 – кабель с разъемом, подключаемым к высоковольтному выводу модуля измерения R Блока измерительного Моста; 5 – высоковольтный разъем "Рабочее напряжение" и кабель высоковольтный (KB4) с кольцевым наконечником; 6 – высоковольтный разъем "Рабочее заземление" и кабель высоковольтный (KB5) с кольцевым наконечником

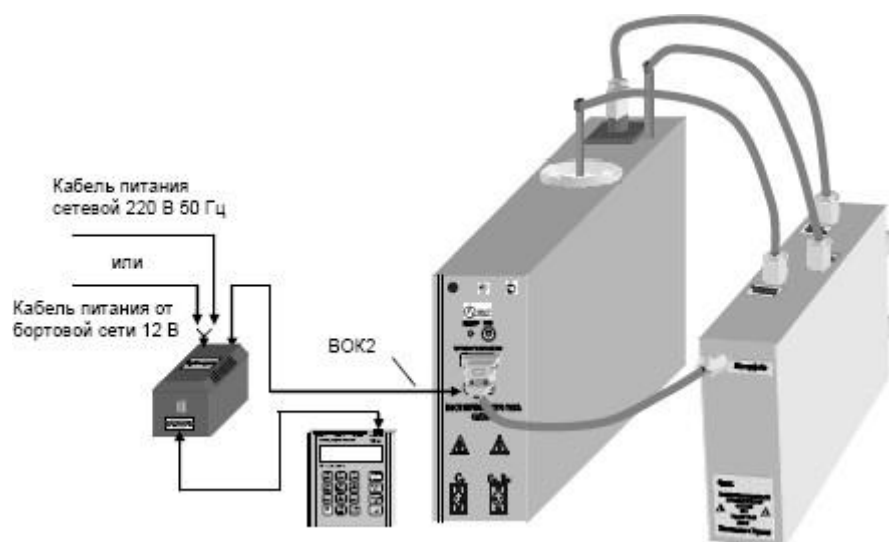
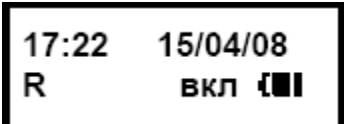
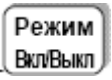
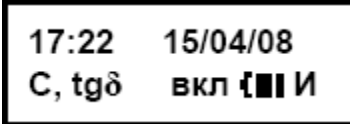
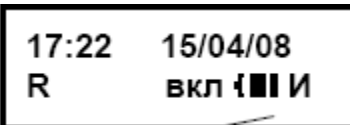


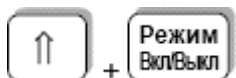
Рисунок 3.14 – Схема соединения моста и коммутатора СА7161

Таблица 3.14 – Включение Коммутатора СА7161

№ п/п	Действия	Вид экрана БУ
1	2	3
1	Включить питание Моста в соответствии с разделом 2.4.	17:22 15/04/08 C, tgδ выкл [■] 17:22 15/04/08 R выкл [■]
2	Войти в меню режимов и выбрать режим включения Коммутатора, для чего на клавиатуре БУ: нажать кнопку Используя кнопки и установить курсор на строку "ВВ. комут. вкл"	ИПРН выкл ВВ коммут.вкл< ВВ коммут.вкл<
Продолжение таблицы 3.14		
1	2	3
3	Включить Коммутатор, для чего нажать кнопку.	ИПРН выкл ВВ коммут.вкл< ВВ коммут.вкл<

4	Для возврата в основное окно нажать 	
		
5	Включить Мост, для чего нажать кнопку  Дальнейшие действия выполнять в соответствии с п.2.4. При включении Моста устанавливается "инверсная" схема измерений.	
		

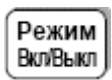
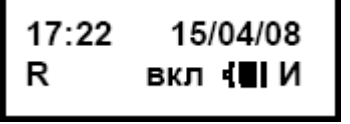
Коммутация измерительной схемы моста СА7100-3 при измерениях C , $tg\delta$ или R выполняется коммутатором СА7161 автоматически при переключении режимов измерений " C , $tg\delta$ " $\leftrightarrow$ " R " нажатием кнопок



При повторном использовании мостов СА7100-2 и СА7100-3 установки предыдущего сеанса работы сохраняются и, соответственно, коммутатор остается включенным.

Переключение схемы измерения. Переключение схемы измерения мостов СА7100-2 и СА7100-3 должно производиться при отключенном рабочем напряжении!

Таблица 3.15 – Переключение схем измерений

№ п/п	Действия	Вид экрана БУ
1	Включить питание Моста в соответствии с п.2.4, а затем включить мост, для чего нажать  "П"- "прямая" схема измерений;	
		

	"И" - "инверсная" схема измерений.	
2	Включить "прямую" схему измерений, для чего нажать кнопку , находясь в основном окне.	17:22 15/04/08 C, tgδ вкл П 17:22 15/04/08 R вкл П
3	Включить "инверсную" схему измерений, для чего нажать кнопку , находясь в основном окне.	17:22 15/04/08 C, tgδ вкл И 17:22 15/04/08 R вкл И

Указания по технике безопасности

1. К работе на стендах допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности при выполнении работ в лабораториях кафедры «Автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения» и ознакомившиеся с настоящими методическими указаниями. Прохождение инструктажа по технике безопасности фиксируется преподавателем в специальном журнале.

2. Лабораторная работа должна выполняться не менее чем двумя студентами.

3. Перед началом работы необходимо убедиться в надежном заземлении корпуса аппарата.

4. Замену образца диэлектрика производят после отключения аппарата сетевым выключателем.

5. По окончании испытания или при перерыве в работе установку отключают от напряжения питания.

Задания

1. Измерить значения $tg\delta$ предложенных образцов электротехнических материалов при различных напряжениях, задаваемых

преподавателем, результаты занести в таблицу 3.16. Измерения произвести при нормальной схеме включения моста. Записать значения C_x и $\operatorname{tg} \delta$.

Таблица 3.16 – Результаты измерения емкости и угла диэлектрических потерь изоляции

Наименование изделия, схема измерения	U, кВ	C_x , пФ	$\operatorname{tg} \delta$

2. Переключить мост в режим измерения сопротивления, измерить значение сопротивления и коэффициента абсорбции электротехнических изделий при различных значениях постоянного измерительного напряжения, результаты занести в таблицу 3.17

Таблица 3.17 – Результаты измерения сопротивления и коэффициента абсорбции изоляции

Наименование изделия, схема включения	U, кВ	$R_{из}$, ГОм	R_{T1}		$K_{абс}$

3. На основании полученных результатов построить график зависимости $\operatorname{tg} \delta$ от приложенного напряжения. Сделать вывод о проделанной работе.

Содержание отчета

Каждый студент, выполнивший лабораторную работу, должен оформить отчет и предоставить его преподавателю.

Отчет должен содержать:

1. Название и цель работы.
2. Таблицы экспериментальных и расчетных данных.
3. Графики зависимостей, полученных в результате эксперимента и расчета.
4. Выводы по результатам работы, в которых должна быть дана оценка исследуемых явлений, подтверждение в выполнении законов, объяснение характера кривых.

Отчет должен иметь титульный лист с указанием Ф.И.О. студента, номера группы и даты выполнения работы.

Контрольные вопросы

1. Изоляция высоковольтных вводов и их виды, области применения.
2. Изоляция высоковольтных выключателей и их типы.
3. Изоляция трансформаторов напряжения и трансформаторов тока.
4. Изоляция конденсаторов.
5. Изоляция вращающихся машин.
6. Методы контроля изоляции электроэнергетического оборудования
7. Тангенс угла диэлектрических потерь и методы его измерения
8. Работа с мостом СА7100-3 при измерении тангенса угла диэлектрических потерь
9. Прямая и инверсная схема измерения тангенса угла диэлектрических потерь. Области применения, особенности.
10. Оборудование рабочего места при проведении профилактических испытаний изоляции высоковольтного оборудования.

11. Техника безопасности при проведении профилактических испытаний изоляции высоковольтного оборудования.
12. Методика проведения профилактических испытаний изоляции высоковольтного оборудования.
13. Допустимые значения тангенса угла диэлектрических потерь электроэнергетического оборудования.
14. Схемы подключения оборудования при изменении тангенса угла диэлектрических потерь электрооборудования на примере однофазного трансформатора напряжения.

Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме

Основная литература

1. Электроснабжение сельского хозяйства: учебник / т. Б. Лещинская, и. В. Наумов ; [ред. Г. В. Лихачёва]. - М. : Колос, 2008. - 655 с. – ISBN 978-5-9532-0560-3.
2. Расчет электрических полей устройств высокого напряжения : учеб. пособие / И. П. Белоедова, Ю. В. Елисеев, Е. С. Колечицкий и др. ; ред. Е. С. Колечицкий. - М.: ИД МЭИ, 2008. - 248 с. – ISBN 978-5-383-00072-4

Дополнительная литература

3. Техника высоких напряжений : учебник для вузов / под ред. Д. В. Разевига. – 2-е изд., пер. и доп. – М. : Энергия, 1976. – 488 с.
4. Техника высоких напряжений(изоляция и перенапряжение в электрических установках) : учебник для техникумов / В. П. Ларионов, В. В. Базуткин, Ю. Г. Сергеев ; под ред. В. П. Ларионова. – М. : Энергоиздат, 1982. – 296 с.

Лабораторная работа №4.

Моделирование распространения волны перенапряжений по линии электропередач

Цель: Исследование процесса распространения волны перенапряжений по линии электропередач и влияния параметров линии и ее нагрузки на напряжение в конце линии.

Теоретическая часть

При эксплуатации электроэнергетической системы в линии часто попадают молнии, которые становятся источником волн перенапряжений в энергосистеме. Распространение волн перенапряжений вдоль проводов описывается уравнениями длинных линий. В то же время расчет аналитическими методами переходных процессов в линиях с распределёнными параметрами является затруднительным. Перенапряжение в месте его возникновения можно рассматриваться как источник, поэтому численными методами возможно получить значение напряжения в любой момент и в любой точке линии.

В данной работе используется частотный метода расчета переходных процессов, при этом все параметры исследуемой системы должны быть линейными для применения метода наложения. Параметры пассивных элементов линии, нагрузки и источника питания R , L , C должны быть постоянными, и, кроме того, интегрируемы на необходимом временном диапазоне функции $f_{\text{и}}(t)$ источников токов и напряжений, для случая математического ожидания $|f_{\text{и}}(t)| < |M| \cdot e^{-|a|t}$ при времени $t > 0$. Поэтому спектральные функции источников токов и напряжения вычисляются с помощью прямого преобразования Фурье

$$F_H(j\omega) = \int_0^{\infty} f_H(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \quad (1)$$

При этом спектральные функции $F(x, j\omega)$ напряжений и токов в разных точках линии, которые зависят от расстояния от начала линии x и угловой частоты ω , находятся с использованием обычных уравнений длинной линии. После этого функции напряжений и токов на линии $f(x, t)$ рассчитываются с использованием инверсного преобразования Фурье:

$$f(x, t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \operatorname{Re} [F(x, j\omega)] \cos \omega t \cdot d\omega \quad (4.2)$$

Функции $f_H(t)$ источника ЭДС не является абсолютно интегрируемой, поэтому данные выражения можно записать как:

$$f_H(t) = \begin{cases} Um \cdot (e^{\alpha t} + e^{\beta t}) & \text{при } 0 < t < \tau \\ 0 & \text{при } t > \tau \end{cases} \quad (4.3)$$

Где $\tau = n \cdot t_0$ – длительность импульса; $t_0 = \frac{l}{V_0}$ – период времени, за который токи и напряжения распространяются вдоль линии длиной l ; α и β – коэффициенты, описывающие воздействующий импульс, Um – амплитуда импульса. V_0 – фазовая скорость распространения волны при угловой частоте ω_0 , n – количество походов волны перенапряжений по линии длиной l .

Поскольку для преобразования Фурье (4.1) необходимо $f_H(t) = 0$ при времени $t < 0$, то надо установить нулевые начальные условия. При этом напряжения и токи определяются как сумма напряжений и токов в функции времени, найденных из расчета установившегося режима линии до воздействия импульса перенапряжений, и функций времени тех же величин, рассчитанных частотным методом для линии после воздействия

импульса, причем до воздействия импульса на линии были нулевые начальные условия.

В первом приближении можно считать, что линия работает в установившемся режиме, при этом нагрузка линии является симметричной. Поэтому рассмотрим одну фазу линии при неизменных параметрах линии, которые изображены на рисунке 4.1, где фазная ЭДС источника равна

$$e(t) = Um \cdot (e^{\alpha t} + e^{\beta t}) \quad (4.4)$$

Предположим, что до коммутации в источнике, линии и нагрузке был

установившийся режим.

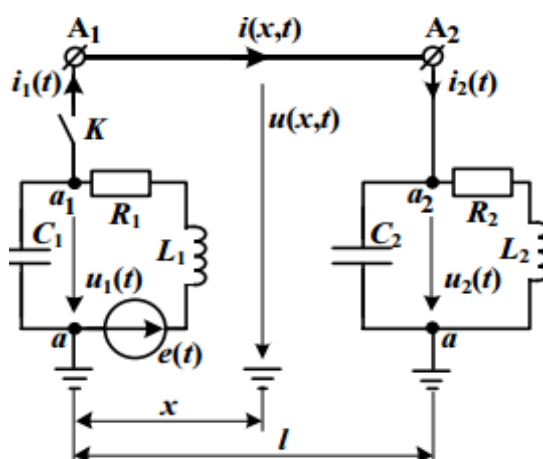


Рисунок 4.1 – Расчетная схема линии (А): R_1 , L_1 , C_1 и R_2 , L_2 , C_2 – параметры источника импульса и нагрузки, соответственно; $u_1(t)$, $u(x,t)$, $u_2(t)$ – напряжения; $i_1(t)$, $i(x,t)$, $i_2(t)$ – токи; l и x – длина линии и расстояние от начала линии до точки рассмотрения.

В формулах (4.1 – 4.2) угловая частота ω изменяется от 0 до ∞ , а время t – от 0 до τ . Поэтому необходимо принять некоторые ограничения: число расчетных интервалов $N=100$; максимальное изменение угловой частоты, описываемое индексом $k = 1, 2 \dots 100$, где $k \neq 0$; шаг изменения

времени, $h_t = t_0/N$; шаг изменения угловой частоты $h_\omega = 2\pi/(\tau N)$; максимальное изменение времени, описываемое индексом $q=0,1 \dots nN$; дискретное значение времени $t_q = q \cdot h_t$; дискретное значение угловой частоты $\omega_k = k \cdot h_\omega$.

При этом спектральная функция источника определяется как:

$$F u_k = \sum_q \left\{ \left| \frac{f u_q}{j \omega_k} \right| \left[e^{-j \omega_k t_q} - e^{-j \omega_k (t_q + h_t)} \right] \right\} \quad (4.5)$$

где $f u_q = U m \cdot (e^{\alpha t_q} + e^{\beta t_q})$ – числовые значения функции $f u(t)$ в моменты времени t_q

Длинная линия характеризуется комплексными, зависящими от угловой частоты ω_k , вторичными параметрами: волновое сопротивление

$$Z_{B_k} = \sqrt{\frac{R_0 + j \omega_k \cdot L_0}{G_0 + j \omega_k \cdot C_0}} \quad (4.6)$$

постоянная распространения

$$\gamma_k = \sqrt{(R_0 + j \omega_k \cdot L_0) \cdot (G_0 + j \omega_k \cdot C_0)} = \alpha_k + j \beta_k \quad (4.7)$$

$$V_k = \frac{\omega_k}{\beta_k} \quad (4.8)$$

Для указанной на рисунке 4.2 схемы соединения источника и нагрузки можно записать эквивалентные комплексные сопротивления источника

$$Z_{U_k} = \frac{R_1 + j \omega_k \cdot L_1}{1 - \omega_k^2 \cdot L_1 \cdot C_1 + j \omega_k \cdot R_1 \cdot C_1} \quad (4.9)$$

И нагрузки

$$Z_{H_k} = \frac{R_2 + j \omega_k \cdot L_2}{1 - \omega_k^2 \cdot L_2 \cdot C_2 + j \omega_k \cdot R_2 \cdot C_2} \quad (4.10)$$

Затем на основании уравнений длинной линии определяем входное сопротивление линии (рисунок 4.1) для токи схемы A_1 с учетом источника импульса и нагрузки линии (4.6) и (4.10)

$$Z_{1k} = Z_{B_k} \cdot \frac{Z_{B_k} \cdot sh(\gamma_k \cdot l) + Z_{H_k} \cdot ch(\gamma_k \cdot l)}{Z_{B_k} \cdot ch(\gamma_k \cdot l) + Z_{H_k} \cdot sh(\gamma_k \cdot l)} \quad (4.11)$$

Проведем расчет переходного процесса в линии при воздействии импульса перенапряжения (рисунок 4.1) с использованием приведения этой схемы к нулевым начальным условиям.

Ключ К замыкается, что соответствует возникновению перенапряжения,

С учетом (4.5) записываем спектральную функцию воздействующего напряжения

$$U_{Kk} = \sum_q \left\{ \left| \frac{u_{Kq}}{j\omega_k} \right| \cdot \left[e^{-j\omega_k \cdot t_q} - e^{-j\omega_k \cdot (t_q + h_t)} \right] \right\} \quad (4.12)$$

Далее, после замыкания ключа К с использованием формул (4.6. 4.11, 4.12) запишем в точке то $x=0$ спектральную функцию тока в линии

$$I_{1k} = \frac{U_{Kk}}{Z_{U_k} + Z_{1k}} \quad (4.13)$$

и напряжения на линии

$$U_{1k} = U_{Kk} - Z_{U_k} \cdot I_{1k} \quad (4.14)$$

В точке, расположенной на расстоянии x от начала линии на основании уравнений длинной линии спектральные функции напряжения и тока для угловой частоты ω_k можно записать в виде:

$$\begin{cases} U_x = U_{1k} \cdot ch(\gamma_k \cdot x) - I_{1k} \cdot Z_{B_k} \cdot sh(\gamma_k \cdot x) \\ I_x = - \frac{U_{1k}}{Z_{B_k}} \cdot ch(\gamma_k \cdot x) + I_{1k} \cdot sh(\gamma_k \cdot x) \end{cases} \quad (4.15)$$

Согласно (4.2) и применяя выражение (4.15) определяем значения напряжения и тока в точке на расстоянии x от начала линии для каждого момента времени $t=t_q$:

(4.16)

Задания

Повторить опыты для различных сопротивлений нагрузки в линии:
 $R_2=10 \text{ Ом}$, $R_2=100 \text{ Ом}$, $R_2=100000 \text{ Ом}$.

[illegible]

700										
800										
900										
1000										

2. Построить графики распределения напряжения вдоль исследуемой линии для моментов времени 0, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 и 1000 мкс при сопротивлении нагрузки 100 Ом.

3. Определить максимальное значение напряжения в конце линии в зависимости от сопротивления в конце линии в момент $t=0$ и $t=1000$ мкс.

Содержание отчета

Каждый студент, выполнивший лабораторную работу, должен оформить отчет и предоставить его преподавателю.

Отчет должен содержать:

1. Название и цель работы.
2. Таблицы экспериментальных и расчетных данных.
3. Графики зависимостей, полученных в результате эксперимента и расчета.
4. Выводы по результатам работы, в которых должна быть дана оценка исследуемых явлений, подтверждение в выполнении законов, объяснение характера кривых.

Отчет должен иметь титульный лист с указанием Ф.И.О. студента, номера группы и даты выполнения работы.

Контрольные вопросы

1. Что означают понятия «длинная линия», «цепь с распределенными параметрами»?
2. Выведите телеграфные уравнения двухпроводной линии и покажите их решение для линии без потерь.

3. Покажите, как происходит падение волны перенапряжения на резистивную, емкостную и индуктивную нагрузки.

4. Представьте анализ процессов, происходящих в обмотке трансформатора при воздействии волны грозового перенапряжения.

Объясните причины емкостного эффекта, приводящего к повышению напряжения на конце ненагруженной линии электропередачи.

5. В чем причины смещения нейтрали в сети с компенсированной нейтралью?

6. Почему гашение электрической дуги приводит к перенапряжениям?

7. Каковы причины возникновения перенапряжений при коммутациях линий, конденсаторов, реакторов и трансформаторов?

8. Что называют координацией изоляции?

9. Каковы принципы защиты изоляции искровыми промежутками и роговыми разрядниками?

10. Каковы принципы защиты изоляции трубчатыми и вентильными разрядниками и ОПН?

11. Как выполняется защита от перенапряжений изоляции линий электропередачи?

12. Как выполняется защита от перенапряжений изоляции контактной сети?

13. Как выполняется защита от перенапряжений изоляции оборудования подстанций?

Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме

Основная литература

1. Электроснабжение сельского хозяйства: учебник / т. Б. Лещинская, и. В. Наумов ; [ред. Г. В. Лихачёва]. - М. : Колос, 2008. - 655 с. – ISBN 978-5-9532-0560-3.

2. Расчет электрических полей устройств высокого напряжения : учеб. пособие / И. П. Белоедова, Ю. В. Елисеев, Е. С. Колечицкий и др. ; ред. Е. С. Колечицкий. - М.: ИД МЭИ, 2008. - 248 с. – ISBN 978-5-383-00072-4

Дополнительная литература

3. Техника высоких напряжений : учебник для вузов / под ред. Д. В. Разевига. – 2-е изд., пер. и доп. – М. : Энергия, 1976. – 488 с.

4. Техника высоких напряжений(изоляция и перенапряжение в электрических установках) : учебник для техникумов / В. П. Ларионов, В. В. Базуткин, Ю. Г. Сергеев ; под ред. В. П. Ларионова. – М. : Энергоиздат, 1982. – 296 с.

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего профессионального образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Методические указания

по организации практической работы обучающихся
по дисциплине «Техника высоких напряжений» для студентов направления
подготовки /специальности
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
Направленность (профиль) Цифровые технологии в электроэнергетике

Ставрополь, 2025

Практическое занятие №1

Тема: Расчет пробивного напряжения газового промежутка

Цель работы: приобретение навыков расчета пробивного напряжения газовых промежутков с однородным и неоднородным полем

Знания и умения, приобретаемые студентом при выполнении практического занятия: порядок расчета пробивного напряжения воздушных промежутков, навык практического расчета электрической прочности воздушных промежутков с однородным и неоднородным полем.

В результате выполнения практического занятия у студента формируются компетенции ПК-3 (способностью принимать участие в проектировании объектов профессиональной деятельности в соответствии с техническим заданием и нормативно-технической документацией, соблюдая различные технические, энергоэффективные и экологические требования).

Актуальность практического занятия обусловлена необходимостью студентов обладать навыками расчета электрической прочности воздушных промежутков.

Теоретическая часть

В нормальных условиях, для которых принято атмосферное давление в 760 мм рт. ст. или 101300 Па, температура 293 К (20° С) и содержание влаги 11 г/м³, воздух, являющийся смесью электрически нейтральных газов, представляет собой диэлектрик с объемным сопротивлением, равным бесконечности.

Ток сквозной проводимости через такой диэлектрик практически невозможен. Идеальным диэлектриком мог бы оказаться абсолютный вакуум, однако даже при технически достижимом разрежении в 10⁻⁴ мм рт. ст. сохраняются ещё достаточно большое количество газовых молекул и условия для образования заряженных частиц.

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

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

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

Под электрической прочностью воздуха или газа понимают напряжение $U_{пр}$ или величину средней напряженности электрического поля $E_{пр}$ при которой происходит пробой. Наибольшее влияние на величину пробивной напряженности электрического поля оказывает форма электродов, так как она определяет собой степень равномерности электрического поля в момент приложения напряжения. С течением времени поле искажается за счет объемных зарядов — малоподвижных положительных ионов газа, поэтому пробой формируется не сразу, а ступенями. Из опытных характеристик рисунке 1, снятых при переменном токе на расстояниях 1 — 5 см между электродами различной формы, следует, что наибольшей прочностью обладает газовый промежуток между симметричными электродами шар — шар или плоскими электродами типа Роговского.

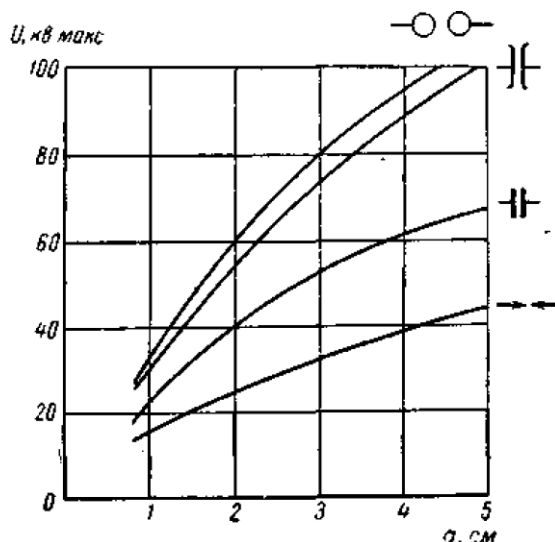


Рисунок 5.1 – Зависимость пробивного напряжения воздушного промежутка от формы электродов и расстояния между ними

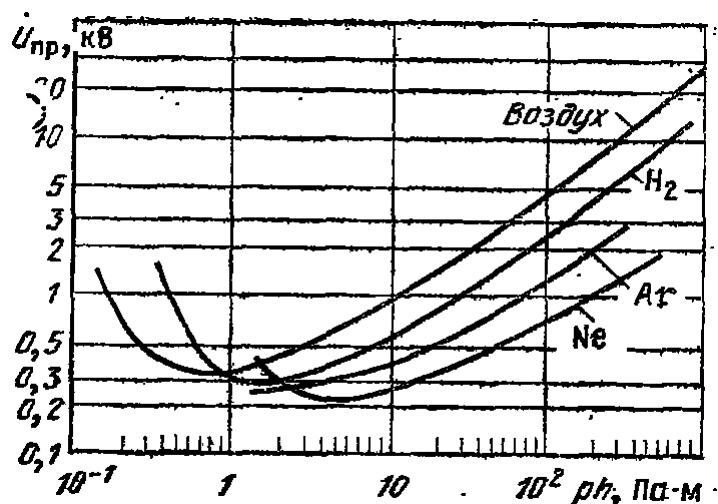


Рисунок 5.2 – Зависимость пробивных напряжений различных газов от произведения давления на расстояние между плоскопараллельными электродами (Закон пашена)

Газы применяются в качестве изолирующих сред при значениях ph , которые намного больше значений, соответствующих минимуму кривых Пашена, т. е. обычно расчеты ведутся с применением восходящей ветви экспериментальных кривых. При произведении ph более 1000 Па·см, при этом максимальное давление различно для различных газов, но как правило, составляет не более 1-2 Мпа. Для однородных электрических полей можно пользоваться расчетной формулой:

$$U_{пр} = a_0 \delta h + b_0 \sqrt{\delta h} \quad (5.1)$$

где a_0 и b_0 коэффициенты, зависящие от природы газа (таблица 1.1), h – расстояние между электродами, $\delta = (p/p_0)(T_0/T)$ - относительная плотность воздуха.

Таблица 5.1

Постоянные коэффициенты	Воздух	O ₂	N ₂	H ₂	Ar	He	Ne	SF ₆
a_0 , МВ/м	2,45	2,60	2,35	1,26	0,57	0,57	0,201	8,93
b_0 , В/м ^{1/2}	0,064	0,0635	0,0955	0,0437	0,226	0,0153	0,0157	0

Задания

1. Для измерения напряжения, близкого к 200 кВ, используются шаровые разрядники. Определить, исходя из величины допустимой погрешности измерения, наименьший и наибольший диаметры их сфер.

Решение.

Приняв за среднюю пробивную напряженность величину 30 кВ/см, определим необходимое расстояние между шарами, считая поле равномерным:

$$h \approx \frac{U_{\max}}{E_{np}} \approx 7 \text{ см} \quad (5.2)$$

Точность измерений сохраняется при соблюдении зависимости

$$0,54\sqrt{r} \leq h \leq 2r \quad (5.3)$$

откуда минимальный диаметр шаров $D=7$ см.

Для расчета максимального диаметра примем крайнее условие:

$$0,54\sqrt{r} = h; \quad r = \frac{h^2}{0,54^2} = 169 \quad (5.4)$$

откуда максимальный диаметр шаров будет $D = 338$ см.

2. Определить пробивные напряжения между двумя изолированными стержнями, удаленными друг от друга в воздухе -на расстояния 120, 220, 800 см. температура воздуха 30°C и давление 740 мм рт. ст.

Решение.

Определим относительную плотность воздуха для заданных условий:

$$\delta = (p / p_0)(T_0 / T) = 0,958 \quad (5.5)$$

По графику на рисунке 5.3 определим пробивное напряжение промежутка стержень-стержень для заданных расстояний:

Для расстояния 120 см:

$$U_{np} = U_{np0} \cdot \delta = 622.7 \quad (5.6)$$

Для расстояния 220 см:

$$U_{np} = U_{np0} \cdot \delta = 1198 \quad (5.7)$$

Для расстояния 800 см:

$$U_{np} = U_{np0} \cdot \delta = 2635 \quad (5.8)$$

где U_{np0} – пробивное напряжение при нормальных условиях, определенное из графика на рисунке 5.3 а.

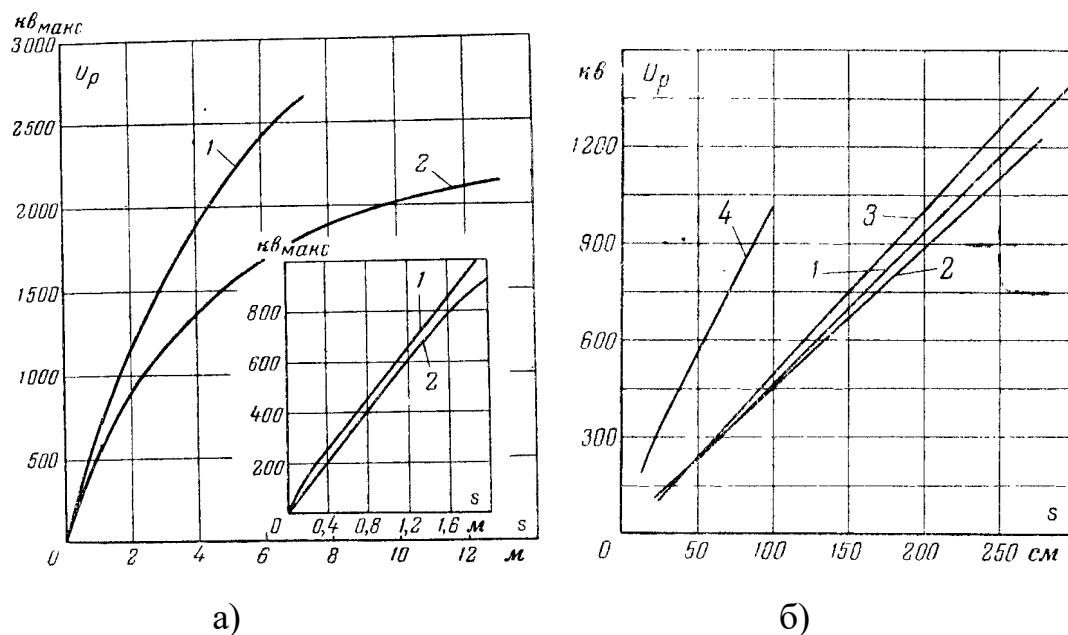


Рисунок 5.3 – Пробивные напряженности промежутков с неоднородным полем: а) для напряжения промышленной частоты: 1 – электроды стержень-стержень; 2 – электроды стержень плоскость; б) для выпрямленного напряжения: 1 – стержень – стержень при положительной полярности незаземленного стержня; 2 – стержень – плоскость при положительной полярности стержня; 3 – стержень – стержень при отрицательной полярности незаземленного стержня; 4 – стержень – плоскость при отрицательной полярности стержня.

3. Изолированные шаровые электроды диаметром 5 см с расстоянием между ними 2 см, расположены в воздухе с температурой 27°C , и давлением 760 мм рт. ст. Определить напряжение частотой 50 гц, при котором произойдет разряд между сферами и величину средней и максимальной напряженностей электрического поля в момент разряда.

Решение:

Относительная плотность воздуха для заданных условий:

$$\delta = (p / p_0)(T_0 / T) = 0,967 \quad (5.9)$$

Пробивное напряжение для воздуха при заданных условиях определяется по формуле (5.1) с учетом коэффициентов из таблицы 5.1:

$$U_{пп} = a_0 \delta h + b_0 \sqrt{\delta h} = 50.2 \text{ кВ} \quad (5.10)$$

Или возможно воспользоваться таблицей 5.3.

Средняя напряженность электрического поля:

$$E_{cp} = \frac{U_{np}}{h} = 25.1 \text{ кВ/м} \quad (5.11)$$

Максимальная напряженность электрического поля определим с учетом коэффициента неоднородности из таблицы 5.2:

$$E_{max} = E_{cp} \cdot y_1 = 32,128 \text{ кВ} \quad (5.12)$$

Таблица 5.2 – Расчетные значения коэффициента неравномерности для электродов шар – шар и шар – плоскость

h/r	y ₁	y ₀	h/r	y ₁	y ₀
0,0	1,0	1,0	1,0	1,359	1,517
0,1	1,034	1,034	1,5	1,559	1,909
0,2	1,068	1,068	2,0	1,770	2,338
0,3	1,102	1,109	3,0	2,214	3,252
0,4	1,137	1,150	4,0	2,677	4,20
0,5	1,173	1,199	5,0	3,151	5,172
0,6	1,208	1,253	6,0	3,632	6,144
0,7	1,258	1,313	7,0	4,117	7,126
0,8	1,283	1,378	8,0	4,604	8,112
0,9	1,321	1,446	10,0	5,586	-

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

5. При полевых испытаниях изоляции линии электропередачи на высоте 1000 м над уровнем моря использован шаровой разрядник, одна из сфер которого заземлена. Определить пробивное напряжение и максимальную напряженность электрического поля у поверхности шаров, если диаметр

сфер 25 см. расстояние между шарами 6 см, давление воздуха 660 мм. рт. ст., температура воздуха 17°C.

Таблица 5.3 – Расчетные значения пробивных напряжений для воздушных промежутков при нормальных атмосферных условиях между изолированными шаровыми электродами при переменном и постоянном напряжении

Расстояние, см	Пробивное напряжение, кв макс				
	при диаметре шаровых электродов, см				
	2	5	10	25	50
0,2	8,2	8.0			
0,4	14,9	14.3			
0,5	18,1		16,9		
0,6	21,2	20.4			
0,8	26,9	26.4			
1.0	32,0	32.2	31,6	31,0	
1.4	41,2	43.3			
1.5			45.8	45	
2,0	51,8	58.3	59.3	59	58
2.5		69.4	72.4	72	
3,0		79.3	84.9	86	
3.5		88,3	96.5	100	
4.0		96.4	107	113	112
5,0		111	128	138	
6.0			146	162	164
8.0			177	207	214
10,0			203	248	263
20,0				363	461
25,0				396	530

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

7. Из изоляторов типа ИШД-35 и СО-35 составлена опорная колонка. Определить напряжение перекрытия по воздуху колонки, если известно, что изолятор ИШД-35 имеет емкость 50 пф и перекрывается при нормальных условиях напряжением 140 кВ, а изолятор СО-35, имея емкость 6 пф, перекрывается напряжением 130 кВ.

8. Рассчитать пробивное напряжение воздушного промежутка с однородным полем при следующих условиях: давление 3 кгс/см², межэлектродное расстояние 10 см, температура +35°C.

Контрольные вопросы

1. Зависимость или закон Пашена.
2. Коэффициент неоднородности электрического поля.
3. Влияние температуры и давления на прочность газа.
4. Влияние различных факторов на прочность газа.
5. Последовательность развития пробоя в газах.
6. Ударная ионизация.
7. Виды самостоятельных разрядов в газах.
8. Зависимость прочности газа от времени приложения напряжения
9. Разряд по поверхности раздела твердый диэлектрик-газ.
10. Влияние полярности приложенного постоянного напряжения на прочность газового промежутка при несимметричных системах электродов.

Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме

Основная литература

1. Электроснабжение сельского хозяйства: учебник / т. Б. Лещинская, и. В. Наумов ; [ред. Г. В. Лихачёва]. - М. : Колос, 2008. - 655 с. – ISBN 978-5-9532-0560-3.
2. Расчет электрических полей устройств высокого напряжения : учеб. пособие / И. П. Белоедова, Ю. В. Елисеев, Е. С. Колечицкий и др. ; ред. Е. С. Колечицкий. - М.: ИД МЭИ, 2008. - 248 с. – ISBN 978-5-383-00072-4

Дополнительная литература

3. Техника высоких напряжений : учебник для вузов / под ред. Д. В. Разевига. – 2-е изд., пер. и доп. – М. : Энергия, 1976. – 488 с.

4. Техника высоких напряжений(изоляция и перенапряжение в электрических установках) : учебник для техникумов / В. П. Ларионов, В. В. Базуткин, Ю. Г. Сергеев ; под ред. В. П. Ларионова. – М. : Энергоиздат, 1982. – 296 с.

Практическое занятие №2

Тема: Расчет потерь на корону на линии электропередач

Цель: освоение методики расчета потерь на коронный разряд в линии электропередач.

Знания и умения, приобретаемые студентом при выполнении практического занятия: порядок расчета потерь на местную корону, навык практического расчета потерь на коронный разряд на воздушной линии электропередач

В результате выполнения практического занятия у студента формируются компетенции ПК-3 (способностью принимать участие в проектировании объектов профессиональной деятельности в соответствии с техническим заданием и нормативно-технической документацией, соблюдая различные технические, энергоэффективные и экологические требования).

Актуальность практического занятия обусловлена необходимостью студентов обладать навыками расчета потерь на коронный разряд на воздушных линиях электропередач.

Теоретическая часть

Коронный разряд на линии электропередач является одним из видов самостоятельного разряда и возникает при условии появления электрического поля с большой неоднородностью. Такие поля возникают, например, в системе электродов провод линии электропередач – земля, причем наибольшая напряженность поля наблюдается у провода.

Напряженность электрического поля на поверхности провода линии электропередач, при которой возникает коронный разряд, может быть рассчитана по следующей эмпирической формуле:

$$E_0 = 24,5\delta \left[1 + \frac{0,65}{(\delta r_0)^{0,38}} \right] \quad (6.1)$$

где r_0 – радиус провода, δ – относительная плотность воздуха.

Провода линий электропередач, как правило, выполняются многожильными, при этом на поверхности провода образуются различные неровности, и по этой причине напряженность поля в различных точках поверхности неодинакова. Для таких проводов рассчитывают среднюю напряженность электрического поля на поверхности по следующей формуле:

$$E = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 r_0} \quad (6.2)$$

где Q – заряд на проводе.

По причине того, что коронный разряд возникает в местах с наибольшей неоднородностью поля, например на неровностях на проводе, то начальная напряженность поля возникновения коронного разряда для многожильного провода меньше, чем для гладкого провода того же радиуса, и рассчитывается как $mE_0 < E_0$. Коэффициент $m < 1$ называется *коэффициентом гладкости* провода. Различные загрязнения и шероховатости, обязательно присутствующие на поверхности проводов, значительно понижают начальную напряженность поля возникновения коронного разряда, а соответственно, и коэффициент m , значение которого для различных конструкций проводов линий электропередач обычно лежит в пределах 0,8 – 0,9.

Образование ионов при коронном разряде наблюдается только в окрестностях электрода с малым радиусом кривизны, например возле

провода. Данная область называется *чехлом* короны. Чехол по своей структуре является неоднородным, и его структура зависит от напряжения, приложенного к проводу. При отрицательной полярности напряжения, приводящего к возникновению коронного разряда, чехол короны состоит из многочисленных проводящих каналов, образованных в результате образования ионов на отдельных центрах на поверхности провода. При положительной полярности приложенного напряжения в составе чехла короны, имеющего более-менее однородную структуру, образуются стримеры, длина которых может превышать толщину чехла короны.

В чехле короны возникают положительные и отрицательные заряженные частицы за счет протекания процессов ударной ионизации. Если заряд частицы по знаку совпадает со знаком напряжения на проводе, то такие частицы под действием сил электрического поля выталкиваются из чехла короны во внешнюю область и постепенно перемещаются к земле и другому проводу.

При приложении постоянного напряжения данный процесс является стационарным, а весь заряд, выделившийся в результате коронного разряда, постепенно оказывается на противоположно заряженном проводе или на земле. При этом в области вне чехла короны – там, где ионизация отсутствует, располагается объемный заряд того же знака, что и коронирующий провод.

Образование и движение зарядов при коронном разряде приводит к возникновению тока утечки, который на несколько порядков превосходит емкостной ток утечки на землю линии электропередач в обычном режиме. Вызванные протеканием этого тока потери активной мощности могут иметь значительную величину, соизмеримую с потерями в активном сопротивлении проводов линии под действием номинального рабочего тока. При этом потери на коронный разряд не зависят от режима загрузки линии и остаются практически постоянными.

Ток утечки при коронном разряде обусловлен в основном перемещением заряженных частиц между проводами или между проводом и землей, при этом ионизационные процессы в чехле короны не приносят значительного вклада в потерю энергии, так как они являются обратимыми связаны с малыми затратами мощности.

При постоянном напряжении, в зависимости от конфигурации линии электропередач, различают два вида коронного разряда — *униполярный* и *биполярный*.

Униполярный коронный разряд возникает в том случае, когда провода на линии электропередач постоянного тока имеют одинаковую полярность. Биполярный коронный разряд возникает в том случае, когда провода линии электропередач имеют разную полярность. Во внешней области биполярной короны заряженные частицы разных знаков движутся навстречу друг другу.

Исследования перемещения объемного заряда между проводами линии электропередач при переменном напряжении выявили, что большая часть заряженных частиц совершает колебательно перемещение в окрестности каждого провода линии на расстоянии в десятых долей метра. При этом на противоположном проводе разряжается лишь их небольшая часть. Данный факт позволяет изучать ионизационные процессы фазных проводах при коронном разряде на линии электропередач переменного тока независимо друг от друга. При этом часть ионов, образовавшаяся за один полупериод напряжения на проводе, возвращается к проводу в другом полупериоде и рекомбинирует, снижая напряженность поля в окрестности провода. Таким образом, чем больше затрачивается энергии на ионизационные процессы, тем больше выравнивается поле вокруг провода.

Для уменьшения напряженности поля на поверхности провода необходимо увеличивать его радиус, при этом начиная с некоторого сечения, нецелесообразно становится использовать один большой провод. С этой целью в фазах линий электропередач напряжением 330 кВ и выше

используется несколько проводов, разнесенных на расстояние несколько десятков сантиметров проводящими распорками. Такие провода называются *расщепленными проводами*.

Для расчета напряженности поля на поверхности отдельных проводников расщепленного провода рассмотрим двухпроводную линию переменного тока (рисунок 6.1)

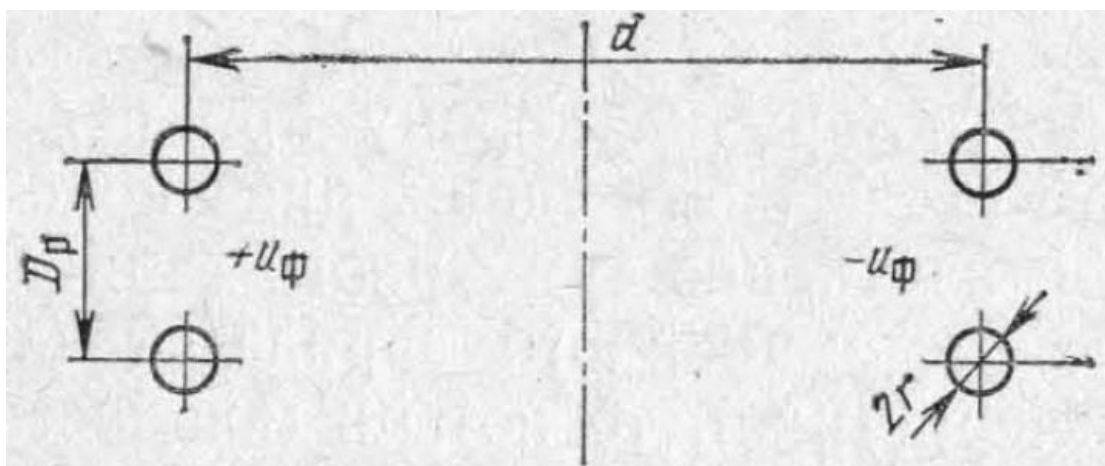


Рисунок 6.1 – К определению напряженности поля на поверхности расщепленных проводов

При учете потенциальных коэффициентов:

$$\begin{aligned}\alpha_{11} &= \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0} \ln \frac{d}{r}; \\ \alpha_{12} &\approx \frac{1}{2\pi\epsilon\epsilon_0} \ln \frac{d}{D_p}\end{aligned}\tag{6.3}$$

где d – двойное расстояние от провода до земли, r – радиус провода, D_p – диаметр (шаг) расщепления.

Тогда, с учетом, что $D_p \ll d$, напряжение провода и заряд на нем q связаны соотношением:

$$U_\phi = \frac{2q}{2\pi\epsilon\epsilon_0} \ln \frac{d}{\sqrt{rD_p}}\tag{6.4}$$

Емкость провода можно определить как:

$$C = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0}{\ln \frac{d}{r_{\text{э}}}} \quad (6.5)$$

где $r_{\text{э}} = \sqrt{rD_p}$ – эквивалентный радиус расщепленного провода.

Формула (6.5) применяется, в том числе и при расщеплении фазы на произвольное число проводов, и для трехфазных линий. В этом случае в качестве d используется среднее геометрическое расстояние между фазами. В случае горизонтального расположения проводов с расстоянием a между соседними фазами

$$d = \sqrt[3]{2a^3} \approx 1,26a \quad (6.6)$$

При этом следует иметь ввиду, что формула (6.5) дает приближенное значение емкости крайних проводов линии, а емкость среднего провода будет незначительно больше. Для приближенного определения емкостей отдельных проводов линии с горизонтальным расположением необходимо применять графики на рисунке 6.2, которые построены с учетом влияния земли, причем средняя емкость C определена по (6.5).

При расщеплении провода в фазе на n проводов эквивалентный радиус

$$r_{\text{э}} = \sqrt[n]{n r r_p^{n-1}} \quad (6.7)$$

где r_p – радиус расщепления, n – число проводов в фазе.

Радиус расщепления и шаг расщепления связаны следующим выражением:

$$r_p = \frac{D_p}{2 \sin \left(\frac{\pi}{n} \right)} \quad (6.8)$$

При числе проводов расщепленной фазы больше двух они, как правило, располагаются в вершинах правильного многоугольника

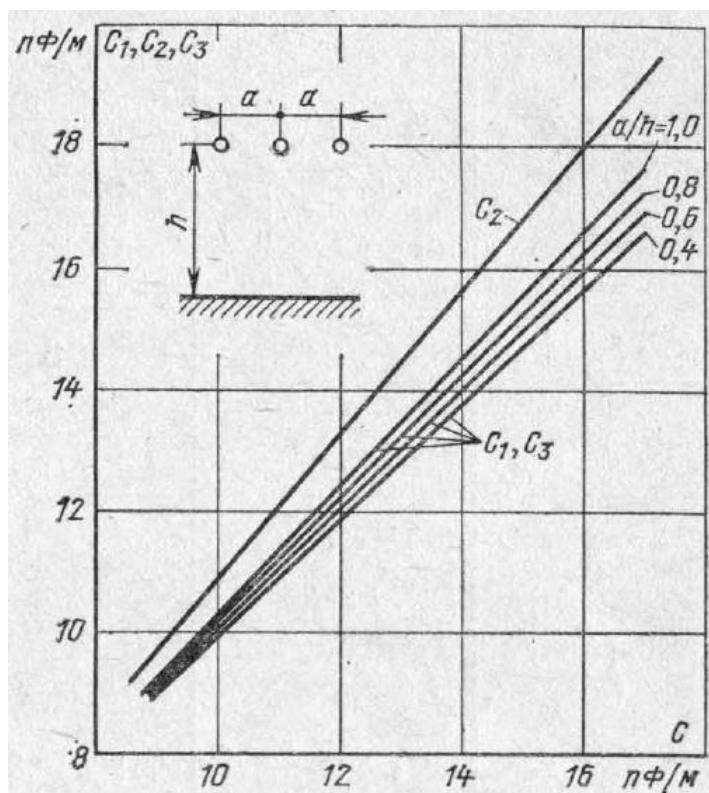


Рисунок 6.2 – Рабочие емкости крайних (C_1 , C_3) и средней (C_2) фазы трехфазной линии с горизонтальным расположением проводов.

Электрическое поле заряда провода q является радиальным и в каждой точке на поверхности провода создает напряженность, по величине равную:

$$E = \frac{q}{2\pi\epsilon\epsilon_0 r} \quad (6.9)$$

При использовании расщепленных проводов поле не однородно, и это учитывается посредством расчета коэффициента усиления поля:

$$k_y = 1 + (n-1)r / r_p \quad (6.10)$$

На линиях 330 кВ и выше в нашей стране принят шаг расщепления 40 см. Незначительное увеличение шага расщепления приводит к незначительному увеличению напряженности локального поля, но дает существенное уменьшение продольной индуктивности линии, что обусловлено эффектом параллельного включения индуктивностей проводов, и приводит к значительному увеличению пропускной способности.

Расчет потерь на корону.

Потери на корону зависят от несладкости проводов, которая в большинстве случаев обусловлена погодными условиями, упитывающимися через коэффициент гладкости. Начальное напряжение короны определяется следующим выражением:

$$E_0 = 23,3m\delta \left[1 + \frac{0,62}{(\delta r_э)^{0,38}} \right] \quad (6.11)$$

Потери на корону увеличиваются не только при дожде, но и при других атмосферных воздействиях, связанных с появлением на поверхности проводов капель воды или кристаллов льда. При расчете потерь на корону принято различать несколько видов погоды, как правило, четыре или пять:

хорошая погода. Наиболее благоприятный режим работы по отношению к возникновению коронного разряда. При этом поверхность провода остается сухой и гладкой, на ней отсутствуют образования в виде капель воды, кристалликов льда, и другие неблагоприятные явления. При этом на проводах всегда есть местные неровности, обусловленные особенностями прокладки и конструкции линии электропередач. Поэтому для хорошей погоды необходимо использовать коэффициент гладкости, близкий к нижнему пределу возможных значений, т. е. примерно 0,85;

туман способствует интенсивному образованию капелек воды на проводе, поэтому коэффициент гладкости при тумане необходимо использовать со значением около 0,7;

иней, гололед, изморозь вызывают формирование на поверхности провода кристаллов льда, которые значительно усиливают электрическое поле. Коэффициент гладкости при подобной погоде примерно равен 0,6;

дождь и мокрый снег вызывают существенное увеличение неровностей на поверхности провода и, соответственно, снижают коэффициент гладкости. При этом коэффициент зависит от интенсивности осадков, и приблизительно, может быть оценен по графику на рисунке 6.3. При этом в большей степени влияние оказывает дождь. Следует отметить,

что потери на корону зависят не только от интенсивности, но и от особенностей формирования неровностей на поверхности проводов. Так, например, при начале дождя потери резко возрастают, а затем устанавливаются на некотором уровне.

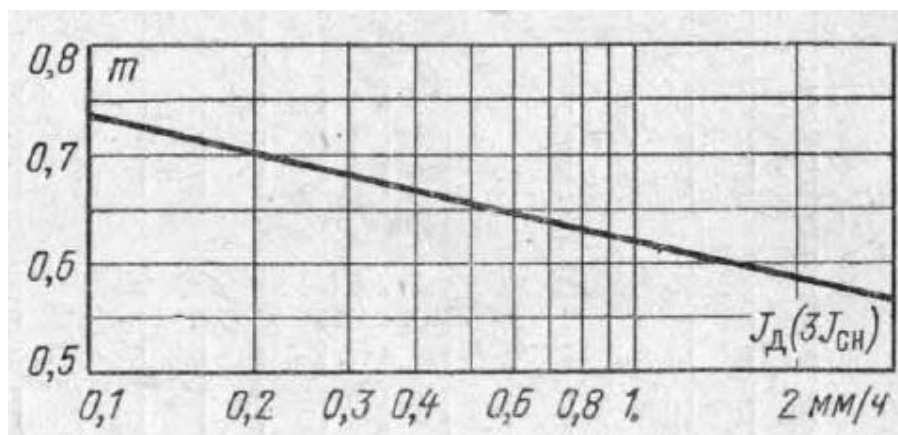


Рисунок 6.3 – Зависимость коэффициента гладкости от интенсивности осадков

сухой снег вызывает значительное искажение электрического поля, гораздо более интенсивному, чем дождь или мокрый снег. При дожде капли воды отрываются только на нижней поверхности провода, что приводит к локальному усилению поля, но при сухом снеге напряженность поля, как правило, может усиливаться по всей поверхности провода. Потери энергии при таком виде погоды изучены гораздо меньше, чем при любых других видах погоды. Для приблизительных оценок можно пользоваться графиками на рисунке 6.3, но интенсивность снега следует увеличивать в 3 раза.

Приведенное выше разделение всего многообразия атмосферных условий на пять видов погоды является грубым приближением и не учитывает ряд деталей. При этом данная модель расчета потерь может вполне применяться для проектных оценок и разработок.

Теоретические и экспериментальные исследования проф. В. И. Левитова позволили установить, что потери на корону, кВт/км, для каждого из перечисленных выше видов погоды могут оцениваться по формуле:

$$P = 350 \omega \frac{C^2}{C_{\text{э}} - C} U_k^2 F(U_{\phi} / U_k) \quad (6.12)$$

где U_k – критическое напряжение короны для данного вида погоды, кВ; U_{ϕ} – амплитуда фазного напряжения линии, кВ; C – рабочая емкость той фазы линии, для которой определяются потери, Ф/км; $C_{\text{э}}$ – эквивалентная емкость объемного заряда короны, Ф/км, которая определяется как:

$$C_{\text{э}} = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0}{\ln \frac{\sqrt{r_p^2 + 2,5kCU_k / \delta\epsilon\epsilon_0\omega}}{r_{\text{э}}}} \quad (6.13)$$

где $r_{\text{э}}$ – эквивалентный радиус расщепленного провода, см; r_p – радиус расщепления, см; для одиночных проводов вместо $r_{\text{э}}$ и r_p подставляется радиус провода r ; k – подвижность ионов, которая для тумана, дождя, мокрого и сухого снега принимается равной 1100 см²/кВ·с, а для хорошей погоды, инея, гололеда и изморози – 2200 см²/кВ·с; δ – относительная плотность воздуха; $\epsilon\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-9}$ Ф/км – диэлектрическая проницаемость воздуха.

Эксперименты показывают, что функция $F(U_{\phi} / U_k)$ (рисунок 6.4) в первом приближении является универсальной для всех видов погоды и конструкций линий, причем разбросы имеют место главным образом при малых значениях отношения U_{ϕ} / U_k (на графике зона разбросов экспериментальных значений заштрихована).

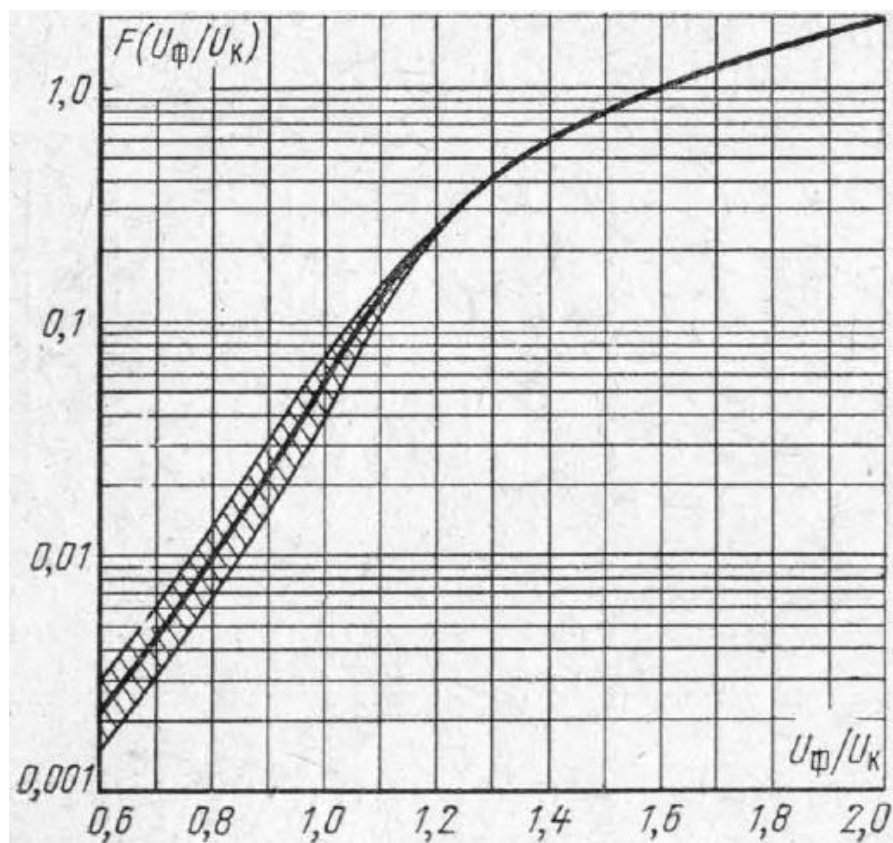


Рисунок 6.4 – Функция F в формуле (6.12) для определения потерь на корону.

Определение среднегодовых потерь энергии на корону целесообразно проводить в следующей последовательности.

По исходным данным определяются рабочие емкости C_i всех фаз линии ($i = 1, 2, 3$), а также радиус расщепления r_p и эквивалентный радиус $r_{\text{э}}$.

По метеорологическим данным для района, в котором проходит линия электропередачи, определяются продолжительности (h) всех видов погоды — хорошей погоды, дождя и мокрого снега, тумана, инея, гололеда и изморози, сухого снега, а также средняя интенсивность дождя и мокрого снега $J_{\text{д}} = H_{\text{д}}/h_{\text{д}}$ и средняя интенсивность сухого снега $J_{\text{сн}} = H_{\text{сн}}/h_{\text{сн}}$.

После этого для каждой фазы и для каждого вида погоды, можно определить критические напряжения:

$$U_{ki} = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 n r E_k}{k_y C_i} \quad (6.14)$$

Далее по рисунку 2.4, определяются соответственно значение функции $F(U_\phi / U_k)$ для каждой фазы и каждого вида погоды. По 2.12 вычисляется мощность потерь для каждой фазы и каждого вида погоды, после чего находятся суммарные мощности потерь $P_{xn}, P_m, P_\phi, P_u, P_{cn}$ (сумма потерь всех трех фаз).

Потери на корону на 1 км линии за 1 год равны:

$$A = P_{xл} \cdot h_{xл} + P_T \cdot h_T + P_\phi \cdot h_\phi + P_u \cdot h_u + P_{cn} \cdot h_{cn} \quad (6.15)$$

Средняя за год мощность потерь на корону равна:

$$P_{cp} = A / 8760 \quad (2.16)$$

Задания

1. Определить среднегодовые потери мощности на корону для одноцепной линии в Ставрополе (давление 640 мм.рт.ст.) с проводами 4хАСО-150 при напряжении 330 кВ. Линия имеет горизонтально расположенные провода с расстоянием между ними 6,5 м и два троса. Средняя высота подвеса провода над землей 10 м, радиус провода 1,12 см, шаг расщепления 30 см. Длительность хорошей погоды = 5000 ч, длительность тумана $h_T=1760$ ч, дождя $h_\phi=1000$, снега $h_{cn}=500$, измороси $h_u=500$, средние температуры при хорошей погоде, тумане, дожде, снеге и измороси $+15^\circ\text{C}$, $+5^\circ\text{C}$, $+10^\circ\text{C}$, -5°C , 0°C соответственно. Количество осадков: дождя $H_\phi=1000$ мм, снега $H_{cn}=250$ мм.

Решение.

Расчет произведем с помощью приведенной выше методики. Эквивалентный радиус расщепленного провода определим из выражения (2.7) и (2.8):

$$r_{\text{э}} = \sqrt[n]{nr_p^{n-1}} = 14,4, \text{ см} \quad (6.17)$$

$$r_p = \frac{D_p}{2 \sin\left(\frac{\pi}{n}\right)} = 21,2, \text{ см} \quad (6.18)$$

где $n=4$ – число проводов в фазе, $D_p=30$ – шаг расщепления.

Далее определим с использованием выражения (6.11) критическую напряженность поля возникновения коронного разряда на поверхности провода при различных видах погоды:

$$\begin{aligned} E_{\text{ХП}} &= 23,3 m_{\text{ХП}} \delta_{\text{ХП}} \left| 1 + \frac{0,62}{(\delta_{\text{ХП}} r_{\text{э}})^{0,38}} \right| = 21,01 \\ E_{\text{T}} &= 23,3 m_{\text{T}} \delta_{\text{T}} \left| 1 + \frac{0,62}{(\delta_{\text{T}} r_{\text{э}})^{0,38}} \right| = 17,89 \\ E_{\text{Д}} &= 23,3 m_{\text{Д}} \delta_{\text{Д}} \left| 1 + \frac{0,62}{(\delta_{\text{Д}} r_{\text{э}})^{0,38}} \right| = 16,37, \text{ кВ/см} \\ E_{\text{СН}} &= 23,3 m_{\text{СН}} \delta_{\text{СН}} \left| 1 + \frac{0,62}{(\delta_{\text{СН}} r_{\text{э}})^{0,38}} \right| = 19,03 \\ E_{\text{И}} &= 23,3 m_{\text{И}} \delta_{\text{И}} \left| 1 + \frac{0,62}{(\delta_{\text{И}} r_{\text{э}})^{0,38}} \right| = 15,59 \end{aligned} \quad (6.19)$$

где $m_{\text{ХП}}=0.85$, $m_{\text{T}}=0.7$, $m_{\text{Д}}=0.65$, $m_{\text{СН}}=0.7$, $m_{\text{И}}=0.6$ – коэффициенты гладкости для соответствующего вида погоды, причем коэффициенты $m_{\text{Д}}$ и $m_{\text{СН}}$ определяются исходя из графика на рисунке 2.3, по средней интенсивности дождя $J_{\text{д}} = H_{\text{д}}/h_{\text{д}}=1$ мм/час и средней интенсивности сухого снега $J_{\text{сн}} = H_{\text{сн}}/h_{\text{сн}}=0,5$ мм/час.

Плотности воздуха для различных видов погоды определяются по формуле (5.5)

$$\begin{aligned} \delta_{\text{ХП}} &= (p/p_0)(T_0/T_{\text{ХП}}) = 0,86 \\ \delta_{\text{T}} &= (p/p_0)(T_0/T_{\text{T}}) = 0,89 \\ \delta_{\text{Д}} &= (p/p_0)(T_0/T_{\text{Д}}) = 0,87 \\ \delta_{\text{СН}} &= (p/p_0)(T_0/T_{\text{СН}}) = 0,92 \\ \delta_{\text{И}} &= (p/p_0)(T_0/T_{\text{И}}) = 0,90 \end{aligned} \quad (6.20)$$

Затем из геометрических параметров линии рассчитаем емкость фаз линии с использованием выражения (6.5) и рисунка 6.2:

$$C = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0}{\ln \frac{d}{r_9}} = 13,76 \text{ нФ/км} \quad (6.21)$$

где $d=1.26a=819$ см.

По графику на рисунке 6.2 определяем емкости фаз линии $C_1=13,7$ нФ/км, $C_2=15,5$ нФ/км, $C_3=13,7$ нФ/км.

После этого для каждой фазы и для каждого вида погоды, можно определить критические напряжения:

$$\begin{aligned} U_{XП1} = U_{XП3} &= \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 n r E_{XП}}{k_y C_1} = 329,93 \\ U_{XП2} &= \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 n r E_{XП}}{k_y C_2} = 291,62 \\ U_{CH1} = U_{CH3} &= \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 n r E_{CH}}{k_y C_1} = 298,77 \\ U_{CH2} &= \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 n r E_{CH}}{k_y C_2} = 264,07 \\ \\ U_{Д1} = U_{Д3} &= \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 n r E_{Д}}{k_y C_1} = 256,43 \\ U_{Д2} &= \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 n r E_{Д}}{k_y C_2} = 226,65 \\ U_{И1} = U_{И3} &= \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 n r E_{И}}{k_y C_1} = 244,74 \text{ , кВ} \\ U_{И2} &= \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 n r E_{И}}{k_y C_2} = 216,32 \\ U_{Т1} = U_{Т3} &= \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 n r E_{Т}}{k_y C_1} = 280,76 \\ U_{Т2} &= \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 n r E_{Т}}{k_y C_2} = 248,16 \end{aligned} \quad (6.22)$$

где $k_y = 1 + (n-1)r / r_p = 1,16$ – коэффициент усиления поля

Далее с использованием графика на рисунке 6.4 и отношения U_{ϕ} / U_k определяем коэффициент F для всех видов погоды и всех фаз:

$$\begin{aligned}
 \frac{U_f}{U_{\text{ХП1}}} &= \frac{U_f}{U_{\text{ХП3}}} = 0,58; F_{\text{ХП1}} = F_{\text{ХП3}} = 0,001 \\
 \frac{U_f}{U_{\text{ХП2}}} &= 0,65; F_{\text{ХП2}} = 0,003 \\
 \frac{U_f}{U_{\text{Т1}}} &= \frac{U_f}{U_{\text{Т3}}} = 0,68; F_{\text{ХП1}} = F_{\text{ХП3}} = 0,004 \\
 \frac{U_f}{U_{\text{Т2}}} &= 0,77; F_{\text{Т2}} = 0,009 \\
 \frac{U_f}{U_{\text{СН1}}} &= \frac{U_f}{U_{\text{СН3}}} = 0,64; F_{\text{СН1}} = F_{\text{СН3}} = 0,001 \\
 \frac{U_f}{U_{\text{СН2}}} &= 0,72; F_{\text{СН2}} = 0,005 \\
 \frac{U_f}{U_{\text{И1}}} &= \frac{U_f}{U_{\text{И3}}} = 0,78; F_{\text{И1}} = F_{\text{И3}} = 0,009 \\
 \frac{U_f}{U_{\text{И2}}} &= 0,88; F_{\text{И}} = 0,02 \\
 \frac{U_f}{U_{\text{Д1}}} &= \frac{U_f}{U_{\text{Д3}}} = 0,74; F_{\text{Д1}} = F_{\text{Д3}} = 0,006 \\
 \frac{U_f}{U_{\text{Д2}}} &= 0,84; F_{\text{Д2}} = 0,015
 \end{aligned} \tag{6.23}$$

Затем с использованием выражения (6.13) определим эквивалентную емкость каждой из фаз для определенного вида погоды:

$$\begin{aligned}
C_{\text{эХП1}} = C_{\text{эХП3}} &= \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0}{\ln \frac{\sqrt{r_p^2 + 2,5k_{\text{ХП}}C_1U_{\text{ХП1}} / \delta_{\text{ХП}}\epsilon\epsilon_0\omega}}{r_3}} = 28,1 \\
C_{\text{эХП2}} &= \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0}{\ln \frac{\sqrt{r_p^2 + 2,5k_{\text{ХП}}C_2U_{\text{ХП2}} / \delta_{\text{ХП}}\epsilon\epsilon_0\omega}}{r_3}} = 28,1 \\
C_{\text{эТ1}} = C_{\text{эТ3}} &= \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0}{\ln \frac{\sqrt{r_p^2 + 2,5k_{\text{Т}}C_1U_{\text{Т1}} / \delta_{\text{Т}}\epsilon\epsilon_0\omega}}{r_3}} = 35,5 \\
C_{\text{эТ2}} &= \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0}{\ln \frac{\sqrt{r_p^2 + 2,5k_{\text{Т}}C_2U_{\text{Т2}} / \delta_{\text{Т}}\epsilon\epsilon_0\omega}}{r_3}} = 35,5 \\
C_{\text{эСН1}} = C_{\text{эСН3}} &= \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0}{\ln \frac{\sqrt{r_p^2 + 2,5k_{\text{СН}}C_1U_{\text{СН1}} / \delta_{\text{СН}}\epsilon\epsilon_0\omega}}{r_3}} = 35,3 \\
C_{\text{эСН2}} &= \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0}{\ln \frac{\sqrt{r_p^2 + 2,5k_{\text{СН}}C_2U_{\text{СН2}} / \delta_{\text{СН}}\epsilon\epsilon_0\omega}}{r_3}} = 35,3 \\
C_{\text{эИ1}} = C_{\text{эИ3}} &= \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0}{\ln \frac{\sqrt{r_p^2 + 2,5k_{\text{И}}C_1U_{\text{И1}} / \delta_{\text{И}}\epsilon\epsilon_0\omega}}{r_3}} = 30,6 \\
C_{\text{эИ2}} &= \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0}{\ln \frac{\sqrt{r_p^2 + 2,5k_{\text{И}}C_2U_{\text{И2}} / \delta_{\text{И}}\epsilon\epsilon_0\omega}}{r_3}} = 30,6 \\
C_{\text{эД1}} = C_{\text{эД3}} &= \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0}{\ln \frac{\sqrt{r_p^2 + 2,5k_{\text{Д}}C_1U_{\text{Д1}} / \delta_{\text{Д}}\epsilon\epsilon_0\omega}}{r_3}} = 36,3 \\
C_{\text{эД2}} &= \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0}{\ln \frac{\sqrt{r_p^2 + 2,5k_{\text{Д}}C_2U_{\text{Д2}} / \delta_{\text{Д}}\epsilon\epsilon_0\omega}}{r_3}} = 36,3, \text{ нФ/км} \quad (6.24)
\end{aligned}$$

где $k_{\text{И}}=2200 \text{ см}^2/\text{кВ}\cdot\text{с}$, $k_{\text{ХП}}=2200 \text{ см}^2/\text{кВ}\cdot\text{с}$, $k_{\text{Д}}=1100 \text{ см}^2/\text{кВ}\cdot\text{с}$, $k_{\text{Т}}=1100 \text{ см}^2/\text{кВ}\cdot\text{с}$, $k_{\text{СН}}=1100 \text{ см}^2/\text{кВ}\cdot\text{с}$ – коэффициенты, учитывающие подвижности ионов при различных видах погоды.

Далее, с использованием выражения (6.12) получим мощности потерь на корону для каждой из фаз и каждого вида погоды:

$$\begin{aligned}
P_{XП1} &= P_{XП3} = 350\omega \frac{C_1^2}{C_{ЭXП1} - C_1} U_{XП1}^2 F_{XП1} = 0,16 \\
P_{XП2} &= 350\omega \frac{C_2^2}{C_{ЭXП2} - C_2} U_{XП2}^2 F_{XП2} = 0,54 \\
P_{T1} &= P_{T3} = 350\omega \frac{C_1^2}{C_{ЭT1} - C_1} U_{T1}^2 F_{T1} = 0,3 \\
P_{T2} &= 350\omega \frac{C_2^2}{C_{ЭT2} - C_2} U_{T2}^2 F_{T2} = 0,73 \\
P_{Д1} &= P_{Д3} = 350\omega \frac{C_1^2}{C_{ЭД1} - C_1} U_{Д1}^2 F_{Д1} = 0,36 \\
P_{Д2} &= 350\omega \frac{C_2^2}{C_{ЭД2} - C_2} U_{Д2}^2 F_{Д2} = 0,98 \\
P_{CH1} &= P_{CH3} = 350\omega \frac{C_1^2}{C_{ЭCH1} - C_1} U_{CH1}^2 F_{CH1} = 0,26 \\
P_{CH2} &= 350\omega \frac{C_2^2}{C_{ЭCH2} - C_2} U_{CH2}^2 F_{CH2} = 0,47 \\
P_{И1} &= P_{И3} = 350\omega \frac{C_1^2}{C_{ЭИ1} - C_1} U_{И1}^2 F_{И1} = 0,66 \text{ кВт} \\
P_{И2} &= 350\omega \frac{C_2^2}{C_{ЭИ2} - C_2} U_{И2}^2 F_{И2} = 1,63
\end{aligned} \tag{6.25}$$

По формуле (6.15) потери на корону на 1 км линии за 1 год равны:

$$\begin{aligned}
A &= (P_{XП1} + P_{XП2} + P_{XП3}) \cdot h_{X,П} + (P_{T1} + P_{T2} + P_{T3}) \cdot h_T + (P_{И1} + P_{И2} + P_{И3}) \cdot h_{И} + \\
&+ (P_{Д1} + P_{Д2} + P_{Д3}) \cdot h_{Д} + (P_{CH1} + P_{CH2} + P_{CH3}) \cdot h_{CH} = 10300 \\
&\text{кВт} \tag{6.26}
\end{aligned}$$

Средняя за год мощность потерь на корону равна:

$$P_{CP} = A / 8760 = 1.17 \text{ кВт/ч/км} \tag{6.27}$$

2. Устройство по очистке дымовых газов котельной состоит из системы цилиндрических труб с внутренним диаметром 16 см. По оси каждой из этих труб натянут цилиндрический провод с диаметром 4 мм. Определить критическую напряженность электрического поля и

критическое напряжение, при которых появится общая корона, если температура отходящих газов составляет величину 150°C , давление 101 кПа.

3. Определить критическое напряжение и максимальную напряженность электрического поля на поверхности провода линии передачи с номинальным напряжением 220 кВ. Провода марки АС-300 расположены в горизонтальной плоскости с расстоянием между ними 7 м. Погода ясная, атмосферные условия нормальные, диаметр провода 24,2 мм.

4. Определить среднегодовые потери мощности на корону для одноцепной линии на высоте 1000 м над уровнем моря с проводами 4хАСО-300 при напряжении 500 кВ. Линия имеет горизонтально расположенные провода с расстоянием между ними 7,5 м и два троса. Средняя высота подвеса провода над землей 9 м, радиус провода 2,42 см, шаг расщепления 45 см. Длительность хорошей погоды = 4000 ч, длительность тумана $h_{\text{т}}=760$ ч, дождя $h_{\text{д}}=2000$, снега $h_{\text{сн}}=1500$, измороси $h_{\text{и}}=500$, средние температуры при хорошей погоде, тумане, дожде, снеге и измороси $+10^{\circ}\text{C}$, $+1^{\circ}\text{C}$, $+5^{\circ}\text{C}$, -10°C , 0°C соответственно. Количество осадков: дождя $H_{\text{д}}=1500$ мм, снега $H_{\text{сн}}=500$ мм.

Контрольные вопросы

1. Перечислите виды разрядов в газовой среде и их особенности.
2. Назовите основные условия появления коронного разряда.
3. В чем заключается положительная и отрицательная роль коронного разряда в электроустановках?
4. Изложите последовательность расчета потерь активной мощности на корону.
5. Перечислите основные технические способы, применяемые для ограничения потерь мощности на корону.
6. Дайте определение критической напряженности и критическому напряжению, от каких параметров они зависят.
7. Как влияют атмосферные условия на потери на коронный разряд.

8. Определение местной и общей короны.
9. Особенности коронного разряда при постоянном напряжении.
10. Объясните причины возникновения радиопомех при коронировании.

Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме

Основная литература

1. Электроснабжение сельского хозяйства: учебник / т. Б. Лещинская, и. В. Наумов ; [ред. Г. В. Лихачёва]. - М. : Колос, 2008. - 655 с. – ISBN 978-5-9532-0560-3.
2. Расчет электрических полей устройств высокого напряжения : учеб. пособие / И. П. Белоедова, Ю. В. Елисеев, Е. С. Колечицкий и др. ; ред. Е. С. Колечицкий. - М.: ИД МЭИ, 2008. - 248 с. – ISBN 978-5-383-00072-4

Дополнительная литература

3. Техника высоких напряжений : учебник для вузов / под ред. Д. В. Разевига. – 2-е изд., пер. и доп. – М. : Энергия, 1976. – 488 с.
4. Техника высоких напряжений(изоляция и перенапряжение в электрических установках) : учебник для техникумов / В. П. Ларионов, В. В. Базуткин, Ю. Г. Сергеев ; под ред. В. П. Ларионова. – М. : Энергоиздат, 1982. – 296 с.

Практическое занятие №3

Тема: Расчет изоляции воздушной линии электропередач

Цель: освоение методики расчета изоляции воздушных линий электропередач.

Знания и умения, приобретаемые студентом при выполнении практического занятия: порядок расчета изоляции воздушных линий, навык практического расчета числа изоляторов в гирлянде воздушной линии электропередач

В результате выполнения практического занятия у студента формируются компетенции ПК-3 (способностью принимать участие в

проектировании объектов профессиональной деятельности в соответствии с техническим заданием и нормативно-технической документацией, соблюдая различные технические, энергоэффективные и экологические требования).

Актуальность практического занятия обусловлена необходимостью студентов обладать навыками расчета изоляции воздушных линий электропередач.

Теоретическая часть

Линии электропередачи монтируются на металлических, железобетонных, деревянных и смешанного типа опорах. В отношении изоляционных характеристик металлические и железобетонные опоры равноценны, поэтому в дальнейшем под металлическими опорами будут подразумеваться также железобетонные. Линии сверхвысокого напряжения – СВН (330 кВ и выше) строятся почти исключительно на металлических опорах. Для линий 110 кВ и ниже также широко раньше применялось дерево. Изоляция линий на деревянных опорах рассматривается отдельно.

На линиях СВН наиболее распространены порталные опоры с горизонтальным расположением проводов. Схема расположения проводов и изоляции на опорах показана на рисунок 7.1

Изоляция на опорах состоит из гирлянд изоляторов, поддерживающих провода, и промежутков s_1 между проводами и телом опоры или оттяжками. В пролете изоляция определяется воздушными промежутками s_2 между фазами и s_3 между фазой и землей. Промежуток s_3 обычно минимален в середине пролета. Обычно на линиях с металлическими опорами подвешивается грозозащитный трос. Воздушный промежуток s_4 между проводом и тросом также определяет изоляцию линии. При этом в расчет принимается величина промежутка s_4 в середине пролета, где амплитуда атмосферных перенапряжений оказывается наибольшей.

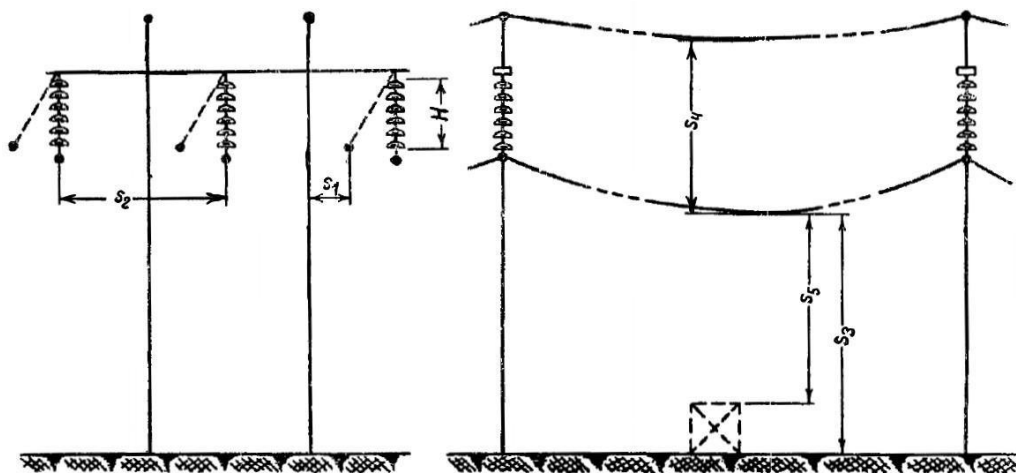


Рисунок 7.1 – Схематическое изображение линии на порталных опорах.

Выбор промежутков s_2 , s_3 и s_4 диктуется не только соображениями изоляции. Например, величина промежутка s_2 определяется также условиями безопасности при подъеме человека по стойке опоры для проведения ремонта под напряжением и условиями схлестывания проводов в пролете при несинхронном их качании. Промежутки s_4 между проводами и тросами (по вертикали) должны удовлетворять условиям изоляции, грозозащиты и, кроме того, иметь достаточную величину для предотвращения схлестывания проводов и тросов при сбросе гололеда и пляске проводов. Промежуток s_3 на линиях до 500 кВ включительно выбирается с учетом возможного проезда транспорта под линией. Нормируемые ПУЭ минимальные значения промежутков s_2 , s_3 , s_4 установлены на основе длительного опыта эксплуатации линий.

Изоляция на опорах выбирается исходя из воздействующих напряжений. При выборе промежутка s_1 учитывается отклонение провода под действием ветра. Следует отметить, что выбор промежутка s_2 накладывает ограничение и на выбор s_1 так как из рисунка следует, что $s_2 = 2s_1 + 2l_g \sin \beta + \Delta$, где l_g — длина гирлянды; β — угол ее отклонения ветром; Δ — толщина стойки опоры.

На линиях напряжением до 220 кВ наиболее распространены одностоечные опоры с вертикальным расположением проводов. В этих случаях следует брать в расчет также изоляционные промежутки между проводом и нижней траверсой и габарит между проводами в пролете.

В конструктивном отношении линейные изоляторы подразделяются на штыревые и подвесные. Штыревые изоляторы обычно применяются на линиях до 10 кВ и в более редких случаях – на линиях 20 – 35 кв. Подвесные изоляторы обычно применяются на линиях 35 кВ и выше и иногда на линиях более низкого напряжения.

Типовая конструкция тарельчатых изоляторов с конусной головкой показана на рисунке 3.2

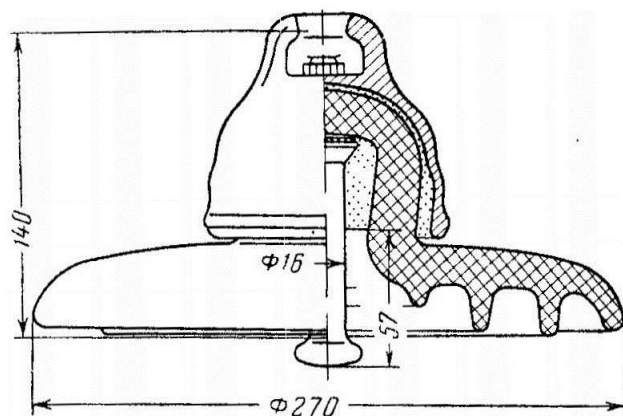


Рисунок 7.2 – Линейный подвесной фарфоровый изолятор типа ПФЕ-4,5.

В последние годы широкое распространение находят изоляторы типа ПС из закаленного стекла. Цифра в названии изолятора указывает его испытательную одночасовую электромеханическую нагрузку в тоннах.

Одиночные подвесные изоляторы применяются только на линиях до 10 кв включительно. На более высоких напряжениях подвесные изоляторы соединяются в гирлянды.

Строительная высота гирлянды

$$l_I = hn, \quad (7.1)$$

где h – строительная высота изолятора;

n – число элементов (изоляторов) в гирлянде.

Благодаря шарнирному соединению изоляторов вся гирлянда приобретает гибкость, которая способствует снижению нагрузок на изоляторы при значительных ветровых отклонениях и обрывах проводов.

Разрядные характеристики воздушных промежутков. На рисунке 7.3 приведены разрядные характеристики типовых воздушных промежутков линий электропередачи при коммутационных импульсах. На опоре промежутком, определяющим уровень изоляции линии, является промежуток s_1 провод – стойка опоры при отклоненной под действием ветра гирлянде (рисунок 3.1). У гирлянд СВН, снабженных защитной арматурой, промежуток s_1 образован арматурой и стойкой опоры или траверсой. Указанный промежуток по симметрии электродов занимает среднее положение между крайними типами стержень – стержень и стержень – плоскость. Поэтому кривая разрядных напряжений для него также занимает среднее положение (кривая 3 на рисунке 3.3).

В пролете уровень изоляции линии определяется промежутками провод – провод s_2 и провод – земля s_3 (рисунок 7.1). Промежуток провод – провод симметричен, и для него действительна кривая 1. Разрядное напряжение промежутка провод – земля определяется по кривой 4. При оценке необходимых в отношении уровня изоляции габаритов линии следует считаться с появлением в пролете возвышающихся предметов (комбайнов, автомашин и пр.). В качестве расчетного в этом случае принимается промежуток провод – стержень, возвышающийся над землей на 4 м (кривая 5).

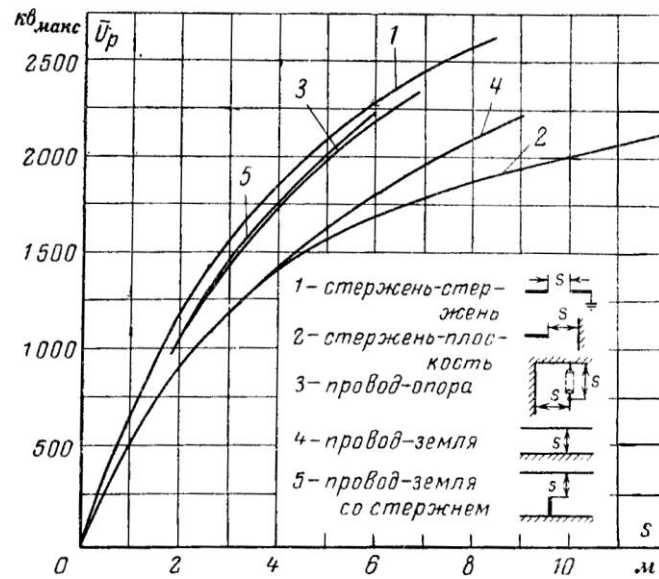


Рисунок 7.3 – Кривые средних разрядных напряжений U_p воздушных промежутков на линиях.

Кривые $U_p=f(s)$ на рисунке 7.3 определяют 50%-ные разрядные напряжения при коммутационных импульсах, которые близки к значениям разрядных напряжений на промышленной частоте. В то же время при коммутационных импульсах наблюдается существенный разброс разрядных напряжений, вследствие которого с вероятностью порядка 0,025 можно ожидать снижения разрядных напряжений до $0,85 U_p$.

Сухоразрядные и мокроразрядные характеристики гирлянд изоляторов. Для разряда по гирлянде могут быть намечены три возможных пути (рисунок 3.4); путь вдоль всех изгибов фарфорового тела изоляторов 1, кратчайший путь между шапками изоляторов 2 и кратчайший для всей гирлянды путь 3. Направление развития канала разряда зависит от предразрядного тока и частоты воздействующего напряжения.

На частотах порядка десятков и сотен герц и при сухой поверхности гирлянды разряд развивается только по путям 2 или 3 в зависимости от отношения длины пути утечки l_{YT} к высоте изолятора h . Опыт показал, что если $l_{YT}/h \geq 1.3$, разряд развивается на пути 3, т.е. целиком по воздуху. При меньшем отношении l_{YT}/h более слабым участком оказывается путь 2. При заданной длине гирлянды путь 3 соответствует максимально возможному

сухоразрядному напряжению. Поэтому при конструировании изоляторов стремятся соблюсти условие $l_{yt}/h \geq 1.3$ путем увеличения диаметра тарелки или, что более экономично, путем снижения диаметра шапки изолятора. Условие $l_{yt}/h \geq 1.3$ соблюдается для современных изоляторов, поэтому сухоразрядное напряжение гирлянды практически полностью определяется разрядным напряжением воздушного промежутка 3 и не зависит от типа изоляторов. Значения сухоразрядного напряжения гирлянд в зависимости от их строительной длины приведены на рисунок 7.5 На опорах portalного типа с большей площадью металлических конструкций разрядное напряжение гирлянд снижается. При наличии арматуры длина l_{yt} берется равной промежутку в свету между арматурой и траверсой. Кривые на рисунке 7.5 относятся к поддерживающим гирляндам. Разрядные напряжения натяжных гирлянд повышаются примерно на 10%.

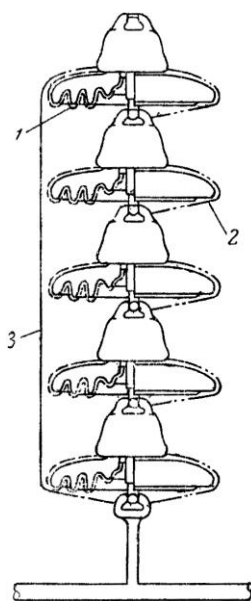


Рисунок 7.4 – Возможные пути перекрытия гирлянды изоляторов.

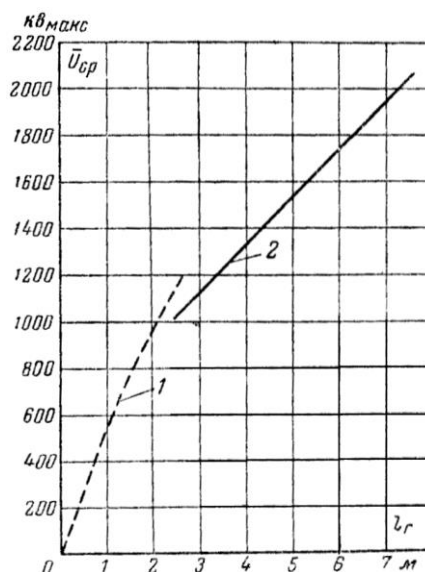


Рисунок 7.5 – Сухоразрядные напряжения поддерживающих гирлянд изоляторов в функции строительной длины. 1 — гирлянды без защитной арматуры ВЛ до 220 кВ; 2 – гирлянды с защитной арматурой ВЛ 330—750 кВ.

При дожде путь разряда прилегает к поверхности фарфора значительно плотнее. На относительно коротких гирляндах разряд развивается по пути 1 (рисунок 7.4); на более длинных гирляндах (110 кВ и выше) он приближается к пути 2. Распределение напряжения по изоляторам при дожде почти равномерно, вследствие чего мокроразрядное напряжение гирлянды U_{MP} пропорционально числу изоляторов n :

$$U_{MP} = E_{MP} n h, \quad (7.2)$$

где E_{MP} – мокроразрядный градиент, усредненное значение которого указывается в документации на изоляторы.

При воздействии коммутационных импульсов сухоразрядное напряжение гирлянд практически не отличается от измеренного на промышленной частоте, лишь у длинных гирлянд отмечено небольшое увеличение U_{CP} . Мокроразрядное же напряжение на коммутационных волнах может заметно превышать определенное на промышленной частоте.

Импульсную прочность воздушных промежутков на линиях электропередачи вычисляют по кривым разрядных напряжений промежутков стержень – стержень либо стержень – плоскость. При этом

промежутки провод – опора, провод – земля уподобляют промежутку стержень – плоскость, а промежутки провод – провод, провод – трос – промежутку стержень — стержень.

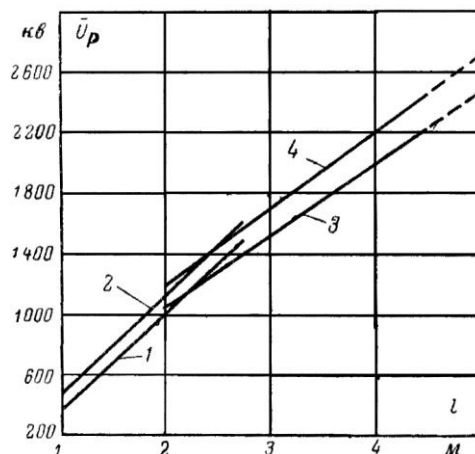


Рисунок 7.6 – 50%-ные импульсные разрядные напряжения.— для гирлянд без защитной арматуры (при положительной и отрицательной полярности) для изоляторов типа П (кривая 1) и малогабаритных изоляторов типа ПМ, ПС, ПФЕ (кривая 2); 3,4 — для гирлянд с защитной арматурой с изоляторами всех типов при положительной полярности (кривая 3) и отрицательной полярности (кривая 4).

При воздействии полной импульсной волны на гирлянду изоляторов канал перекрытия развивается по пути 3 (рисунок 7.4). Поэтому тип изолятора оказывает незначительное влияние на величину 50%-ного импульсного разрядного напряжения, которое в основном определяется длиной гирлянды (рисунок 7.6). При малых временах воздействия ($t_p \approx 2$ мксек и менее) канал разряда развивается по путям 2 и 1, вследствие чего тип изолятора оказывает заметное влияние на разрядное напряжение гирлянды. Заметим, что перекрытие по пути 1 иногда удается обнаружить по характерным пятнам ожога всех изоляторов дугой, возникающей по следу импульсного перекрытия. Это наблюдение позволяет сделать вывод о грозовом перекрытии гирлянды при воздействии волны с крутым фронтом (малые t_p).

Давление ветра на провода линии вызывает отклонение гирлянды, вследствие которого провод приближается к стойке опоры. В результате

изоляционный промежуток s_1 (рисунок 7.1) оказывается значительно меньше половины расстояния между фазами линии. Ветер оказывает, таким образом, существенное влияние на выбор междуфазного габарита опоры.

Давление ветра на провод зависит от его диаметра, наличия и толщины стенки гололеда и скорости ветра. Скорость ветра и гололедные отложения являются статистическими величинами, которые можно характеризовать кривыми распределения для каждого географического района. Имеющиеся сейчас сведения, однако, недостаточны для построения статистических характеристик этих факторов, вследствие чего учет совместного действия гололеда, ветра и возможных воздействий напряжения производится очень приближенно – на основе длительного успешного эксплуатационного опыта. Максимальные измерения на линии скорости ветра могут, очевидно, сочетаться с длительным воздействием рабочего напряжения. Поэтому при определении размеров опоры по воздействию рабочего напряжения в качестве расчетной принимают так называемую максимальную скорость ветра v_M , наблюдаемую на трассе линии с повторяемостью примерно 1 раз в 10 лет.

Ветер и коммутационное перенапряжение в сети являются независимыми статистическими событиями, и потому не следует принимать в расчет одновременность воздействия практически максимальных, так называемых расчетных внутренних перенапряжений и максимальной скорости ветра. Более целесообразно в расчетах изоляции по коммутационным перенапряжениям расчетные внутренние перенапряжения сочетать со скоростью ветра порядка $0,4 v_M$.

При грозах скорость ветра обычно невелика. В качестве расчетной принимается скорость $v = 10$ м/сек.

В настоящее время установилась практика выбора изоляции линий электропередачи по коммутационным перенапряжениям и максимальному рабочему напряжению. Необходимый уровень грозоупорности линий

устанавливается не путем усиления изоляции, а путем защиты линий хорошо заземленными тросами.

Коммутационные перенапряжения U_K задаются расчетной кратностью k по отношению к амплитудному значению фазового рабочего напряжения U_ϕ :

$$U_K = kU_\phi \quad (7.3)$$

Кратность коммутационных перенапряжений зависит от режима нейтрали в системе, свойств электропередачи, в частности ее длины и резонансных характеристик, свойств выключателей, наличия реакторов и продольной компенсации, характеристик разрядников и других факторов. Процесс развития коммутационных перенапряжений и их ограничение будут подробно изучаться во второй части учебного пособия. Здесь же приведем лишь значения расчетных кратностей k для сетей разных напряжений: при $U_H=35$ кВ $k=3,5$; при $U_H=110-200$ кВ $k=3,0$; при $U_H=330$ кВ $k=2,7$; при $U_H=500$ кВ $k=2,5$; при $U_H=750$ кВ $k=2,1$.

При выборе линейной изоляции по коммутационным перенапряжениям используются средние разрядные характеристики изоляции. Известно, что разряд при коммутационных импульсах имеет значительный статистический разброс, характеризуемый величиной σ . Поэтому вводится понятие о выдерживаемом напряжении, которое должно быть ниже нижнего предела кривой распределения разрядного напряжения. Количественно переход от $\bar{U}_P$ к выдерживаемому напряжению осуществляется умножением $\bar{U}_P$ на коэффициент $k_\sigma = 1-2\sigma \approx 0.85$.

В современной проектной практике используется следующая методика выбора линейной изоляции.

а) По значению U_H определяют необходимое среднее мокроразрядное напряжение гирлянды U_{MP} :

$$U_{MP} = \frac{U_k}{k_{\sigma} k_P k_{\gamma} k_{\tau}} \quad (7.4)$$

где k_P — поправка на возможное отличие давления от стандартного;

k_{γ} — поправка на возможную загрязненность поверхности изолятора и отличие электропроводности и интенсивности дождя от стандартных;

k_{τ} — коэффициент импульса.

В проектных разработках обычно принимают $k_{\gamma}=1.1$. Величина k_{τ} определяется по формуле (7.3). В среднем можно принять следующие значения k_{τ} для различных номинальных напряжений ВЛ:

Таблица 7.1 – Выбор коэффициента импульса в зависимости от номинального напряжения линии

U_H , кВ	110 — 154	220 — 330	500	750 и выше
k_{τ}	1,15	1,1 1	1,05	1

Величина k_P для наибольшей высоты 1 000 м над уровнем моря $k_P=0,94$; для 500 м $k_P=0,96$.

б) По значению U_{MP} с помощью формулы (7.2) определяют необходимое число изоляторов в гирлянде

в) Для учета возможности образования в поддерживающей гирлянде дефектных (нулевых) изоляторов вычисленное значение n увеличивается на один элемент для линий 35—330 кВ и на два элемента для линий 500—750 кВ.

г) Найденное полное число изоляторов в гирлянде N проверяют на длину пути утечки при рабочем напряжении.

Длина пути утечки изоляторов l_{UT} указана в технической документации на изоляторы, а допустимые удельные длины λ_{yt} для разных районов загрязнения атмосферы приведены в таблице 3.2. Заметим, что в

нормированных значениях λ_{yt} учтена возможность появления дефектного изолятора в гирлянде.

Таблица 7.2 – Нормируемая длина пути утечки в зависимости от загрязненности атмосферы.

Степень загрязнения	λ_{yt} , см/кВ (не менее), при номинальном напряжении, кВ	
	до 35 включительно	110-750
1	1,90	1,60
2	2,35	2,00
3	3,00	2,50
4	3,50	3,10

Если полученная удельная длина пути утечки будет незначительно уступать допустимой, число изоляторов N следует соответственно увеличить; если же отличие l_{UT} от λ_{yt} значительно, целесообразно перейти к использованию специальных грязестойких изоляторов, имеющих резко увеличенную длину пути утечки.

д) Определяется величина минимального изоляционного промежутка провод (либо арматура) – опора s_1 необходимая по условию воздействия рабочего напряжения. Для этого вычисляется расчетное значение среднего разрядного напряжения промежутка:

$$U_p = \frac{U_\phi}{k_\sigma \delta / K} \quad (7.5)$$

где δ / K – поправка на отличие плотности и влажности воздуха от стандартных. Величина δ / K принимается по данным рис. 3.6 для вероятности около 5%. В частности, для высоты до 1 000 м над уровнем моря $\delta / K = 0,84$, для 500 м — 0,89.

По найденному значению $\bar{U}_{P\sim}$ и кривой на рисунке 3.5 вычисляется необходимый изоляционный промежуток s_1 .

е) Определяется величина изоляционного промежутка s_{1k} , необходимая по условию воздействия коммутационных перенапряжений. Расчетное значение $U_{p.k}$ равно:

$$U_{p.k} = \frac{U_k}{k_o \delta / K} \quad (7.6)$$

По найденному значению $U_{p.k}$ и кривой на рисунке 7.6 определяется необходимый изоляционный промежуток $s_{1.k}$.

ж) Осуществляется координация импульсной прочности промежутка провод – опора и гирлянды. В основу координации кладется требование об их импульсной равнопрочности. Импульсное 50%-ное разрядное напряжение выбранной гирлянды (с учетом всех изоляторов в гирлянде) определяется по рисунку 7.6. По найденному значению разрядного напряжения и кривым зависимости разрядного напряжения от расстояния между электродами различной формы для промышленной частоты, определяется необходимый изоляционный промежуток s_{II} .

Задания

1. По описанной методике рассчитать изоляцию линии 330 кВ на железобетонной опоре с оттяжками. Предполагается применить гирлянды изоляторов ПС-120Б. Район загрязнения – первый. Высота трассы до 1 000 м над уровнем моря.

По формуле (7.3) определяем расчетное значение коммутационных перенапряжений:

$$U_k = k U_\phi \sqrt{2} = 727,5 \text{ кВ} \quad (7.7)$$

По формуле (7.4) находим среднее мокроразрядное напряжение гирлянды (для ВЛ 330 кВ $k_r=1$):

$$U_{MP} = 825 \text{ кВ} \quad (7.8)$$

Используя справочные данные, с помощью формулы (7.2) определяем необходимое число изоляторов П-8,5 в гирлянде 330 кВ:

$$n = 13.7 \approx 14 \text{ шт.} \quad (7.9)$$

Прибавив один запасной элемент, определяем полное число изоляторов П-8,5 в поддерживающей и натяжной гирлянде:

$$N = n + 1 = 15 \text{ шт.} \quad (7.10)$$

Вычисленное число изоляторов N проверяем на достаточность обеспечиваемой им удельной длины пути утечки:

$$\frac{Nl_{UT}}{U_{\phi}} = 2.45 \text{ см/кВ}_{\text{действ}} \quad (7.11)$$

что превышает норматив, установленный для первого района и приведенный в таблице 7.2 (1,6 см/кВ_{действ}).

6) По формулам (7.5) и (7.6) определяем расчетные значения разрядных напряжений, необходимые для определения промежутков s_1 и s_{IK} :

$$\bar{U}_{P\sim} = \frac{U_{\phi}}{k_{\sigma}\delta/k} = 415 \text{ кВ} \quad (7.12)$$

$$\bar{U}_{P.K} = \frac{U_k}{k_{\sigma}\delta/k} = 1120 \text{ кВ} \quad (7.13)$$

7) По кривым на рисунках 7.5 и 7.6 для найденных $\bar{U}_{P\sim}$ и $\bar{U}_{P.K}$ определяем величины изоляционных промежутков: $s_1 = 78 \text{ см}$, $s_{IK} = 210 \text{ см}$, выбираем наибольший необходимый промежуток.

8) Вычисляем по данным рисунка 7.6 импульсную прочность выбранной гирлянды 15хП-8.5 ($l_2 = 15 \cdot 20,3 = 3,04 \text{ м}$), снабженной защитной арматурой,

$$\bar{U}_{P.H}^{(+)} = 1540 \text{ кВ}_{\text{макс}} \quad (7.14)$$

Сравниваем получившееся значение с необходимым коммутационным напряжением, рассчитанным по формуле (7.13), если оно меньше, то

необходимо увеличить число изоляторов в гирлянде, если равно или больше, то

2. Рассчитать количество изоляторов в гирлянде для линии напряжением в 110 кВ на железобетонных опорах, степень загрязнения атмосферы – 4.

3. Определить необходимое количество изоляторов гибкой ошиновки ОРУ 330 кВ, степень загрязнения атмосферы – 3.

Контрольные вопросы

1. Приведите классификации изоляторов.

2. Назовите основные группы параметров изоляторов и отдельные их характеристики.

3. Опишите конструктивные особенности подвесных изоляторов.

4. В чем причина неравномерного распределения напряжения по гирлянде изоляторов.

5. Изоляция воздушных линий электропередач, основные составляющие и принципы построения.

6. Виды внешних воздействий на изоляцию линий электропередач.

7. Гирлянды подвесных изоляторов и распределение напряжения по изоляторам.

8. Схема замещения гирлянды подвесных изоляторов.

9. Пути развития разряда вдоль гирлянды подвесных изоляторов.

10. Методы улучшения распределения напряжения по гирлянде подвесных изоляторов.

11. Методы контроля изоляторов в гирлянде.

12. Расчет числа изоляторов в гирлянде на основе допустимой длины пути утечки.

13. Распределение напряжения по гирлянде изоляторов при постоянном напряжении.

Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме

Основная литература

1. Электроснабжение сельского хозяйства: учебник / т. Б. Лещинская, и. В. Наумов ; [ред. Г. В. Лихачёва]. - М. : Колос, 2008. - 655 с. – ISBN 978-5-9532-0560-3.

2. Расчет электрических полей устройств высокого напряжения : учеб. пособие / И. П. Белоедова, Ю. В. Елисеев, Е. С. Колечицкий и др. ; ред. Е. С. Колечицкий. - М.: ИД МЭИ, 2008. - 248 с. – ISBN 978-5-383-00072-4

Дополнительная литература

3. Техника высоких напряжений : учебник для вузов / под ред. Д. В. Разевига. – 2-е изд., пер. и доп. – М. : Энергия, 1976. – 488 с.

4. Техника высоких напряжений(изоляция и перенапряжение в электрических установках) : учебник для техникумов / В. П. Ларионов, В. В. Базуткин, Ю. Г. Сергеев ; под ред. В. П. Ларионова. – М. : Энергоиздат, 1982. – 296 с.

Практическое занятие №4

Тема: Электрический и тепловой расчет кабеля

Цель: Изучение методики электрического и теплового расчета изоляции кабельных линий электропередач.

Знания и умения, приобретаемые студентом при выполнении практического занятия: порядок электрического и теплового расчета кабельной изоляции, навык практического проведения расчета кабельной изоляции.

В результате выполнения практического занятия у студента формируются компетенции ПК-3 (способностью принимать участие в проектировании объектов профессиональной деятельности в соответствии с техническим заданием и нормативно-технической документацией, соблюдая различные технические, энергоэффективные и экологические требования).

Актуальность практического занятия обусловлена необходимостью студентов обладать навыками электрического и теплового расчета кабельных линий.

Теоретическая часть

В общем случае при переменном токе должны рассматриваться электромагнитные процессы в изоляции кабеля. Из курса ТОЭ известно, что если длина электромагнитной волны в изоляции значительно больше диаметра кабеля, то электрическое и магнитное поля можно рассматривать отдельно. При этом для потенциала электрического поля в изоляции U применимо уравнение Пуассона

$$\nabla^2 U + \frac{Q}{\varepsilon \varepsilon_0} = 0 \quad (8.1)$$

где Q — заряд единицы объема изоляции;

$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ ф/м}$ — диэлектрическая проницаемость вакуума;

∇^2 — оператор Лапласа;

ε — относительная диэлектрическая проницаемость изоляции.

При постоянной нагрузке в кабеле имеет место стационарное тепловое поле; при этом для температуры в изоляции T может быть записано уравнение

$$\nabla^2 T + \frac{q}{\lambda} = 0 \quad (8.2)$$

где q — выделение тепла в единицу времени в единице объема изоляции;

λ — теплопроводность изоляции.

При переменной нагрузке необходимы расчеты переходных тепловых процессов в кабеле, для которых справедливо уравнение

$$\nabla^2 T + \frac{q}{\lambda} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (8.3)$$

где $a = \lambda / C\gamma$; C — теплоемкость и γ — плотность диэлектрика. При расчете электрического и теплового полей в кабеле находят применение в основном три указанных уравнения, которые справедливы при постоянных

значениях $\varepsilon, \lambda, \gamma, C$.

Если в диэлектрике не имеется объемных зарядов и не выделяется тепло, то для электрического и теплового полей будут справедливы уравнения Лапласа:

$$\nabla^2 U = 0 \text{ и } \nabla^2 T = 0 \quad (8.4)$$

Как правило, температуру оболочки можно считать постоянной во всех точках. В этом случае при заданных потенциале или температуре жилы и оболочки получим одинаковую картину электрического и теплового полей. Поэтому при тепловом расчете можно использовать решения, найденные для электрического поля.

Решая приведенные выше уравнения, получим:

$$E = - \frac{U_0}{r \ln \frac{R}{r_0}} \quad (8.5)$$

Полученное уравнение справедливо лишь при постоянных электрических параметрах среды. Если среда неоднородна, то для простейшего случая радиального поля можно не решать общие сложные уравнения, а получить расчетные формулы более простым способом, который приводится ниже.

Для переменного тока промышленной частоты выражение имеет вид:

$$D = \varepsilon \varepsilon_0 E = -\varepsilon \varepsilon_0 \frac{\partial U}{\partial r} \quad (8.6)$$

где D – электрическое смещение

Для постоянного тока:

$$j = \gamma E = -\gamma \frac{\partial U}{\partial r} \quad (8.7)$$

где j – плотность тока в изоляции.

Для плотности теплового потока можно записать

$$-\lambda \frac{\partial \tau}{\partial r} = q \quad (8.8)$$

где превышение температуры в изоляции над температурой оболочки
 $\tau = T - T_{об}$

$T_{об}$ – температура оболочки;

q – тепловой поток через единицу поверхности в единицу времени.

Очевидна аналогия $D \sim j \sim q$ и $\varepsilon \varepsilon_0 \sim j \sim \lambda$

$$\frac{\partial U}{\partial r} \sim \frac{\partial \tau}{\partial r} \quad U \sim T \quad (8.9)$$

Соответственно для уравнений (8.6)-(8.9) можно записать интегральные соотношения:

$$-\frac{\partial U}{\partial r} = E = \frac{Q}{2\pi r \varepsilon \varepsilon_0} \quad (8.10)$$

$$-\frac{\partial U}{\partial r} = E = \frac{I}{2\pi r \gamma} \quad (8.11)$$

$$-\frac{\partial \tau}{\partial \rho} = \frac{q_{жс}}{2\pi r \lambda} \quad (8.12)$$

где Q — заряд;

I — общий ток утечки из жилы через изоляцию;

$P_{жс} = Qt$ — потери энергии в жиле.

Все величины относятся к единице длины кабеля.

Уравнения для всех трех полей одинаковы, поэтому с учетом аналогии (4.9) достаточно привести решение для одного из этих случаев.

Проинтегрируем уравнение (8.10) и подставим в качестве пределов радиусы по жиле и изоляции. Получим соотношение между зарядом на жиле и ее потенциалом;

$$U_0 = \frac{Q}{2\pi} \int_{r_0}^R \frac{dr}{\varepsilon \varepsilon_0 r} \quad (8.13)$$

Подставив значение Q из уравнения (8.10) в (8.13), получим:

$$E = \frac{U_0}{\varepsilon r \int_{r_0}^R \frac{dr}{\varepsilon r}} \quad (8.14)$$

и для емкости кабеля

$$C = \frac{Q}{U_0} = \frac{2\pi}{\int_{r_0}^R \frac{dr}{\varepsilon \varepsilon_0 r}} \quad (8.15)$$

При $\varepsilon = \text{const}$ емкость единицы длины кабеля вычисляется по формуле

$$C = \frac{2\pi\varepsilon\varepsilon_0}{\ln \frac{R}{r_0}} \quad (8.16)$$

Проинтегрировав (8.11), аналогичным образом получим формулы для постоянного тока;

$$E = \frac{U_0}{\gamma r \int_{r_0}^R \frac{dr}{\gamma r}} \quad (8.17)$$

$$E = \frac{U_0}{I} = \frac{1}{2\pi} \int_{r_0}^R \frac{dr}{\gamma r} \quad (8.18)$$

а при $\gamma = \text{const}$ сопротивление изоляции на единице длины кабеля

$$R_{из} = \frac{1}{2\pi\gamma} \ln \frac{R}{r_0} \quad (8.19)$$

Для теплового поля из уравнения (8.12) при $\lambda = \text{const}$ можно записать:

$$\tau_{ж} = \frac{p_{ж}}{2\pi\lambda} \ln \frac{R}{r_0} \quad (8.20)$$

где $\tau_{ж}$ — превышение температуры жилы над температурой оболочки. В соответствии с уравнением (8.20) можно ввести понятие о тепловом законе Ома:

$$\tau_{жс} = p_{жс} S_{из} \quad (8.21)$$

где $\tau_{жс}$ соответствует напряжению, $p_{жс}$ — току и $S_{из}$ — сопротивлению, причем из уравнения (8.21) следует, что тепловое сопротивление единицы длины кабеля

$$S_{из} = \frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{R}{r_0} \quad (8.22)$$

Из уравнений (8.12) и (8.21) можно получить зависимость превышения температуры в изоляции от радиуса кабеля:

$$\tau = \frac{p_{жс}}{2\pi\lambda} \ln \frac{R}{r} \quad (8.23)$$

Таким образом, к аналогии (8.9) после сравнения уравнений (8.19), (8.20) и (8.22) можно добавить аналогию

$$\frac{1}{C} \sim R_{из} \sim S_{из} \quad (8.24)$$

Величину $\ln \frac{R}{r_0}$ — можно рассматривать как геометрический коэффициент

(фактор) G , который зависит только от конфигурации электродов.

Из теории поля известно, что если поле подчиняется уравнению Лапласа, то при любой конфигурации электродов для однородной среды геометрический коэффициент будет одинаковым для электрического поля смещения, проводимости, а также для теплового поля. При этом достаточно знать одну из величин аналогии (8.24), чтобы рассчитать обе другие.

Если изоляционная среда неоднородна, то геометрический фактор будет одинаковым при условии, что зависимость параметров среды от радиуса будет одинаковой.

В соответствии с уравнением (8.5) в однородной изоляции напряженность электрического поля возле жилы максимальна и убывает по направлению к оболочке. В этом случае имеет место неполное использование электрической прочности изоляции, которое может быть количественно оценено коэффициентом использования изоляции:

$$\eta = \frac{E_{cp}}{E_{max}} = \frac{r_0 \ln \frac{R}{r_0}}{R - r_0} = \frac{\ln N}{N - 1} \quad (8.25)$$

где $N = R/r_0$

E_{cp} — средняя напряженность поля в кабеле, которая имела бы место в конденсаторе с плоскопараллельными электродами и толщиной изоляции Δ , равной $R - r_0$. В большинстве случаев толщина изоляции кабеля определяется максимально допустимой рабочей напряженностью E_p . При этом величина N может быть определена по формуле, которая следует из уравнения (8.5):

$$N = \frac{R}{r_0} = e^{\frac{r_0 E_p}{U}} \quad (8.26)$$

Из уравнений (8.14) и (8.17) следует, что при соотношении $\epsilon r = \text{const}$ (переменное напряжение) или $\gamma r = \text{const}$ (постоянное напряжение) напряженность поля будет постоянной и равной $E_{cp} = U / (R - r_0)$. При этом толщина изоляции будет минимальной, а коэффициент использования равен 1.

Практически при переменном напряжении уменьшение величины ϵ с увеличением радиуса производится ступенями. Такая изоляция называется градированной.

Если мы имеем слоистую изоляцию (рисунок 8.1), а величина ε каждого слоя составляет $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ и т. д., то из уравнения (48.14) можно получить зависимость напряженности поля от радиуса:

$$E = \frac{U}{\varepsilon r \left[\frac{1}{\varepsilon_1} \ln \frac{r_1}{r_0} + \frac{1}{\varepsilon_2} \ln \frac{r_2}{r_1} + \dots + \frac{1}{\varepsilon_n} \ln \frac{R}{r_{n-1}} \right]} \quad (8.27)$$

и соответственно емкость

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\varepsilon_i} \ln \frac{r_i}{r_{i-1}}} \quad (8.28)$$

Будем исходить из условия равнопрочности каждого слоя, причем электрическую прочность будем определять максимальной напряженностью поля, которая имеет место в начале слоя.

Примем допустимые (расчетные) максимальные напряженности каждого слоя $E_{1p}, E_{2p}, E_{3p}, \dots, E_{np}$ и введем обозначения:

$$f_1 = \frac{E_{1p}}{E_{(1+i)p}} \text{ и } \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_{1+i}} = k_i \quad (8.29)$$

Тогда из уравнения (8.29) можно получить:

$$\frac{E_{1p}}{E_{(1+i)p}} = \frac{\varepsilon_{1+i} r_i}{\varepsilon_1 r_0} \text{ или } r_i = f_i k_i r_0 \text{ и } \frac{r_{i+1}}{r_i} = \frac{f_{i+1} k_{i+1}}{f_i k_i} \quad (8.30)$$

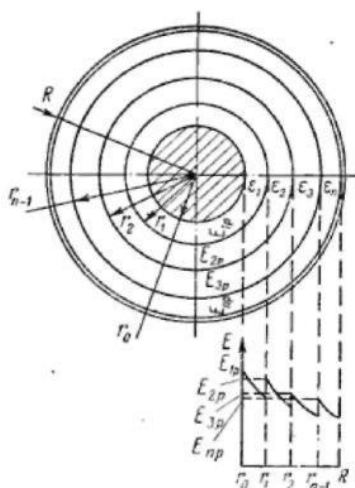


Рисунок 8.1 – Расположение слоев изоляции при градировании.

При этом на границе и в начале каждого слоя будем иметь расчетную напряженность поля, соответствующую этому слою.

После подстановки соотношений (8.30) в уравнение (8.27) и алгебраических преобразований можно получить:

$$N = \frac{R}{r_0} = f_{n-1} k_{n-1} e^{\frac{1}{k} \left(\frac{U}{r_0 E_{1p}} - \ln f_1 k_1 - k_1 \ln \frac{f_2 k_2 \dots k_{n-2} \ln \frac{f_{n-1} k_{n-1}}{f_{n-2} k_{n-2}} \right)} \quad (8.31)$$

Очевидно, что градирование имеет смысл лишь при

$$\frac{f_{i+1} k_{i+1}}{f_i k_i} > 1 \text{ и } f_i k_i > 1 \quad (8.32)$$

что следует из соотношений (4.30).

Многослойное градирование с изменением диэлектрической проницаемости возможно для кабелей с резиновой и пластмассовой изоляцией.

В отечественной практике кабели с бумажной изоляцией градируются в два слоя, так как диапазон плотности бумаги лежит в пределах 1,2 – 0,85 г/см³, а допуск на плотность бумаги составляет 0,05 г/см³. При этом ε пропитанной бумаги составляет 4,3 при наибольшей плотности и 3,5 при наименьшей.

При двухслойном градировании

$$N = \frac{R}{r_0} = f k e^{\frac{1}{k} \left(\frac{U}{r_0 E_{1p}} - \ln f k \right)} \text{ и } r_1 = f k r_0 \quad (8.33)$$

При расчете изоляции кабеля необходимо учитывать, что кабельные линии во время эксплуатации, помимо длительно приложенного рабочего напряжения, подвергаются воздействию внутренних и атмосферных перенапряжений, величина и длительность которых определяются параметрами сети и установленной аппаратуры.

Необходимо учитывать также неоднородность изоляции по длине кабеля за счет различного взаимного расположения зазоров между бумажными лентами и наличия морщин, вмятин и других дефектов. В связи с этим для выбора изоляции целесообразно установить два расчетных напряжения: промышленной частоты и импульсное. Конструирование изоляции должно производиться с учетом обоих видов напряжений.

Учет различных факторов, определяющих расчетные напряжения, удобно производить в виде соответствующих коэффициентов. Расчетные напряжения промышленной частоты могут быть выбраны по формуле

$$U = k_1 k_2 k_3 k_4 \frac{U_H}{\sqrt{3}} \quad (8.34)$$

где U_H – номинальное линейное напряжение системы.

Коэффициент k_1 учитывает наибольшее возможное повышение рабочего напряжения и обычно принимается равным 1,16.

Коэффициент k_2 учитывает возможные отклонения фактической пробивной прочности изоляции от среднего значения, принимаемого при конструировании изоляции. Практически расположение зазоров между бумажными лентами распределяется по статистической закономерности. Теоретически пробивное напряжение изоляции кабелей может изменяться в пределах 15–20%. Кроме того, наличие вмятин, морщин и других дефектов может снизить электрическую прочность примерно на 10–25% в зависимости от совершенства технологии изготовления кабеля. Поэтому коэффициент k_2 выбирается в пределах 1,25—1,50.

Коэффициент k_3 учитывает уровень внутренних перенапряжений, действующих на кабельную линию. Опыт эксплуатации кабельных линий показывает, что максимальные перенапряжения в сетях напряжением 110 кВ достигают $3,1 U_{\phi}$ и постепенно уменьшаются с повышением напряжения до $2,25 U_{\phi}$ в сетях напряжением 500 кВ. В большинстве случаев перенапряжения имеют кратность 2,50–2,25. Учитывая, что

максимальные перенапряжения имеют место весьма редко, коэффициент k_3 может быть принят равным 2,25 для линий напряжением 500 кВ и 2,50 для линий напряжением 110 кВ.

Коэффициент k_4 учитывает уменьшение пробивного напряжения при снижении давления масла от расчетной величины до минимально допустимого значения, определяемого аппаратурой подпитки линии. Он обычно находится в пределах 1,10–1,20.

Таким образом, общий коэффициент запаса составляет 3,3—5,0, причем меньшее значение выбирается при надежной защите сети от перенапряжений, использовании наиболее качественных материалов и высокой культуре производства.

Таблица 8.1 – Испытательные импульсные напряжения.

Номинальное напряжение, кВ	Наибольшее рабочее линейное напряжение, кВ _{действ}	$U_{исп}$ по МЭК, кВ		
		минимальное	нормальное	облегченное
33	36	154	170	—
110	123	400	550	450
132	145	420	650	550
150	170	560	750	650
220	245	820	1050	900
380	420	1360	1550	1425

Выбор величины расчетного импульсного напряжения может быть произведен по формуле

$$U_2 = k_{имп} U_{исп} \quad (8.35)$$

где $U_{исп}$ — испытательное импульсное напряжение, соответствующее

уровню импульсной прочности по рекомендации Международной электротехнической комиссии (МЭК). Величина $U_{исп}$ приведена в таблице 8.1.

Минимальное испытательное напряжение рекомендуется для кабелей не имеющих непосредственного электрического соединения с воздушными линиями передач, а облегченное – для кабелей, имеющих непосредственное соединение с воздушной линией передач в системах с надежно заземленной нейтралью.

Таблица 8.2 – Длительно допустимые температуры изоляции кабелей.

Тип кабеля	номинальное напряжение, кВ	Допустимая температура кабеля, °С	
		длительно	кратковременно (не более 100 ч в общей сложности)
Маслонаполненные	35	80	90
	110	70	80
	220	60	75
В стальных трубах с маслом под давлением	110	70	80
	220	65	75
	500	60	70
Газонаполненные	35	80	90
	110	—	—
	220	—	—
С изоляцией из сшитого полиэтилена	10-500	90	При протекании токов КЗ — до 250

Коэффициент $k_{имп}$ учитывает неоднородность изоляции и снижение пробивной прочности с увеличением числа импульсов. Величина $k_{имп}$ выбирается в пределах от 1,10-1,30.

Вопрос о предельно допустимой температуре кабеля имеет большое значение, так как от нее зависят срок службы кабеля и надежность его работы. При нагревании кабеля наиболее быстрому старению подвергается изоляция, механическая прочность и эластичность которой при этом понижаются. Значения длительно допустимых температур в кабелях, принятые в различных странах, приведены в таблице 8.2.

Основной целью теплового расчета является определение величины допустимого тока, при котором наибольшая температура в кабеле не превысит установленного значения

При включении постоянной нагрузки температура кабеля постепенно нарастает (неустановившийся режим) и после определенного промежутка времени принимает постоянное значение.

Практически наибольшая температура всегда соответствует жилам кабеля и слоям изоляции, непосредственно прилегающим к жилам. Поэтому тепловой расчет кабеля прежде всего сводится к определению температуры токоведущей жилы.

Ранее было введено понятие о тепловом сопротивлении кабеля (уравнение (8.22)). Аналогично можно рассматривать и тепловое сопротивление среды, окружающей кабель, S_0 . Тогда температура жилы без учета потерь в диэлектрике может быть выражена упрощенной формулой

$$T_{жс} = P_{жс} S_{из} + \sum P_k (S_0 + S_n) + T_0 \quad (8.36)$$

где T_0 — температура окружающей среды;

$\sum P_k$ — суммарные потери в кабеле; S_n — тепловое сопротивление защитных покровов; S_0 — тепловое сопротивление окружающей среды.

Таким образом, для теплового расчета необходимо произвести следующие вычисления:

1. Определение потерь в жиле $P_{жс}$, оболочках $P_{об}$ и изоляции (диэлектрические потери) P_d кабеля.

2. Определение тепловых сопротивлений:

- а) изоляции кабеля и его защитных покровов;
- б) среды, окружающей кабель.

Кроме того, необходимо учесть колебания температуры окружающей среды T_0 за счет сезонных изменений температуры и посторонних источников тепла. Потери в токопроводящей жиле на единице длины

кабеля при постоянном токе вычисляются по формуле

$$P_{\text{жс}} = I^2 R_{\text{жс}} \quad (8.37)$$

$$R_{\text{жс}} = \frac{\rho_0}{q} [1 + \alpha(T - 20)](1 + k_0) \quad (8.38)$$

где I — ток в жиле, А; q — сечение жилы, мм^2

ρ_0 — удельное электрическое сопротивление жилы при 20°C ; α — температурный коэффициент увеличения сопротивления меди и алюминия ($0,004 \text{ град}^{-1}$); k_0 — коэффициент, учитывающий удлинение жил при скручивании, который может быть взят из таблицы 4.3.

Таблица 8.3 — Значения коэффициента k_0 для различных конструкций кабелей

Конструкция кабеля	k_0
Одножильные кабели с сечением жилы менее 500 мм^2	0,03
Одножильные кабели с сечением жилы $500\text{—}1000 \text{ мм}^2$	0,04
Одножильные кабели с сечением жилы свыше 1000 мм^2	0,05
Многожильные кабели (независимо от сечения жилы) .	0,04

Потери при переменном токе вычисляются по формуле

$$P_{\text{жс}} = I^2 R_{\text{жс}} \quad (8.37)$$

$$R_{\text{жс}} = R_{\text{жс}} [1 + y_{\text{П}} + y_{\text{Б}}] \quad (8.38)$$

где коэффициенты вычисляются по следующим формулам:

$$y_{\text{П}} = x^4 / (192 + 0,8x^4) \quad (8.39)$$

$$x^2 = (8\pi f k / R_{\text{жс}}) \cdot 10^{-7} \quad (8.40)$$

$$y_{\text{Б}} = y_{\text{П}} (d_{\text{ж}} / S)^2 \quad (8.41)$$

$$y_{\text{Б}} = y_{\text{П}} (d_{\text{ж}} / S)^2 [0,312(d_{\text{ж}} / S)^2 + 1,18 / (y_{\text{П}} + 0,27)] \quad (8.42)$$

f — частота сети, Гц, $d_{\text{ж}}$ — наружный диаметр жилы кабеля, S — расстояние между центрами жил кабеля, k — коэффициент, зависящий от конструкции кабеля (таблица 8.4). При этом для расчета $y_{\text{П}}$ по формулам (8.39-8.40) берется коэффициент из столбца поверхностный эффект, а при расчете коэффициента $y_{\text{Б}}$ берется коэффициент из столбца эффект близости.

Формула (8.41) используется для двухжильных кабелей или двух рядом расположенных кабелей, а (8.42) – для трехжильных и трех рядом расположенных кабелей. При прокладке кабеля в стальной трубе используется формула:

$$R_{ж\sim} = R_{ж\equiv} \lceil 1 + 1,7 (y_{II} + y_B) \rceil \quad (8.43)$$

Таблица 8.4 – Значения коэффициента k для различных конструкций жил

Тип жилы	Поверхностный эффект	Эффект близости
Круглая, скрученная (уплотненная и неуплотненная)	1	0,8
Круглая, состоящая из четырех изолированных друг от друга секторов или сегментов (с центральным каналом или без него)	0,435	0,37
Полая	$k = \frac{d_{ж} - d_{к}}{d_{ж} + d_{к}} \left(\frac{d_{ж} + 2d_{к}}{d_{ж} + d_{к}} \right)^2$	0,8
Секторной формы	1	0,8

Потери в проводящих оболочках кабеля состоят из потерь на вихревые токи, при расчете данными видами потерь, как правило, пренебрегают, и потерь на продольные токи, которые можно оценить по следующим формулам:

а) для трех кабелей, проложенных по вершинам треугольника

$$y_{об} = \frac{R_{об}}{R_{ж}} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{R_{об}}{X} \right)^2} \quad (8.44)$$

где $R_{об} = \rho_{об} / \pi (r_{об.н} - r_{об.в})^2$, $\rho_{об}$ – удельное сопротивление материала

оболочки, $r_{ОБ.Н}$ – наружный радиус оболочки, $r_{ОБ.В}$ – внутренний радиус оболочки; $X = 2\omega \cdot 10^{-7} \ln(2S / r_{ОБ.Н} + r_{ОБ.В})$; ω – круговая частота тока в кабеле.

б) для кабелей, расположенных в одной плоскости:

$$y_{ОБ2} = \frac{R_{ОБ}}{R_{Ж}} \cdot \frac{Q^3}{R_{ОБ}^2 + Q^2} \quad (8.45)$$

$$y_{ОБ1,3} = \frac{R_{ОБ}}{R_{Ж}} \cdot \left[\frac{0,25N^2}{R_{ОБ}^2 + N^2} + \frac{0,25Q^2}{R_{ОБ}^2 + Q^2} \pm \frac{2R_{ОБ}NQX_m}{\sqrt{3}(R_{ОБ}^2 + N^2)(R_{ОБ}^2 + Q^2)} \right] \quad (8.46)$$

$$N = X + X_m \quad (8.47)$$

$$Q = X + \frac{X_m}{3} \quad (8.48)$$

$$X_m = 2\omega \cdot 10^{-7} \ln 2 \quad (8.49)$$

Для среднего кабеля используется формула (8.45), для крайних кабелей – формула (8.46).

Расчет теплового сопротивления изоляции одножильного кабеля без учета диэлектрических потерь может быть проведен по следующей форме:

$$S_{из} = \frac{\sigma_{из}}{2\pi} \ln \frac{R}{r_0} \quad (4.50)$$

где $\sigma_{из}$ — удельное тепловое сопротивление изоляции, °С·м/Вт.

Расчет теплового сопротивления защитных покровов производится по такой же формуле, но под знак логарифма необходимо подставлять отношение радиуса с защитными покровами к радиусу без защитных покровов.

Таблица 8.5 – Удельные тепловые сопротивления различных материалов

Материал			$\sigma_{из},$ °С·м/Вт	Теплоем- кость С, ккал/кг·°С	Плотность, г/см
Бумажная изоляция с вязкой пропиткой	В состоянии поставки	1 – 10 кВ	5-6,5	0,33	1,252
		20 и 35 кВ	5-5,5	0,33	1,252
	В нормальной эксплуатации	1 – 10 кВ	6-7	0,33	1,252
		20 и 35 кВ	5,5-6	0,33	1,252

	Газонаполненный, обедненная пропитка	6,5-7		
Бумажная изоляция маслонаполненных кабелей		4,5-5	0,33	1,252-1,365
Полиэтилен		3-4	0,55	0,95
Полихлорвиниловый пластикат		6-7	0,32	1,25
Резина		5-7	0,33—0,4	1,4
Кабельная пряжа		5,5-6	—	—
То же с ленточной броней		3	—	—
Медь		0,0027	0,091	8,89
Алюминий		0,0048	0,22	2,7
Свинец		0,029	0,031	11,34
Сталь		0,014-0,012	0,11	7,8
Минеральное масло		9	0,40	0,9
Почва с повышенной влажностью: песок >9%, песчано-глинистая >14%		0,8	До 0,50	2,80—2,0
Почва с нормальной влажностью: песок 7—9%, песчано-глинистая 12—14%		1,2	0,20	1,9
Почва с пониженной влажностью: песок 4—7%, песчано-глинистая 8—12%		1,8	0,20	1,8
Сухая почва: Песок 4% влаги. Каменистая почва		2,4	0,19	1,43
Бетон		0,9	0,20	2,2
Асфальт		1,6	0,40	1,0

Величины удельных тепловых сопротивлений различных материалов приведены в таблице 8.5. Тепловые потери в диэлектрике в отличие от потерь в жиле распределены по всей изоляции кабеля, поэтому расчет превышения температуры жилы кабеля за счет диэлектрических потерь будет несколько иным.

При наличии потерь в жиле и изоляции перепад температур между жилой и оболочкой можно вычислять по формуле

$$\tau_{жс} = \left(P_{жс} + \frac{P_D}{2} \right) S_k \quad (8.51)$$

При определении температуры кабелей диэлектрические потери в изоляции учитываются только в кабелях на напряжение 100 кВ и выше, так как в современных кабелях на меньшее напряжение диэлектрические потери весьма малы по сравнению с потерями в меди.

Определение теплового сопротивления окружающей среды.

Кабель, проложенный в воздухе, охлаждается путем переноса тепла от наружной поверхности к окружающему воздуху путем конвекции. Наряду с этим некоторое значение имеет и передача тепла посредством теплового излучения.

Охлаждение кабеля может быть различным в зависимости от скорости и направления перемещения воздуха (обдувания). На практике для расчетов обычно принимают среднее значение коэффициента теплопередачи для свободной конвекции.

При прокладке в туннелях и каналах следует учитывать общий нагрев воздуха в туннеле, наличие горячих восходящих потоков воздуха от расположенных ниже кабелей и нагретых труб.

Как правило, воздушное охлаждение менее эффективно, чем охлаждение при прокладке в земле, за исключением некоторых случаев, когда прокладка кабелей производится на большой глубине. На кабели напряжением до 10 кВ нагрузка в воздухе обычно снижается по сравнению с нагрузкой в земле примерно на 20—30%.

При прокладке в воздухе превышение температуры поверхности кабеля над температурой окружающего воздуха может быть вычислено по формуле

$$\vartheta_{об} = S_B \sum p \quad (8.52)$$

где $\sum p$ — сумма всех потерь в кабеле;

S_B — сопротивление теплопередачи к воздуху.

Сопротивление теплопередачи от поверхности кабеля в воздух зависит от диаметра кабеля, состояния его поверхности, разности температур между кабелем и воздухом и средней температуры воздуха. Расчет конвективной теплопередачи может быть произведен по критериальным уравнениям теории теплопередачи.

На практике пользуются обычно упрощенными формулами. Простейшая эмпирическая формула для расчета сопротивления теплоперехода в воздух имеет вид:

$$S_B = \frac{A}{\pi D_H} \quad (8.53)$$

где A – удельное сопротивление теплопереходу от поверхности кабеля в воздух, град·см²/вт выбирается по табл. 4.6; D_H — наружный диаметр кабеля, см.

Таблица 8.6 – Зависимость удельного сопротивления теплоперехода воздух-кабель.

Диаметр кабеля, см		2,5	5,0	7,5	10,0	22,0
Величина A , град·см ² /вт	Кабель слабо нагружен	1000	1150	1200	1150	1000
	Кабель сильно нагружен	800	1000	1000	950	800

При прокладке кабеля в земле поверхности грунта и кабеля можно приближенно принять за изотермические. Тогда, пользуясь методом зеркальных отображений для однородного грунта, по аналогии с электрическим полем можно получить формулу для теплового сопротивления земли:

$$S_3 = \frac{\sigma_3}{2\pi} \ln \left[\frac{2L}{D_H} + \sqrt{\frac{4L^2}{D_H^2} - 1} \right] \approx \frac{\sigma_3}{2\pi} \ln \frac{4L}{D_H} \quad (8.54)$$

$$S_3 = \frac{\sigma_3}{2\pi} \left[\ln \frac{4L}{D_H} + 2 \ln \frac{L}{D_H} \right] \quad (8.55)$$

$$S_3 = \frac{\sigma_3}{2\pi} \left[\ln \frac{4L}{D_H} + \ln \frac{4L^2 + S^2}{S^2} \right] \quad (8.56)$$

где σ_3 — удельное тепловое сопротивление земли, окружающей кабель, град·см²/Вт; D_H — наружный диаметр кабеля, м, L — глубина прокладки кабеля, м.

Формула (8.54) используется для одиночного кабеля, (8.55) — для трех кабелей, расположенных по треугольнику, (8.56) — для трех кабелей, расположенных в одной плоскости.

При постоянной температуре поверхности грунта в установившемся режиме тепло будет отводиться только к поверхности грунта.

Удельное тепловое сопротивление грунта сильно зависит от структуры почвы и содержания в ней влаги, как это видно из таблицы 4.5.

Для расчета допустимого тока нагрузки в жиле необходимо построить схему замещения тепловых сопротивлений и потоков для рассматриваемой конкретной конструкции кабеля и условий прокладки.

Для одножильного кабеля, проложенного в воздухе, в соответствии с тепловым законом Ома можно записать:

$$\vartheta_{\text{ж}} = T_{\text{ж}} - T_0 = \left(P_{\text{ж}} + \frac{P_{\text{д}}}{2} \right) S_{\text{из}} + (P_{\text{ж}} + P_{\text{д}} + P_{\text{об}}) (S_{\text{зп}} + S_{\text{в}}) \quad (8.57)$$

Если подставить в уравнение (8.57) значение потерь, то для допустимого тока нагрузки получим:

$$I = \sqrt{\frac{T_{\text{макс}} - T_0 - P_{\text{л}} \left(\frac{S_{\text{из}}}{2} + S_{\text{зп}} + S_{\text{в}} \right)}{R_{\text{ж}} \left[S_{\text{из}} + (1 + y_{\text{об}})(S_{\text{зп}} + S_{\text{в}}) \right]}} \quad (8.58)$$

где $T_{\text{макс}}$ – максимально допустимая температура жилы, выбираемая по таблице 8.2.

Задания

1. Рассчитать радиус по изоляции кабеля и радиус первого слоя изоляции кабеля, если последняя состоит из двух слоев. Для первого слоя $\varepsilon_1=4,3$; $E_{1\text{п}}=12,5$ кВ/мм. Для второго слоя $\varepsilon_2=3,5$; $E_{2\text{п}}=11,8$ кВ/мм. Радиус жилы $r_0=12,2$ мм. Напряжение линии $U = 220$ кВ.

Решение.

Рассчитываем предварительно величины: $k = \varepsilon_1 / \varepsilon_2 = 4.3 / 3.5 = 1.23$ и $f = E_{1\text{п}} / E_{2\text{п}} = 1.064$

Затем определяем расчетные напряжения:

$$U_1 = k_1 k_2 k_3 k_4 \frac{U_H}{\sqrt{3}} = 1.16 \cdot 1.25 \cdot 2.5 \cdot 1.1 \cdot 127 = 506,5 \text{ кВ} \quad (8.59)$$

$$U_2 = k_{\text{имп}} U_{\text{исп}} = 1,2 \cdot 900 = 1080 \text{ кВ} \quad (8.60)$$

Так как импульсная прочность бумажно-масляной изоляции намного больше, чем прочность при напряжении промышленной частоты, то выбираем в качестве расчетного напряжение промышленной частоты.

Далее по формуле (4.33) получим

$$R = r_0 f k e^{\frac{1}{k} \left(\frac{U_1}{r_0 E_{1\text{п}}} - \ln f k \right)} = 191,3 \text{ мм и } r_1 = f k r_0 = 15,8 \text{ мм} \quad (8.61)$$

Толщина изоляции $\Delta = R - r_0 = 179,1$ мм.

Следует отметить, что при градировании наибольший эффект достигается при большой величине соотношения радиусов R/r_0 , так как при малом соотношении радиусов неравномерность поля невелика и выравнивание поля при градировании лишь незначительно сказывается на уменьшении толщины изоляции.

2. Рассчитать изоляцию маслонаполненного кабеля высокого давления напряжением $U=220$ кВ. Радиус жилы $r_0=12,2$ мм, диаметр канала 10 мм.

Решение.

Для выполнения изоляции кабеля выбираем бумагу толщиной 0.075 ($\gamma=1,1-1,2$); 0,125 мм ($\gamma=0,85-0,9$).. Данные о свойствах выбранной бумаги введены в таблице 4.7.

Таблица 8.7 – Данные для расчета

№ слоя	Толщина бумаги	Плотность бумаги г/см ³	ε	Прочность при переменном напряжении промышленной частоты, $E_{np}^{(1)}$ кВ/мм	Прочность при импульсном напряжении, $E_{np}^{(2)}$ кВ/мм	$f_1 = \frac{E_{1np}^{(1)}}{E_{2np}^{(1)}}$	$f_2 = \frac{E_{1np}^{(2)}}{E_{2np}^{(2)}}$	$k=\varepsilon_1/\varepsilon_2$
1	0,075	1,1–1,2	4,3	50	100			
2	0,125	0,85–0,90	3,5	47	90	1,061	1,11	1,23

Расчетные напряжения выбираем аналогично с задачей 4.1

По формуле (4.33) находится соотношение радиусов.

При промышленной частоте

$$N_1 = \frac{R}{r_0} = k f_1 e^{\frac{1}{k} \left(\frac{U_1}{r_0 E_1} - \ln f_1 k \right)} = 2.07 \quad (8.62)$$

При импульсном напряжении

$$N_2 = \frac{R}{r_0} = k f_2 e^{\frac{1}{k} \left(\frac{U_2}{r_0 E_1} - \ln f_2 k \right)} = 2.18 \quad (8.63)$$

Из двух вычисленных значений N выбирается большее ($N_2=2,18$).

Таким образом, толщину изоляции кабеля будет в данном случае определять импульсное напряжение.

При низком и среднем давлениях толщину изоляции, как правило, определяет напряжение промышленной частоты.

Находим радиус $R = N_2 r_0 = 26.6$ мм; Толщина изоляции $\Delta_{из} = R - r_0 = 14.4$ мм.

Радиус r_1 начиная с которого необходимо производить наложение бумаги с меньшей диэлектрической проницаемостью (0,125 мм), определяется по формуле (8.33): $r_1 = k f_1 r_0 = 16.6$ мм.

Толщина слоя уплотненной бумаги (0,075 мм) составит $\Delta_{из} = r_1 - r_0 = 4.4$ мм. Далее необходимо проверить величину напряженности поля во втором (при $r = r_1$) слое при расчетном напряжении $U_1 = 508$ кВ. Формулы (8.63) выведены из условия наличия слоев заданной напряженности на границе. Поэтому при напряжении $U_2 = 1080$ кВ напряженность электрического поля составит: при $r = r_0$ $E_{r_0}^{(2)} = 100$ кВ/мм; при $r = r_1$ $E_{r_1}^{(2)} = 90$ кВ/мм.

Очевидно, что при напряжении $U_1 = 508$ кВ напряженность уменьшится в 2,12 раз. Тогда для U_1 напряженность поля составит: при $r = r_0$ $E_{r_0}^{(1)} = 47.1$ кВ/мм; при $r = r_1$ $E_{r_1}^{(1)} = 42.5$ кВ/мм

Таким образом, напряженность поля при расчетном напряжении промышленной частоты не превышает пробивной напряженности (таблица 8.7) для всех слоев.

3. Провести расчет допустимого тока группы из трех кабелей из задачи 2, проложенных по вершинам треугольника, глубина прокладки кабелей в земле 1,5 м. кабели выполненными бронированными, толщина брони 1 мм, толщина свинцовой оболочки 3 мм, толщина защитных покровов 5 мм.

Решение

Зададимся значениями температуры окружающей среды $T_0 = 20^\circ\text{C}$, максимально допустимой температуры жилы кабеля по таблице 4.2 $T_{\text{макс}} = 60^\circ\text{C}$.

Затем рассчитаем сопротивление жилы кабеля:

$$R_{жс} = \frac{\rho_0}{q} [1 + \alpha(T_{жс} - 20)](1 + k_0) = 2,054 \cdot 10^{-4}, \text{ Ом} \quad (8.64)$$

Где; $q = \pi(r_0 - r_k)^2 = 1,63 \cdot 10^{-4}, \text{ м}^2$; $\rho_0 = 0,027 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $\alpha = 0,004$; $k_0 = 0,03$

$$R_{жс\sim} = R_{жс} [1 + y_{II} + y_B] = 2,055 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \quad (8.65)$$

где коэффициенты вычисляются по следующим формулам:

$$y_{II} = x^4 / (192 + 0,8x^4) = 9,94 \cdot 10^{-5} \quad (8.66)$$

$$x^2 = (8\pi f k / R_{жс}) \cdot 10^{-7} = 0,138 \quad (8.67)$$

Для расчета коэффициента y_B

$$y_{II} = x^4 / (192 + 0,8x^4) = 7,8 \cdot 10^{-5} \quad (8.68)$$

$$x^2 = (8\pi f k / R_{жс}) \cdot 10^{-7} = 0,122 \quad (8.69)$$

$$y_B = y_{II} (d_{жс} / S)^2 [0,312(d_{жс} / S)^2 + 1,18 / (y_{II} + 0,27)] = 1,58 \cdot 10^{-4} \quad (8.70)$$

$$f = 50 \text{ Гц}, d_{жс} = 24,4 \text{ мм}, S =, k = \frac{d_{жс} - d_K}{d_{жс} + d_K} \left(\frac{d_{жс} + 2d_K}{d_{жс} + d_K} \right)^2 = 0,9$$

Далее вычисляем потери в защитных оболочках кабеля:

а) для свинцовой оболочки

$$y_{ОБ1} = \frac{R_{ОБ}}{R_{жс}} \cdot \frac{1}{1 + (R_{ОБ} / X)^2} = 1,68 \cdot 10^{-4} \quad (8.71)$$

где $R_{ОБ} = \rho_{ОБ} / \pi(r_{ОБ.Н}^2 - r_{ОБ.В}^2) = 4,04 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}$, $\rho_{ОБ} = 0,214 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$,
 $r_{ОБ.Н} = 29,6 \text{ мм}$, $r_{ОБ.В} = 26,6 \text{ мм}$; $X = 2\omega \cdot 10^{-7} \ln(2S / r_{ОБ.Н} + r_{ОБ.В}) = 1,62 \cdot 10^{-5}$;

б) для стальной брони

$$y_{OB2} = \frac{R_{OB}}{R_{Ж}} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{R_{OB}}{X}\right)^2} = 1.68 \cdot 10^{-4} \quad (8.72)$$

где $R_{OB} = \rho_{OB} / \pi (r_{OB.H}^2 - r_{OB.B}^2) = 7,3 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}$, $\rho_{OB} = 0,138 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$,
 $r_{OB.H} = 30,6 \text{ мм}$, $r_{OB.B} = 29,6 \text{ мм}$; $X = 2 \omega \cdot 10^{-7} \ln(2S / r_{OB.H} + r_{OB.B}) = 1.18 \cdot 10^{-5}$;

Найдем суммарные потери в оболочках

$$y_{OB} = y_{OB1} + y_{OB2} = 4,88 \cdot 10^{-3} \quad (8.73)$$

Определим диэлектрические потери в кабеле, для этого вычислим емкость кабеля на единицу длины:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\frac{1}{\epsilon_1} \ln \frac{r_1}{r_0} + \frac{1}{\epsilon_2} \ln \frac{R}{r_1}} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}}{\frac{1}{4,3} \ln \frac{16,6}{12,2} + \frac{1}{3,5} \ln \frac{26,6}{16,6}} = 0,27 \text{ нФ/м} \quad (8.74)$$

Диэлектрические потери рассчитаем по формуле:

$$P_d = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta = 127^2 \cdot 314 \cdot 0,0045 \cdot 0,27 \cdot 10^{-9} = 6,157 \text{ Вт/м} \quad (8.75)$$

Таблица 8.8 – Характеристики некоторых типов изоляции кабелей

Тип кабеля	ϵ	$\operatorname{tg} \delta$
Кабели с пропитанной бумажной изоляцией:		
С вязкой пропиткой, с полностью или предварительно пропитанной изоляцией и пропитанные нестекающей массой	4	0,01
Маслонаполненные низкого давления	3,3—3,75	0,004–0,0045
Маслонаполненные высокого давления в стальном трубопроводе	3,7	0,0045
газонаполненные	3,4-3,5	0,004 -0,0045

Кабели с изоляцией из других материалов:		
Из резины на основе бутылкаучука	4,5	0,05
Из этиленпропиленовой резины	3	0,040
Из поливинилхлорида	8	0,1
Из термопластичного полиэтилена	2,3	0,001
Из сшитого полиэтилена	2,5	0,0008

Далее рассчитаем тепловые сопротивления элементов кабеля:

$$S_{из} = \frac{\sigma_{из}}{2\pi} \ln \frac{R}{r_0} = 0,619, \text{ C}\cdot\text{м/Вт} \quad (8.76)$$

где $\sigma_{из}=5 \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{м/Вт}$.

$$S_{3П} = \frac{\sigma_{3П}}{2\pi} \ln \frac{R + \Delta_{ОБ} + \Delta_B + \Delta_{3П}}{R + \Delta_{ОБ} + \Delta_B} = \frac{6}{2 \cdot 3,14} \ln \frac{35,6}{30,6} = 0,145, \text{ C}\cdot\text{м/Вт} \quad (8.76)$$

где $\sigma_{из}=6 \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{м/Вт}$.

$$S_B = \frac{\sigma_B}{2\pi} \left[\ln \frac{4L}{D_H} + 2 \ln \frac{L}{D_H} \right] = 1,341 \text{ C}\cdot\text{м/Вт} \quad (8.77)$$

где $\sigma_B=0,8 \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{м/Вт}$.

После всего подставляем все рассчитанные значения в формулу (8.58) и вычисляем максимально допустимый ток в кабеле.

$$I = \sqrt{\frac{T_{\text{макс}} - T_0 - P_{\text{д}} \left(\frac{S_{из}}{2} + S_{3П} + S_B \right)}{R_{ж\sim} \left[S_{из} + (1 + y_{об}) (S_{3П} + S_B) \right]}} = 279,7 \text{ А.} \quad (8.78)$$

4. Провести расчет допустимого тока группы из трех кабелей на напряжение 330 кВ, проложенных по вершинам треугольника, глубина прокладки кабелей в земле 1,2 м. кабели выполненными бронированными, толщина брони 3 мм, толщина свинцовой оболочки 3 мм, толщина

защитных покровов 6 мм. Изоляция – бумажно-масляная под высоким давлением.

5. Провести электрический расчет кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 35 кВ, сечением 400 мм².

Контрольные вопросы.

1. Особенности работы изоляции на постоянном напряжении.
2. Допустимые испытательные постоянные напряжения для оборудования переменного тока.
3. Контроль изоляции с применением повышенного постоянного напряжения.
4. Маркировка силовых кабелей.
5. Кабели на напряжение до 1 кВ.
6. Кабели с полиэтиленовой изоляцией.
7. Кабели с бумажно-масляной изоляцией.
8. Особенности конструкции кабелей на напряжение 35 кВ и выше.
9. Электрический расчет кабеля.
10. Последовательность теплового расчета кабеля.

Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме

Основная литература

1. Электроснабжение сельского хозяйства: учебник / т. Б. Лещинская, и. В. Наумов ; [ред. Г. В. Лихачёва]. - М. : Колос, 2008. - 655 с. – ISBN 978-5-9532-0560-3.
2. Расчет электрических полей устройств высокого напряжения : учеб. пособие / И. П. Белоедова, Ю. В. Елисеев, Е. С. Колечицкий и др. ; ред. Е. С. Колечицкий. - М.: ИД МЭИ, 2008. - 248 с. – ISBN 978-5-383-00072-4

Дополнительная литература

3. Техника высоких напряжений : учебник для вузов / под ред. Д. В. Разевига. – 2-е изд., пер. и доп. – М. : Энергия, 1976. – 488 с.
4. Техника высоких напряжений(изоляция и перенапряжение в электрических установках) : учебник для техникумов / В. П. Ларионов, В.

В. Базуткин, Ю. Г. Сергеев ; под ред. В. П. Ларионова. – М. : Энергоиздат, 1982. – 296 с.

5. Алиев, И. И. Электротехнические материалы и изделия: справочник / И. И. Алиев. - Изд. 2-е, испр. - М. : РадиоСофт, 2007. - 352 с. – ISBN 5-93037-133-4

Практическое занятие №5

Тема: Определение параметров изоляции электрооборудования

Цель: Изучение методики определения параметров изоляции электрооборудования.

Знания и умения, приобретаемые студентом при выполнении практического занятия: методики оценки электрических параметров изоляции, навык практического расчета электрических характеристик изоляции.

В результате выполнения практического занятия у студента формируются компетенции ПК-3 (способностью принимать участие в проектировании объектов профессиональной деятельности в соответствии с техническим заданием и нормативно-технической документацией, соблюдая различные технические, энергоэффективные и экологические требования).

Актуальность практического занятия обусловлена необходимостью студентов обладать навыками оценки свойств изоляции электрооборудования при проведении профилактических испытаний.

Теоретическая часть

Контроль и профилактические испытания - система мероприятий, с помощью которых обеспечивается надежная работа изоляции в процессе эксплуатации. Профилактика проводится с целью выявления дефектов, возникающих в изоляции при эксплуатации. Ослабление электроизоляционных свойств происходит за счет:

- а) общего старения;
- б) появления местных дефектов.

Общее старение охватывает большой объем изоляции. Местные дефекты появляются в виде сосредоточенных трещин, воздушных включений, частичных увлажнений. В большинстве случаев эти дефекты не могут быть обнаружены в результате простого осмотра изоляции, поэтому для их выявления необходима определенная система профилактических испытаний. Профилактические испытания изоляции резко снижают аварии в энергетических системах из-за своевременного выявления дефектной изоляции.

Для каждого вида изоляции характерны определенные виды дефектов. Изучение их физических особенностей и причин появления также входит в задачи профилактики изоляции. Это позволяет более правильно организовать эксплуатацию оборудования и разрабатывать наиболее эффективные методы профилактических испытаний.

Таким образом, в задачи профилактических испытаний изоляции входит:

- 1) создание нормальных условий работы изоляции;
- 2) обнаружение дефектов и их устранение;
- 3) изучение физических особенностей и причин появления дефектов;
- 4) разработка эффективных методов профилактики.

В таблице 9.1 приведены основные методы профилактических испытаний изоляции и их краткая характеристика.

Этот метод из-за своей простоты нашел очень широкое применение в практике и является одним из основных методов контроля качества изоляции.

Известно, что любая изоляция имеет конечную величину сопротивления, хотя и достаточно большую. Поэтому при приложении напряжения через изоляцию, кроме токов на зарядку геометрической емкости и абсорбционных токов, течет ток, определяемый

электропроводностью диэлектрика. С увеличением дефектности изоляции ток утечки возрастает. Это явление и положено в основу данного метода.

Сопротивление изоляции равно

$$R_{из} = \frac{U}{I} \quad (5.1)$$

На постоянном напряжении $R_{из}$ будет изменяться во времени, поскольку на величину тока будут влиять процессы медленной поляризации. На рис. 5.1 показан характер изменения тока через изоляцию и сопротивление изоляции от времени.

Таблица 9.1 – Профилактические испытания изоляции

№ п/п	Метод испытания изоляции	Дефекты, выявляемые этим методом	Общая характеристика метода
1	Измерение сопротивления изоляции	Сквозные проводящие пути или пробой	Один из основных методов
2	Измерение $tg\delta$	Процессы ионизации и старения изоляции в целом	Один из основных методов
3	Измерение емкости	Общее увлажнение изоляции	В основном для контроля влажности трансформаторов и электрических машин
4	Определение наличия частичных разрядов	Процессы ионизации в воздушных полостях	Дополнительный метод (получает все большее распространение)
5	Измерение распределения напряжения	Частичный пробой, несквозные пути утечки	Основной метод для гирлянд изоляторов
6	Приложение повышенного напряжения	Местные дефекты при снижении электрической прочности	Контроль минимального запаса электрической прочности

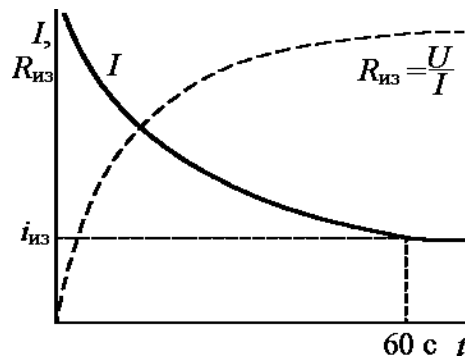


Рисунок 9.1 – Изменение тока утечки и сопротивления изоляции во времени

Опытным путем установлено, что для большинства изоляционных конструкций время достижения установившегося значения тока утечки I меньше 1 мин, т. е. к этому времени, после приложения напряжения, $R_{из}$ также достигнет установившегося значения.

Резкое падение $R_{из}$ показывает на далеко зашедшее развитие дефекта в изоляции либо на наличие сквозного проводящего пути или пробоя. Обычно суждение об изоляции составляется на основании сравнения с результатом предыдущих измерений $R_{из}$ или заводских данных.

Диэлектрические потери в изоляции характеризуются углом диэлектрических потерь. Как показано на рисунке 5.2, то тангенс диэлектрических потерь $tg\delta$ определяется отношением активной составляющей тока в диэлектрике к емкостной составляющей:

$$tg\delta = \frac{I_a}{I_C} \quad (5.2)$$

Где I_a - активная составляющая тока через диэлектрик; I_C - реактивная составляющая тока через диэлектрик.

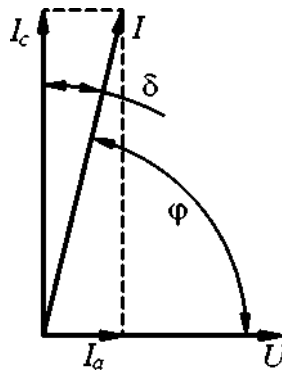


Рисунок 9.2 – Векторная диаграмма токов через диэлектрик с потерями

Измерение величины $\operatorname{tg} \delta$, а не величины самих диэлектрических потерь имеет следующие преимущества:

$$P = UI \cos \delta \approx UI \operatorname{tg} \delta = \omega U^2 C \operatorname{tg} \delta \quad (9.3)$$

1) величина $\operatorname{tg} \delta$ как характеристика материала не зависит от размеров объекта, но позволяет обнаружить возникающие в изоляции дефекты, особенно если они распространены по всему объему;

2) величина $\operatorname{tg} \delta$ может быть непосредственно измерена мостом переменного тока.

Метод контроля изоляции путем измерения угла диэлектрических потерь является самым эффективным и распространенным. Он позволяет выявить следующие дефекты: увлажнение, воздушные (газовые) включения с процессами ионизации, неоднородности, загрязнения и др.

Измерения $\operatorname{tg} \delta$ ведутся при напряжении до 10 кВ и частоте 50 Гц при помощи высоковольтных мостовых схем (мост Шеринга). Оценка состояния изоляции по значению $\operatorname{tg} \delta$ предусматривается нормативами почти для всех видов изоляции. В зависимости от конструктивных особенностей объекта (заземлен один электрод или нет) используется нормальная или перевернутая схема моста Шеринга.

По нормальной схеме обычно выполняются измерения в

лабораториях, а также измерения межфазной изоляции (кабель, трансформатор и т. п.). При этом оба электрода испытываемого объекта изолированы от земли (рисунок 9.3), при перевернутой схеме один из электродов объекта измерения заземлен (рисунок 9.4).

Напряжение питания моста создается с помощью высоковольтного трансформатора Т2 и регулировочного трансформатора Т1.

В схеме моста содержится эталонный воздушный конденсатор C_0 , магазин сопротивлений R3, образцовый резистор R4 и магазин емкостей C4. Испытуемый объект обозначен C_x . Равновесие моста устанавливается с помощью нуль-индикатора НИ, разрядники F1 и F2 защищают элементы моста от токов короткого замыкания в случае пробоя испытуемого образца. Измерительные цепи экранированы с целью защиты от паразитных емкостных токов, для чего внутренний экран всегда присоединен к нижней точке моста Д. Корпус прибора (внешняя линия) заземлен.

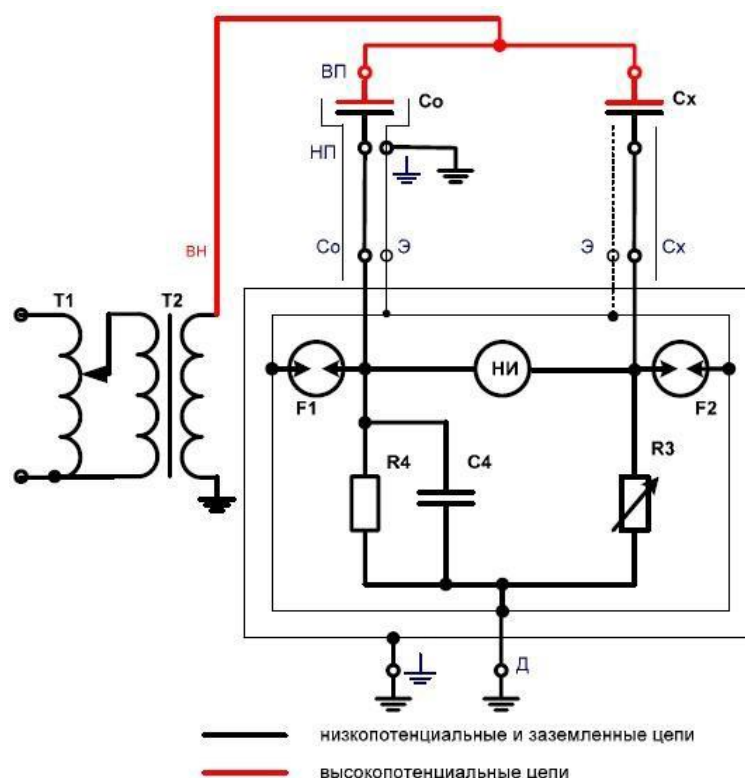


Рисунок 9.3 – Нормальная схема измерений с помощью моста Шеринга

На работу моста сильное влияние оказывают внешние электрические и магнитные поля от соседних высоковольтных силовых установок. Чтобы уменьшить ошибки, вызванные помехами, проводят два измерения с поворотом фазы питающего напряжения на 180 градусов.

Кроме влияния внешних полей на испытываемую изоляцию, возможно влияние и на весьма чувствительные цепи нуль-индикатора, представляющего собой резонансный усилитель, настроенный на частоту 50 Гц. Для частичной компенсации влияния предусматривается переключение выводов нуль-индикатора на 180° в измерительной диагонали моста.

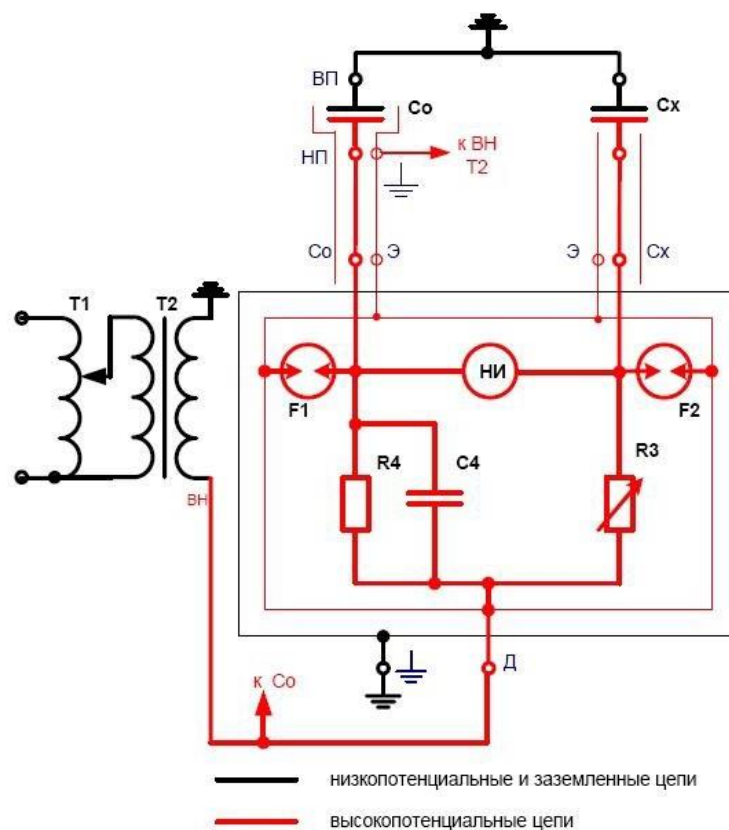


Рисунок 9.4 – Перевернутая схема измерений с помощью моста Шеринга

Условия равновесия моста переменного тока можно записать в виде:

$$Z_0 Z_3 = Z_4 Z_X \quad (9.4)$$

$$-j \frac{1}{\omega C_0} \cdot R_3 = \frac{1}{\frac{1}{R_4} + j\omega C_4} \cdot \frac{1}{g_X + j\omega C_X} \quad (9.5)$$

Приравнивая вещественные части и проводя сокращения, получаем

$$1 = \frac{\omega^2 R_4 C_4 C_X}{g_X} \quad (9.6)$$

Учитывая, что $tg \delta_X = \frac{g_X}{\omega C_X}$ получаем:

$$tg \delta = \omega R_4 C_4 \quad (9.7)$$

Далее сравнивая мнимые части и проводя необходимые преобразования, получаем

$$\frac{R_3}{\omega C_4} = \frac{g_X R_4^2 \omega C_4 - \omega C_X}{\left(1 + (R_4 \omega C_4)^2\right) \left(g_X^2 + (\omega C_X)^2\right)} \quad (9.8)$$

$$\frac{R_3}{\omega C_0} = \frac{\frac{R_4}{\omega C_X} \left(g_X^2 + (\omega C_X)^2\right)}{\left(1 + (R_4 \omega C_4)^2\right) \left(g_X^2 + (\omega C_X)^2\right)} \quad (9.9)$$

Затем с учетом (9.7) получаем

$$C_X = C_0 \frac{R_4}{R_3} \cdot \frac{1}{1 + tg^2 \delta_X} \quad (9.10)$$

С учетом приближения $tg \delta \ll 1$, получим:

$$C_X = C_0 \frac{R_4}{R_3} \quad (9.11)$$

Методы обнаружения частичных разрядов

Этот метод основан на радиоприеме электромагнитных излучений при

частичных разрядах в изоляции. Он чаще всего применяется для выявления дефектных изоляторов на линиях электропередачи.

Недостатками этого метода являются: плохая помехоустойчивость (помехи создаются короной проводов и др.), отсутствие количественной оценки.

Другой метод основан на измерений диэлектрических потерь и определении точки перегиба на кривой зависимости тангенса диэлектрических потерь от напряжения на диэлектрике (см. рисунок 9.5), которая называется кривой ионизации. Излом на этой кривой совпадает с возникновением частичных разрядов в объеме изоляции.

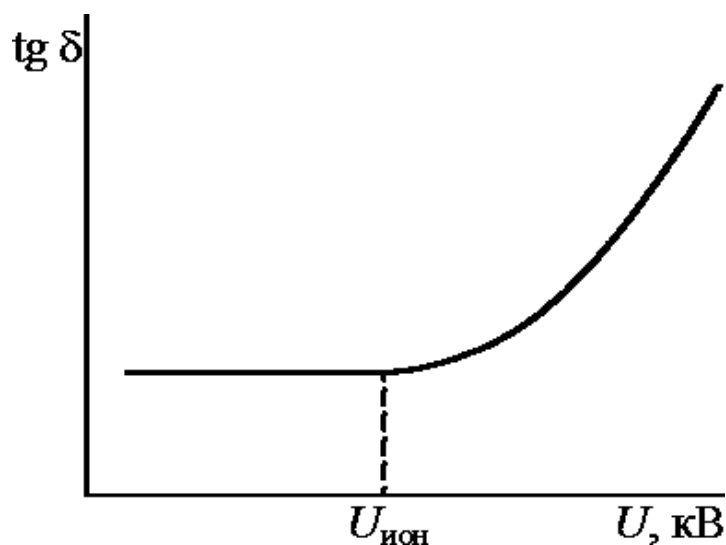


Рисунок 9.5 – Кривая ионизации

К недостаткам этого метода можно отнести неспособность зарегистрировать сосредоточенные дефекты и место их нахождения. В настоящее время метод регистрации точки перегиба на кривой ионизации вытесняется методами регистрации высокочастотных составляющих тока или напряжения частичных разрядов.

Для испытания изоляции высоковольтного электрооборудования грозовыми и коммутационными импульсами используются генераторы импульсных напряжений (ГИН). Грозовые воздействия воспроизводятся стандартными импульсами напряжения: полной и срезанной волнами. Стандартные импульсы (1,2/50 или 2,0) можно получить на установке, схема которой приведена на рисунке 9.6.

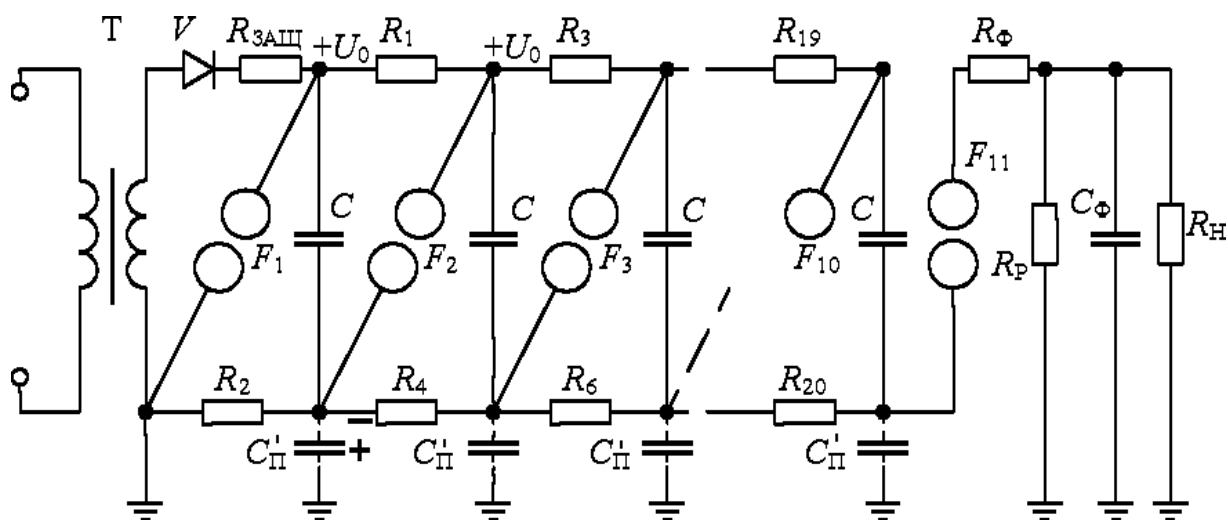


Рисунок 9.6 – Принципиальная электрическая схема ГИН с односторонней зарядкой: Т - высоковольтный трансформатор; V- диод; $R_{заш}$ - сопротивление для ограничения зарядного тока; R_1 - R_{20} – зарядные сопротивления; F_1 - F_{11} -искровые промежутки; C - емкости ступени ГИН; $C_{п}$ - "паразитные" емкости; $R_{ф}$, $C_{ф}$ - фронтовые сопротивление и емкость; R_p - разрядное сопротивление; R_H - сопротивление нагрузки

Зарядка емкостей C производится параллельно, а разряжаются они последовательно, что приводит к сложению зарядных напряжений ступеней. Для обеспечения практически одинаковой зарядки всех конденсаторов до U_0 необходимо соблюдать условие: $R_1 \dots R_{20} \ll R_{заш}$. При напряжении U_0 пробивается только F_1 . Емкость разряжается в контуре $C - R_2 - F_1$, но R_2 большое (десятки кОм). В первый момент разрядка идет по $C - C_{п} - F_1$ ($X_c = 1/\omega C$, ω - круговая частота порядка мегагерц, следовательно, X_c - малое). $C_{п}$ быстро заряжается до U_0 . Тогда к F_2 приложено удвоенное

зарядное напряжение U_0 , поэтому F_2 может иметь расстояние в 2 раза больше, чем F_1 и т. д.

Для регулирования параметров импульса напряжения и получения стандартной волны используются элементы: R_ϕ - фронтовое сопротивление, C_ϕ - фронтовая емкость, R_P - разрядное сопротивление.

Длину фронта формируют C_ϕ и R_ϕ , длину импульса — $R_P + R_H$ совместно

$$t_\phi = 3.24 R_\phi C_\phi \quad t_\theta = 0.7 C_{гин} (R_H + R_P) \quad (9.12)$$

где $C_{гин}$ — емкость генератора импульсов, состоящая из последовательно включенных емкостей C . Изменение амплитуды импульса регулируется изменением расстояния между шаровыми электродами $F_1, F_2, \dots, F_{10}$. Промежуток F_{11} служит для отделения зарядной емкости ГИН от нагрузки при зарядке конденсаторов постоянным напряжением, чтобы исключить воздействие постоянного зарядного напряжения на нагрузку.

ГИН используется для испытания изоляции высоковольтного оборудования. Внутренняя изоляция испытывается приложением трех полных импульсов и трех срезанных импульсов положительной и отрицательной полярности.

Последовательность работы ГИН и расчет его параметров

Заряд параллельно соединенных конденсаторов производится от трансформатора через кенотрон и защитное сопротивление (рисунок 9.6). Длительность заряда и соответственно интервалы между импульсами зависят от емкости конденсаторов, величины зарядного напряжения $R_{заш}$.

Зарядное напряжение ГИН можно регулировать, изменяя величину промежутка на разряднике F_1 который иногда называют запальным. Промежутки всех остальных разрядников схемы пробиваются при больших напряжениях. По мере заряда, на верхних пластинах всех конденсаторов накапливается заряд — Q , создавая на них потенциал — ϕ , при этом

потенциал нижних электродов с зарядом $+Q$ продолжает оставаться равным нулю, так как они связаны с землей. В момент пробоя промежутка F_1 потенциал точек 1 и 2 выравнивается и становится равным $-\varphi$, а точки 3 соответственно -2φ . Под действием возросшей разности потенциалов между точками 3—4 происходит пробой промежутка и потенциал в точке 5 становится равным -3φ .

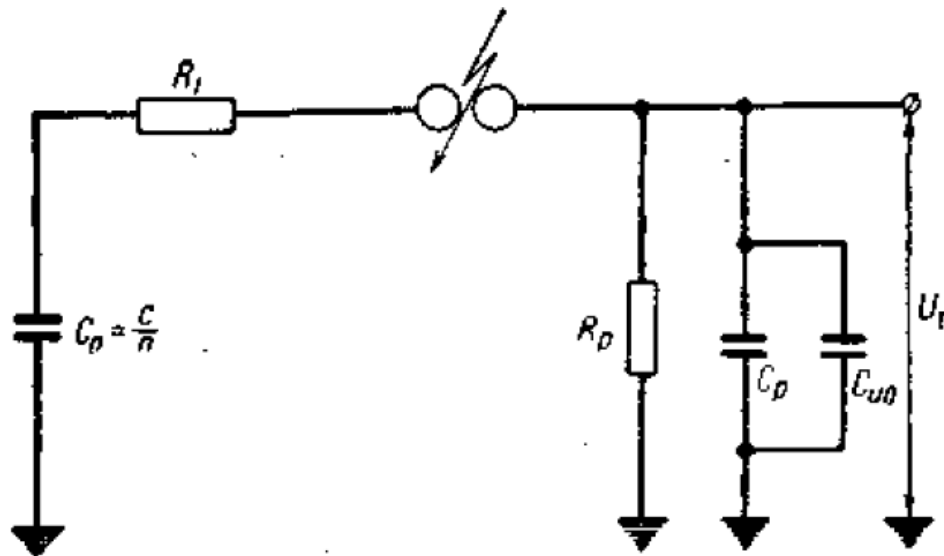


Рисунок 9.7 – Схема замещения ГИН в стадии разряда

В зависимости от числа каскадов этот процесс может продолжаться и дальше. После пробоя последнего из промежутков II_3 на выход схемы подается импульс, в данном случае отрицательной полярности. В этот момент все конденсаторы оказываются в последовательном соединении. Схема замещения ГИН в момент разряда, изображенная на рисунке 9.7, содержит: $C_0(C_p)$ — эквивалентную емкость конденсаторов всех каскадов при их последовательном соединении. Эту емкость называют емкостью в ударе, обычно она имеет величину $20-50 \cdot 10^{-9}$ ф; R_1 суммарное сопротивление демпфирующих сопротивлений, соединительных порогов и дуг между искровыми промежутками; R_p — разрядное высокоомное сопротивление; C_{ou} — емкость разрядной части схемы, состоящая из емкости объекта испытания C_{ou} и добавочной емкости разрядного

конденсатора C_p . Внутренняя индуктивность контура и емкости всех элементов схемы относительно земли на не указаны для упрощения расчетов.

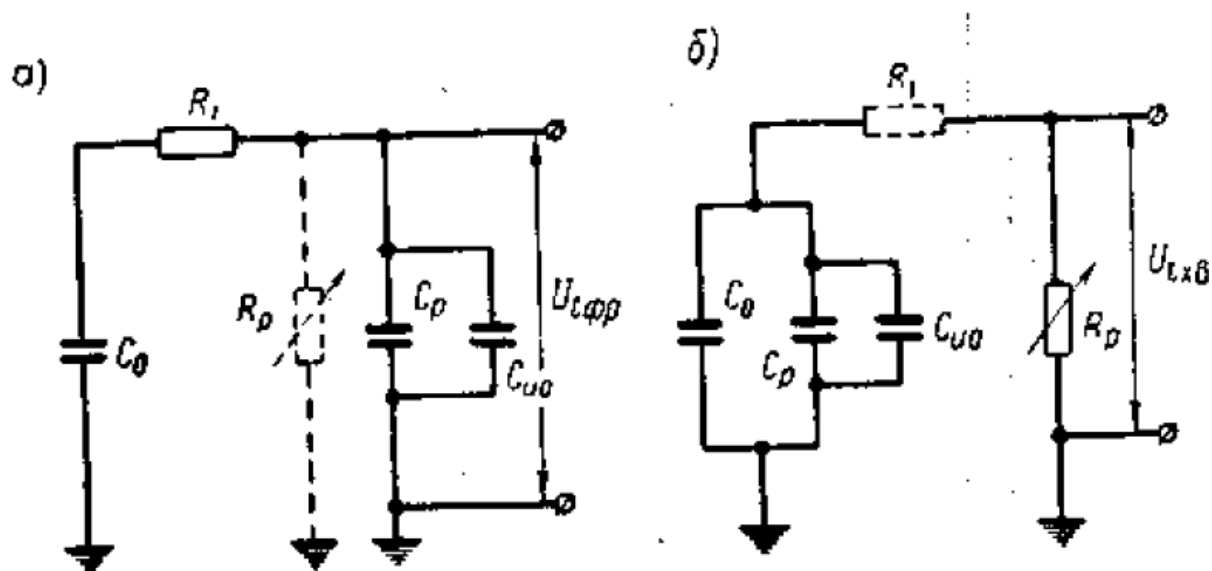


Рисунок 9.8 – Схема замещения ГИН для различных стадий разряда:
а – формирование фронта импульсной волны; б – формирование хвостовой части импульса

Процесс разряда ГИН можно условно разделить на две стадии, каждой из которых будет соответствовать своя схема замещения (рисунок 5.8 а , б). В первой из них происходит формирование фронта импульсной волны, в процессе которого сопротивление R_p практически роли не играет. В этот период происходит заряд распределенных и сосредоточенных емкостей схемы и самого объекта (рисунок 9.8 а) и напряжение на объекте возрастает от нулевого значения тем круче, чем меньше величины указанных емкостей.

Во второй стадии происходит формирование хвостовой части импульсной волны (рисунок 9.8, б). В этот период зарядившаяся емкость объекта и емкости каскадов совместно разряжаются через сопротивления

R_1 и R_p , причем первым из них ввиду его относительной малости можно пренебречь.

Для получения математической связи между параметрами ГИН и параметрами импульсной волны разложим аperiодический процесс разряда и соответствующее ему выходное напряжение на объекте испытания на сумму двух экспонент.

Математически это соответствует зависимости:

$$u(t) = Un\beta \left(e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}} \right) \quad (9.13)$$

где T_1 — постоянная времени для разрядной схемы рисунок 9.8, б в момент формирования хвостовой части импульса;

$$T_1 = (C_0 + C_{OB})(R_1 + R_p) \approx C_0 R_p \quad (9.14)$$

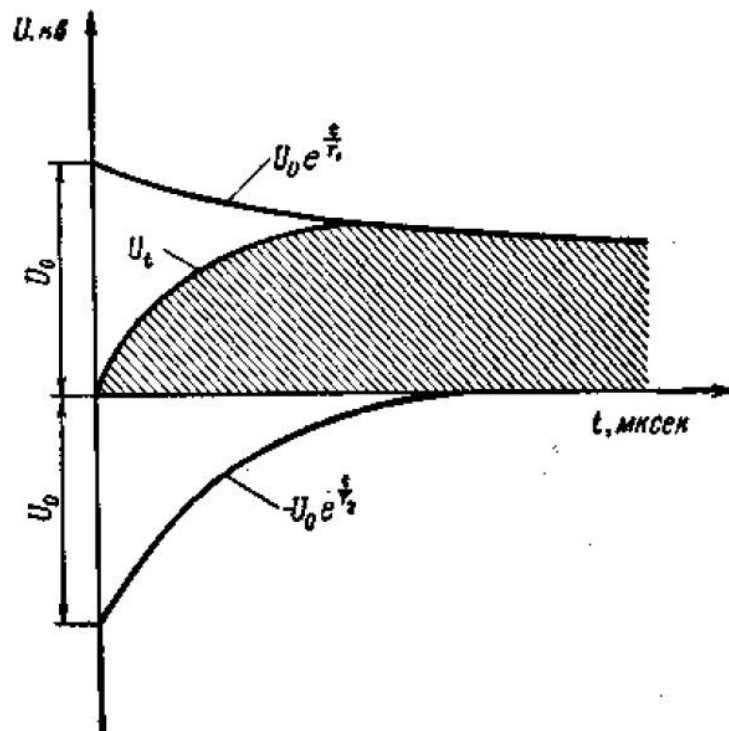


Рисунок 9.9 – Импульсная волна ГИН как сумма двух напряжений изменяющихся по экспоненте

T_2 – постоянная времени для разрядной схемы рисунок 9.8, а в момент формирования фронта импульса,

$$T_1 = \left(\frac{C_0 C_{OB}}{C_0 + C_{OB}} \right) \cdot \left(\frac{R_1 R_p}{R_1 + R_p} \right) \approx C_{OB} R_1 \quad (9.15)$$

где n – число конденсаторов в каскадах схемы ГИН; U – напряжение на каждом из конденсаторов в момент завершения заряда; t – текущее время с момента начала разряда схемы, мксек.

Для расчета параметров ГИН введем упрощение, предположив, что в начальный период [разряда емкостей, т. е. при формировании фронта импульса, положительная экспонента напряжения (рисунок 9.9) практически не затухает.

Это позволит записать зависимость (9.13) в более простой форме применительно к текущему времени до 1,5 мксек:

$$u(t) = Un\beta \left(1 - e^{-\frac{t}{T_2}} \right) \quad (9.16)$$

Так как характерные точки на фронте стандартного импульса удовлетворяют зависимости (5.16), то

$$0,3U_0 = U_0 \left(1 - e^{-\frac{t_1}{T_2}} \right); \quad 0,7 = e^{-\frac{t_1}{T_2}} \quad (9.17)$$

$$0,9U_0 = U_0 \left(1 - e^{-\frac{t_2}{T_2}} \right); \quad 0,1 = e^{-\frac{t_2}{T_2}} \quad (9.18)$$

$$U_0 = Un\beta \quad (9.19)$$

После деления уравнения (5.17) на (5.18) и логарифмирования получим связь между продолжительностью фронта и параметрами ГИН

$$e^{\frac{t_2 - t_1}{T_2}} = e^{\frac{0,6\tau_p}{T_2}} = 7 \quad (9.20)$$

откуда

$$\tau_{\Phi} = \frac{\ln 7 T_2}{0,6} = 3,24 C_{\text{об}} R_1 \quad (9.21)$$

В период формирования хвостовой части импульса можно считать отрицательную экспоненту напряжения затухшей, тогда зависимость (5.13) примет вид

$$U_t = U_0 e^{-\frac{t}{T_1}} \quad (9.22)$$

Так как по условию τ_B стандартного импульса соответствует спаду напряжения до величины $U_0/2$, то

$$\frac{U_0}{2} = U_0 e^{-\frac{\tau_B}{T_1}}; \quad 2 = e^{\frac{\tau_B}{T_1}} \quad (9.23)$$

откуда получим связь между длительностью волны и параметрами ГИН

$$\tau_B = T_1 \ln 2 \approx 0,7 C_0 R_p \quad (9.24)$$

Полученные зависимости (9.21) и (9.24) связывают между собой четыре постоянные величины контура: C_0 , $C_{\text{об}}$, R_p и R_1

Напряжение волны, создаваемой ГИН, обычно на 20 – 30% меньше суммарного напряжения всех последовательно соединенных

конденсаторов. Это объясняется тем, что часть накопленной энергии расходуется на подзаряд конденсаторов, подключенных на выходе схемы, а часть переходит в потери активной мощности в сопротивлениях.

Указанные потери учитываются коэффициентом использования β , зависящим от соотношений между величинами C_0 , C_{OB} , R_p и R_1

$$\beta = \frac{1}{1 + \frac{C_{OB}}{C_0} + \frac{R_1}{R_p}} \quad (9.25)$$

Для получения коэффициента использования, равного 0,75— 0,85, рекомендуется выбирать величины емкостей $C_0 > 10C_{OB}$, а сопротивление $R_p > 10R_1$.

Для расчета параметров ГИН достаточно задать только емкость объекта испытаний, которая в совокупности с емкостью разрядного конденсатора C_p образует емкость C_{OB} .

Для обеспечения апериодичности волны должно быть соблюдено условие согласования индуктивности контура и эквивалентной емкости всей разрядной схемы с активным сопротивлением R_1 в соответствии с выражением

$$R_1 \geq 2\sqrt{\frac{L}{C}} \quad (9.26)$$

Где L — индуктивность контура, гн, $C = \frac{C_0 C_{OB}}{(C_0 + C_{OB})}$ — эквивалентная емкость разрядной схемы, ф;

Задания

1. При измерении сопротивления изоляции однофазного кабеля с бумажно-масляной изоляцией определено, что оно составляет величину 10

Гом, емкость кабеля составляет величину 0,6 мкФ/км, длина кабеля 100 м, определить удельное объемное сопротивление изоляции кабеля и оценить ее состояние.

Решение.

Емкость кабеля, в предположении что его изоляция является однослойной, можно записать

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon}{\ln \frac{R}{r_0}} \quad (9.27)$$

В то же время его сопротивление запишется как:

$$R_{из} = \frac{\rho}{2\pi} \ln \frac{R}{r_0} \quad (9.28)$$

Отсюда можно выразить величину удельного объемного сопротивления:

$$\rho = \frac{2\pi R_{из}}{\ln \frac{R}{r_0}} \quad (9.29)$$

Если отношение $\ln \frac{R}{r_0}$ выразить через емкость кабеля, то можно записать

$$\ln \frac{R}{r_0} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon}{C} \quad (9.30)$$

Далее можно записать:

$$\rho = \frac{R_{из} C}{\epsilon_0\epsilon} = \frac{R_{из} C_{уд} L_{КАБ}}{\epsilon_0\epsilon} = \frac{10 \cdot 10^6 \cdot 0,56 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6}}{3,75 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} = 1,68 \cdot 10^{-10} \text{ Ом} \cdot \text{м} \quad (9.31)$$

Сопротивление изоляции находится в допустимых пределах.

2. Рассчитать параметры генератора импульсных напряжений, состоящего из импульсных конденсаторов типа ИМ-60-0,03. Номинальное напряжение каждого конденсатора 60 кВ, емкость 0,03 мкф. Для увеличения емкости конденсаторы соединяются попарно параллельно. ГИН

должен создавать стандартную волну напряжения с амплитудой 1000 кВ. Объект испытания с емкостью 250 пф имеет добавочную емкость 250 пф.

Решение.

Суммируя емкости объекта и добавочную емкость, включенную параллельно объекту, получим общую емкость выходной части схемы

$$C_{OB} = C_{OH} + C_P = 250 + 250 = 500 \text{ пф} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ мкф} \quad (9.32)$$

Приняв значение для коэффициента использования ГИН $\beta=0,8$, определим необходимое число конденсаторов из соотношения (9.19)

$$n = \frac{U_0}{\beta U} = \frac{1000}{0,8 \cdot 60} = 21 \quad (9.33)$$

По паспортной емкости конденсаторов с учетом их попарного соединения найдем емкость схемы в ударе

$$C_0 = 0,03 \cdot 2/21 = 0,0028 \text{ мкф} \quad (9.34)$$

В соответствии с соотношением (9.24) определим величину разрядного сопротивления

$$R_p = \frac{\tau_B}{0,7C_0} = \frac{50}{0,7 \cdot 0,0028} = 25500 \text{ Ом} \quad (5.35)$$

Используя соотношение (5.21), найдем величину суммарного демпфирующего сопротивления, распределенного по каскадам:

$$R_1 = \frac{\tau_\phi}{3,24C_{OB}} = \frac{1,2}{3,24 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}} = 741 \text{ Ом} \quad (5.36)$$

По полученным данным из соотношения (9.25) определим истинную величину коэффициента использования ГИН

$$\beta = \frac{1}{1 + \frac{C_{об}}{C_0} + \frac{R_1}{R_p}} = \frac{1}{1 + \frac{0,0005}{0,028} + \frac{741}{25550}} = 0,83 \quad (9.37)$$

Найденный коэффициент соответствует ранее принятому.

3. Рассчитать значения резисторов в схеме моста переменного тока (рисунок 5.3), если эквивалентное активное сопротивление в параллельной схеме замещения исследуемого конденсатора 100 кОм, емкость 0,5 мкФ, емкость образцового конденсатора 50 пФ.

4. Генератор импульсных напряжений собран из конденсаторов с номинальным напряжением 150 кВ и емкостью 0,7 мкф каждый. Определить расчетные параметры ГИН, если он должен создавать импульсную волну с напряжением 3 МВ, падающую на трансформатор, входная емкость которого 2000 пф. Разрядная емкость, обычно включаемая параллельно объекту, в данной схеме не используется.

Контрольные вопросы

1. Методы контроля изоляции электроэнергетического оборудования
2. Тангенс угла диэлектрических потерь и методы его измерения
3. Прямая и инверсная схема измерения тангенса угла диэлектрических потерь. Области применения, особенности.
4. Методика проведения профилактических испытаний изоляции высоковольтного оборудования.
5. Допустимые значения тангенса угла диэлектрических потерь электроэнергетического оборудования.
6. Схемы подключения оборудования при изменении тангенса угла диэлектрических потерь электрооборудования на примере однофазного трансформатора напряжения.

7. Перечислите основные элементы схем ГИН и ГИТ, их назначение и принципиальные особенности.

8. На какие элементы ГИН следует воздействовать для изменения длительности интервалов между импульсами?

9. Какими параметрами разрядной схемы ГИН определяется продолжительность волны и ее фронта?

10. В каких случаях желательно получение импульсов стандартной формы?

11. Что дополнительно предусматривается в схеме ГИН, работающей по принципу управляемого разряда?

12. Какова область применения установки ГИН и ГИТ?

13. Что определяет собой коэффициент использования ГИН?

Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме

Основная литература

1. Электроснабжение сельского хозяйства: учебник / т. Б. Лещинская, и. В. Наумов ; [ред. Г. В. Лихачёва]. - М. : Колос, 2008. - 655 с. – ISBN 978-5-9532-0560-3.

2. Расчет электрических полей устройств высокого напряжения : учеб. пособие / И. П. Белоедова, Ю. В. Елисеев, Е. С. Колечицкий и др. ; ред. Е. С. Колечицкий. - М.: ИД МЭИ, 2008. - 248 с. – ISBN 978-5-383-00072-4

Дополнительная литература

3. Техника высоких напряжений : учебник для вузов / под ред. Д. В. Разевига. – 2-е изд., пер. и доп. – М. : Энергия, 1976. – 488 с.

4. Техника высоких напряжений(изоляция и перенапряжение в электрических установках) : учебник для техникумов / В. П. Ларионов, В. В. Базуткин, Ю. Г. Сергеев ; под ред. В. П. Ларионова. – М. : Энергоиздат, 1982. – 296 с.

Практическое занятие №6

Тема: Расчет и выбор молниезащиты подстанции

Цель: Изучение методов расчета параметров молниезащиты подстанций и линий электропередач.

Знания и умения, приобретаемые студентом при выполнении практического занятия: порядок расчета молниезащиты подстанций и воздушных линий электропередач, навык практического расчета молниезащиты оборудования электроэнергетических систем.

В результате выполнения практического занятия у студента формируются компетенции ПК-3 (способностью принимать участие в проектировании объектов профессиональной деятельности в соответствии с техническим заданием и нормативно-технической документацией, соблюдая различные технические, энергоэффективные и экологические требования).

Актуальность практического занятия обусловлена необходимостью студентов обладать навыками расчетов молниезащиты оборудования электроэнергетических систем.

Теоретическая часть

Защита от прямых ударов молнии открытых токоведущих частей подстанции осуществляется с помощью стержневых молниеотводов. Для удешевления защиты молниеотводы устанавливаются на конструкциях подстанции, а также на осветительных мачтах и крышах зданий. Дорогие отдельно стоящие молниеотводы применяются только при невозможности установки молниеотводов на конструкциях подстанции. В зону защиты должны также включаться пролеты линий между подстанцией и концевыми опорами. Защита этих пролетов осуществляется тросами линейных подходов, которые присоединяются к порталным конструкциям подстанций. Возможна также установка стержневых молниеотводов на концевых опорах при условии присоединения их заземления к общему заземляющему контуру подстанции.

Заземлители на станциях и подстанциях выполняются общими для обеспечения безопасности персонала, для заземления нейтралей трансформаторов и генераторов и для заземления молниеотводов, т. е. для целей грозозащиты. При поражении молниеотвода ток молнии, стекающий в заземление подстанции, вызывает на этом заземлении подъем потенциала, который может вызвать обратное перекрытие подстанционной изоляции. По правилам ПУЭ в электроустановках с большими токами замыкания на землю (подстанции 110 кВ и выше) сопротивление заземляющего устройства должно быть не более 0,5 Ом.

Заземление подстанции относится к классу протяженных заземлителей. Обычно заземляющее устройство подстанции выполняется в виде контурного заземлителя с равномерно распределенными по периметру контура вертикальными (трубчатыми или стержневыми) заземлителями и сеткой, выравнивающей потенциалы в пределах контура. Чем больше длина фронта волны тока молнии и удельное сопротивление грунта, тем больше площадь заземлителя, которая эффективно участвует в отводе тока молнии. Как и для всех протяженных заземлителей, эта эффективность может выражаться отношением U_l/U_0 , где U_0 и U_l – импульсные напряжения на заземлителе в точке присоединения молниеотвода и на расстоянии l от него. Для ориентировки можно указать, что на заземлителе размером 40X40 м² отношение $U_l/U_0 > 0,7$ при $t_{fp} > 5$ -6 мксек и $\rho > 200$ –300 ом·м. Во всяком случае для улучшения отвода тока молнии всегда целесообразно сосредоточивать вертикальные заземлители вблизи молниеотводов.

При установке стержневых молниеотводов на порталных конструкциях трансформаторов, имеющих обмотки 6—35 кВ, слабым звеном являются изоляции этих обмоток и соответствующая внешняя изоляция. В этих случаях на выводах обмоток 6 – 35 кВ следует устанавливать вентильные разрядники. На напряжении 6 – 35 кВ РВ

устанавливаются непосредственно у ввода, на напряжении 20 – 35 кВ – на расстоянии до 5 – 10 м от ввода.

Согласно ПУЭ сопротивление заземления подстанции с малыми токами замыкания на землю, т. е. подстанций 35 кВ и ниже, должно определяться по формуле:

$$R_{\sim} = \frac{125}{I}, \text{ Ом} \quad (10.1)$$

если заземляющие устройства одновременно используются для электроустановок с напряжением до 1000 В и

$$R_{\sim} = \frac{250}{I}, \text{ Ом} \quad (10.2)$$

если заземляющее устройство используется только для электроустановок напряжением выше 1000 В, где I – полный ток замыкания на землю. Во всех случаях сопротивление заземляющего устройства не должно быть выше 10 Ом.

Установка молниеотводов на конструкциях ОРУ 35 кВ и присоединение тросов, защищающих подходы линий 35 кВ к конструкциям подстанции, допускается при условии, что расчетное сопротивление растекания части заземления, расположенного в зоне 20 – 30 м от места присоединения молниеотвода к заземлителю, не превышает 4 Ом. Если это условие не выдерживается, необходима установка отдельно стоящих молниеотводов, в защитную зону которых должны входить пролеты линий от порталных конструкций до концевых опор.

При грозовом поражении проводов линии (в результате прямого удара молнии или обратного перекрытия) на подстанцию набегают волна напряжения, ограниченная импульсным разрядным напряжением линейной изоляции. Под действием импульсной короны фронт волны сглаживается.

Обычно в расчетах принимают волну с косоугольным фронтом и амплитудой, равной 50%-ному разрядному напряжению линейной изоляции.

Защита подстанционной изоляции от набегающих волн осуществляется вентильными разрядниками. Если разрядник установлен рядом с изоляцией (на расстоянии нескольких метров по ошиновке), то напряжение на разряднике равно напряжению на изоляции, а так как характеристики РВ скоординированы с импульсными характеристиками изоляции, то изоляция защищена от грозовых перенапряжений. Но на подстанциях разрядник должен защищать всю изоляцию ОРУ, в общем случае находящуюся на расстоянии l (считая по ошиновке) от разрядника. В этом общем случае между РВ и изоляцией возникает перепад напряжения ΔU .

Зависимость ΔU от параметров схемы и набегающей волны рассмотрим на простейшей схеме рисунок 6.1. Изоляция в схеме замещена емкостью C .

Допустим, что набегающая волна имеет косоугольную форму с фронтом длиной $t_{фр} > 5-6$ мксек и крутизной фронта $a = U_0/t_{фр}$. Волновой процесс в схеме можно разделить на две стадии – до и после срабатывания разрядника.

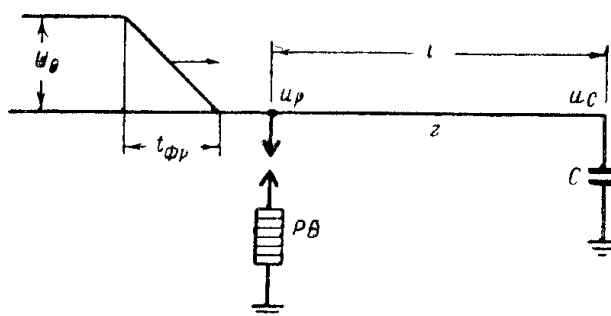


Рисунок 10.1 – Расчетная схема для определения перепада напряжения между изоляцией и разрядником

До срабатывания РВ волна проходит мимо РВ без преломления.

Напряжение на емкости равно:

$$u_c = 2a \left(t - T \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \right) \quad (10.3)$$

где $T = zC$. Емкость C сглаживает фронт волны.

Напряжение на РВ до прихода отраженной от емкости волны, т. е. до момента $t=2\tau$, где $\tau=l/c$, изменяется по закону $u_p = 2at$. При $t>2\tau$ напряжение u_p находится наложением волны $2at$ и отраженной от емкости волны.

Если пробивное напряжение искрового промежутка разрядника равно $U_{ПР}$, то максимальное напряжение на емкости (изоляции), определенное по пробивному напряжению искрового промежутка, равно:

$$U_{См}^{(1)} = U_{ПР} + \Delta U \quad (10.4)$$

Значения ΔU определяются путем построения приведенного на рисунке 10.2. В случае $U_{ПР} < u^*$ напряжение на изоляции не достигнет значения $U_{ПР}$. В этом сказывается благоприятный эффект емкости C . При временах $t>t^*$ напряжение на изоляции уже выше $U_{ПР}$. По мере заряда емкости C перепад напряжения между разрядником и изоляцией стремится к значению

$$\Delta U = 2a\tau \quad (10.5)$$

Из изложенного следует, что перепад напряжения ΔU тем меньше, чем меньше крутизна набегающей волны a и расстояние l , а также чем больше емкость защищаемой изоляции.

После пробоя искрового промежутка РВ через рабочее сопротивление РВ проходит импульсный ток i_p . С некоторым приближением можно принять, что фронт волны $u_{ост}(t)$ имеет косоугольную форму, причем его крутизна равна крутизне набегающей волны a , а длина $t_{фр} = U_{ост}/a$. Схема

на рисунке 10.1 может быть заменена расчетной схемой на рисунке, 10.3, а с источником косоугольного напряжения $U_{ост}$. Участок ошиновки l в этой схеме замещен П-образной схемой. Емкость C учитывает как емкость изоляции, так и половину ошиновки.

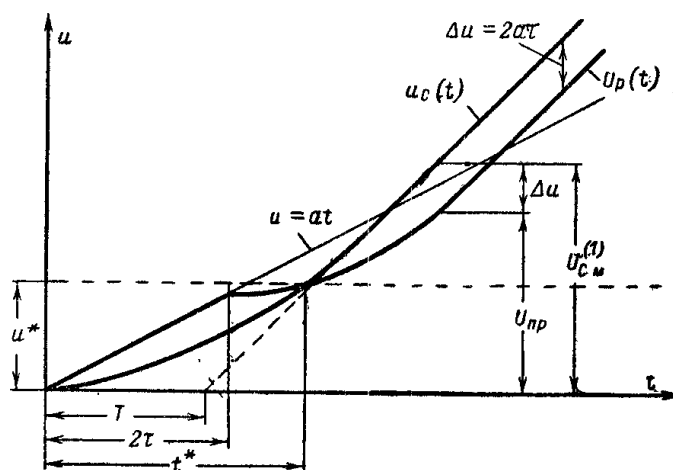


Рисунок 10.2 – Кривые напряжения на разряднике U_p и на изоляции U_c

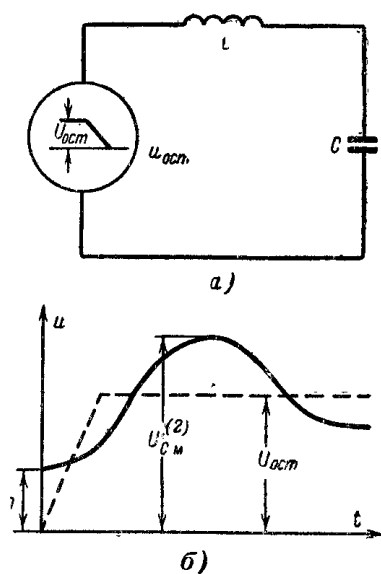


Рисунок 10.3 – К расчету напряжения на изоляции в схеме на рисунке 10.1 после срабатывания искрового промежутка РВ; а — схема замещения: б — форма волны на изоляции

Емкость второй половины ошиновки в П-образной схеме замещения оказывается отнесенной к стороне источника напряжения, в переходном процессе в схеме не участвует и не показана. Индуктивность ошиновки:

$$L = \frac{z}{c} l \quad (10.4)$$

где z — волновое сопротивление ошиновки. Так как в переходном процессе до пробоя искрового промежутка РВ емкость C была заряжена до напряжения $U_{C0} = U_{CM}^{(1)}$, то это напряжение следует принять в качестве начального на емкости в схеме на рисунок 6.3,а.

Источник напряжения U_{OCT} , воздействуя на колебательный контур LC с периодом собственных колебаний $T = 2\pi\sqrt{LC}$, создает на емкости C импульсное напряжение u_c , показанное на рисунке 10.3, б. Приближенное значение амплитуды напряжения по емкости:

$$U_{CM}^{(2)} = (U_{OCT} - U_{C0}) \left[1 + \frac{\sin \frac{\pi t_{\phi p}}{T}}{\frac{\pi t_{\phi p}}{T}} \right] + U_{C0} \quad (10.5)$$

Напряжение $U_{CM}^{(2)}$ есть максимальное напряжение на емкости (изоляции) определенное по остающемуся напряжению на рабочем сопротивлении РВ.

При $U_{C0} \ll U_{OCT}$ кривая $U_{CM}^{(2)} / U_{OCT}$ в зависимости от отношения $t_{\phi p} / T$ показана на рисунке 6.4. В предельном случае $t_{\phi p} / T = 0$ (прямоугольная волна) отношение $U_{CM}^{(2)} / U_{OCT} = 2$. С ростом и уменьшением T , т. е. со снижением расстояния l , отношение $U_{CM}^{(2)} / U_{OCT}$ спадает.

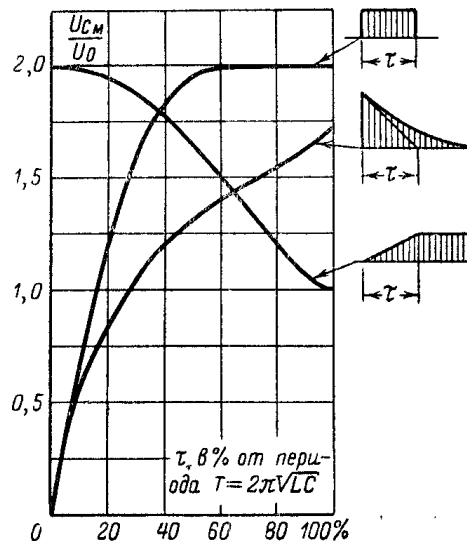


Рисунок 10.4 – Падение волны на колебательный контур. кривые U_{CM}/U_0 при разных формах набегающих на контур волн.

Максимальные значения не должны выходить за пределы кривой выдерживаемого напряжения изоляции. Обычно допустимое отношение U_{CM} к напряжению на разряднике U_{pv} не должно превышать 1,2—1,3. Это означает, что при заданном расстоянии l между РВ и изоляцией необходимо ограничение (снизу) длины фронта волны или ограничение (сверху) крутизны фронта a . И, наоборот, при заданной крутизне необходимо ограничение расстояния l . Таким образом, разрядник на подстанции имеет определенную зону защиты, зависящую от характеристик изоляции и РВ и параметров набегающей волны.

При прямом ударе молнии в провода или при обратном перекрытии в месте удара возникает волна, фронт которой может быть принят практически прямоугольным. После пробега расстояния L фронт волны под действием импульсной короны удлиняется с нулевого значения до длины

$$t_{\phi p} = BU_0 \frac{L}{c} \quad (10.6)$$

где U_0 — амплитуда набегающей волны
крутизна фронта снижается от бесконечности до значения

$$a = \frac{1}{B \frac{L}{c}} \quad (10.7)$$

Предположим, что при выбранном месте установки разрядников на подстанции, т. е. при заданных расстояниях l от РВ до изоляции, расчетом установлено, что расчетная крутизна фронта набегающей волны не должна превышать $a_{доп}$. Тогда из формулы (6.7) легко найти расчетную длину так называемой «опасной зоны» на линейном подходе т. е. зоны, в которой недопустимо появление прямоугольной волны:

$$L_{\Pi} = \frac{c}{a_{доп}} \cdot 10^{-3} \quad (10.8)$$

где $c = 300$ м/мксек; B определяется по графику в зависимости от диаметра провода (рисунок 6.) выражено в 1 /кв; $a_{доп}$ — в киловольтах в микросекунду (кв/мксек); L_{Π} — в километрах (км).

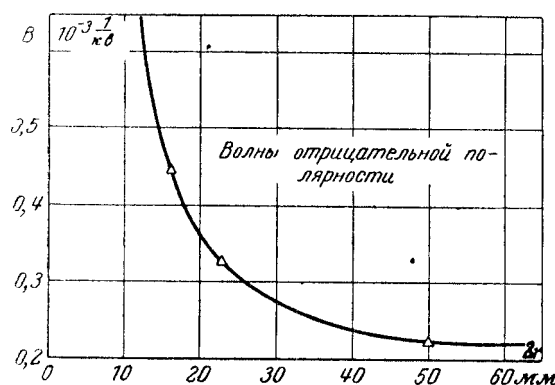


Рисунок 10.4 – Завистмость B от диаметра провода линии.

Очевидно, что линейные подходы на расстоянии L_{Π} должны быть защищены тросовыми молниеотводами.

Задания

1. Определить максимальное напряжение на изоляции электрооборудования, если длина защищенного подхода по линии 110 кВ равна 2 км, линия выполнена тросами АСО 240, расстояние от разрядника до защищаемого трансформатора на подстанции 5 м, ошиновка выполнена проводами АСО 300, расстояние между проводами ошиновки 3 м, защита изоляции трансформатора осуществляется разрядником вентильным на напряжение 110 кВ.

2. Определить длину необходимого защищенного подхода на линии 110 кВ, линия выполнена проводами АСО 240, расстояние от разрядника до защищаемого трансформатора на подстанции 15 м, ошиновка выполнена проводами АСО 300, расстояние между проводами ошиновки 5 м, защита изоляции трансформатора осуществляется разрядником вентильным на напряжение 110 кВ, максимальная кратность пренапряжений на изоляции трансформатора – 3,5.

Таблица 10.1 – Характеристики вентильных разрядников.

Номинальное напряжение разрядника, кВ	Наибольшее допустимое напряжение разрядника, кВ	Пробивное напряжение разрядника при частоте 50 Гц, кВ		Импульсное пробивное напряжение разрядника (при предразрядном времени от 2 до 10 мксек), кВ(не более)	Остающееся напряжение разрядника при импульсном токе с длиной фронта волны 10 мксек, кВ (не более)		
		не менее	не более		3 000 А		10000 А
3	3,8	7,5	9,5	8	9		11
6	7,6	15	18	15,5	17	18	20
10	12,7	25	30	25,5	28		33
15	19	35	43	57	47		57
20	25	47	56	74	62		74
35	40,5	75	90	116	97	105	116
110	100	170	195	265	245	265	295
150	138	230	265	370	340	370	410
220	200	340	390	515	475		570
330	290	485	560	740	680		820
500	420	660	760	1 130	985		1 180

Контрольные вопросы

1. Принцип действия трубчатого разрядника.
2. Устройство и принцип действия вентильного разрядника.
3. Основные характеристики вентильных разрядников.
4. Схемы расположения вентильных разрядников при защите электроэнергетического оборудования.
5. Маркировка вентильных разрядников.
6. Ограничители перенапряжений, их устройство и характеристики.
7. Опишите качественно прохождение прямоугольной волны по линии электропередач.
8. Качественно охарактеризуйте процессы отражения и преломления волн перенапряжения на узлах энергосистемы.
9. Какое сопротивление должен иметь заземлитель молниеотвода подстанции.

Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме

Основная литература

1. Электроснабжение сельского хозяйства: учебник / т. Б. Лещинская, и. В. Наумов ; [ред. Г. В. Лихачёва]. - М. : Колос, 2008. - 655 с. – ISBN 978-5-9532-0560-3.
2. Расчет электрических полей устройств высокого напряжения : учеб. пособие / И. П. Белоедова, Ю. В. Елисеев, Е. С. Колечицкий и др. ; ред. Е. С. Колечицкий. - М.: ИД МЭИ, 2008. - 248 с. – ISBN 978-5-383-00072-4

Дополнительная литература

3. Техника высоких напряжений : учебник для вузов / под ред. Д. В. Разевига. – 2-е изд., пер. и доп. – М. : Энергия, 1976. – 488 с.
4. Техника высоких напряжений(изоляция и перенапряжение в электрических установках) : учебник для техникумов / В. П. Ларионов, В. В. Базуткин, Ю. Г. Сергеев ; под ред. В. П. Ларионова. – М. : Энергоиздат, 1982. – 296 с.

Практическое занятие №7

Тема: Выбор и расчет схемы ограничения перенапряжений

Цель: Изучение методов определения остаточного напряжения и осуществления схемы ограничения перенапряжений на подстанции.

Знания и умения, приобретаемые студентом при выполнении практического занятия: методы расчета остаточного напряжения на оборудовании подстанций, навык выбора элементов схемы защиты от перенапряжений

В результате выполнения практического занятия у студента формируются компетенции ПК-3 (способностью принимать участие в проектировании объектов профессиональной деятельности в соответствии с техническим заданием и нормативно-технической документацией, соблюдая различные технические, энергоэффективные и экологические требования).

Актуальность практического занятия обусловлена необходимостью студентов обладать навыками расчета и выбора схем защиты от перенапряжений оборудования подстанций.

Теоретическая часть

Проектирование защиты подстанций начинается с определения возможных мест установки РВ. С этой целью задаются показателем грозозащиты подстанции M (лет). По принятому M и известному удельному числу перекрытий линий n_i используя зависимость (7.1), вычисляют расчетную длину подхода L_{Π} . Если трос на линиях подвешен только на подходах, то L_{Π} ограничена (сверху) длиной защищенного подхода.

$$M = \frac{100}{L_{\Pi} \sum_{i=1}^s n_{\text{пер}}^i} \frac{1}{n_{\text{ГР}}} \quad (11.1)$$

Используя зависимость (6.8), вычисляют расчетную крутизну фронта.

Форма волны, набегающей на подстанцию, может приниматься весьма

разнообразной. Часто в расчетах принимают косоугольную волну с крутизной фронта $a_{расч}$ и амплитудой, равной 50%-ному импульсному разрядному напряжению изоляции линии на подходе.

Число приключенных линий принимается минимально возможным в летний период ремонтов. Место установки РВ выбирается из условия, чтобы волны во всех точках подстанции, в первую очередь на трансформаторах и на изоляции шин, не выходили за пределы, ограниченные кривыми выдерживаемых напряжений. Если желательно расширить зоны защиты РВ (и тем самым, например, сократить число РВ), то необходимо снизить удельное число перекрытий ВЛ на подходах путем улучшения их грозозащиты.

В ориентировочных расчетах возможно использование формул (11.4) и (6.5) для определения максимальных $U_{см}$, которые сравниваются со значениями выдерживаемого напряжения при $t_p = 2$ мксек. Так как формулы выведены для простейшей и наиболее жесткой схемы на рисунке 6.1, то найденное значение l умножают на коэффициент k , который принимается равным: для подстанций с одной приключенной линией (тупиковой) $k=1$; с двумя линиями $k=1,25$; с тремя и более линиями $k=1,5$.

На подстанциях до 220 кВ включительно разрядники обычно устанавливают на шинах или трансформаторных присоединениях. Когда на подстанции установлены автотрансформаторы, установка РВ на АТ – присоединениях обязательна, и эти РВ используются также для защиты изоляции всей подстанции. Исключение составляют гидроэлектростанции, где распределительные устройства высокого напряжения обычно удалены на большие расстояния от трансформаторов, устанавливаемых на нижнем бьефе. В этих случаях вентильные разрядники устанавливаются около каждого из трансформаторов и на шинах распределительного устройства. Вентильные разрядники подключаются к шинам через разъединители. На подстанциях с двумя выключателями на присоединение вентильные

разрядники устанавливаются на каждой системе шин. При делении шин на секции вентильные разрядники устанавливаются на каждой секции.

На подстанциях 330 кВ и выше вентильные грозозащитные разрядники типа РВМГ устанавливаются на каждом трансформаторном присоединении вблизи трансформатора. Такая практика связана не только со стремлением повысить надежность грозозащиты трансформаторов, но и с условиями защиты трансформаторов от коммутационных перенапряжений, возникающих при отключении холостых трансформаторов. Другое назначение РВ состоит в следующем. При перекрытии внешней изоляции волна на подстанции срезается и возникают колебания с глубоким переходом напряжения через нулевое значение. Эти колебания приводят к высоким градиентным перенапряжениям в обмотке. Рабочее сопротивление РВ демпфирует эти колебания и тем самым снижает градиентные перенапряжения.

На подстанциях СВН возможна установка на линейных присоединениях вентильных разрядников типа РВМК для ограничения коммутационных перенапряжений на линиях. Разрядники РВМК являются комбинированными, т. е. защищают оборудование от коммутационных и грозовых перенапряжений, поэтому они повышают надежность грозозащиты подстанции.

На трансформаторных и линейных присоединениях вентильные разрядники всех типов присоединяются к ошиновке без разъединителей. Ревизия РВ совмещается с ревизией всего присоединения.

На свободной, т. е. отключенной выключателем, стороне автотрансформатора могут появиться опасные для его изоляции перенапряжения, связанные с переходом волн между обмотками. Поэтому вентильные разрядники должны устанавливаться на всех автотрансформаторно-связанных обмотках, как это показано на рисунке 11.1. Разрядники приключаются без разъединителя со стороны автотрансформатора (до выключателя и разъединителя). Для защиты от

перехода волн расстояние от РВ до трансформатора не имеет значения (в пределах, возможных на подстанции). Это объясняется большой периодом развития колебаний в обмотках. Эти же разрядники одновременно служат для защиты изоляции всей подстанции.

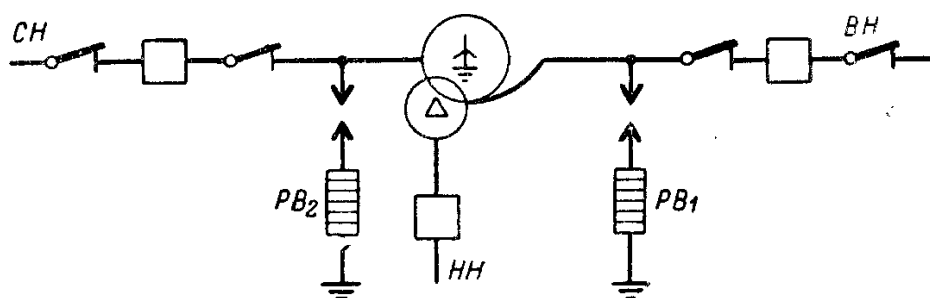


Рисунок 11.1 – Защита обмоток автотрансформаторов от перехода волн.

При большем числе автотрансформаторов на подстанции требуется соответственно и большее число разрядников для их защиты. Поэтому целесообразен индивидуальный подход к защите автотрансформаторов.

Рассмотрим этот вопрос подробнее. Предположим, что автотрансформатор не имеет специальной защиты и РВ установлены на шинах подстанции. Пусть волна перенапряжения, приходящая с линии ВН (или СН), создала на разряднике ВН (или СН) остаточное напряжение $U_{0ВН}$ (или $U_{0СН}$). Полагаем обмотку другой ступени напряжения — соответственно СН или ВН — отключенной от шин и определим напряжение $U_{ВН}$ (или $U_{СН}$) на отключенной обмотке, возникающее в результате перехода волн между обмотками. Обозначим коэффициент перехода волны с обмотки ВН на обмотку СН через $a_{СН}$, а с обмотки СН на обмотку ВН через $a_{ВН}$. Тогда с учетом фазных напряжений $U_{ФВН}$ и $U_{ФСН}$ справедливы следующие формулы:

$$\begin{aligned} U_{CH} &= a_{CH} \left[1, 1 U_{0BH} \pm U_{\phi BH} \left(1 - \frac{1}{a_{CH} k_T} \right) \right] \\ U_{BH} &= a_{BH} \left[1, 1 U_{0CH} \pm U_{\phi CH} \left(1 - \frac{1}{a_{BH} k_T} \right) \right] \end{aligned} \quad (11.2)$$

где k_T – коэффициент трансформации. Знак плюс или минус выбирается в зависимости от знака выражения в круглых скобках таким, при котором U_{CH} или U_{BH} максимально.

Величины напряжений U_{CH} и U_{BH} должны быть сопоставлены с импульсными испытательными напряжениями при полной волне как для внутренней изоляции трансформаторов (испытание без возбуждения), так и для внешней. Если U_{CH} или U_{BH} оказываются меньшими $U_{ИСП}$ то в установке РВ специально для защиты обмотки СН (или ВН) от перехода волн нет необходимости. Этот вывод, однако, не касается обмоток, которые необходимо защищать от коммутационных перенапряжений.

Автотрансформаторная схема соединения обмоток принципиально позволяет выполнять схему защиты, показанную на рисунке 7.2,а. В этой схеме разрядники РВ2 и РВ1 выбираются на напряжения, соответствующие СН и разности ВН и СН. Так, например, для автотрансформатора 750/330 кВ требуются разрядники РВМГ-420 и РВМГ-330.

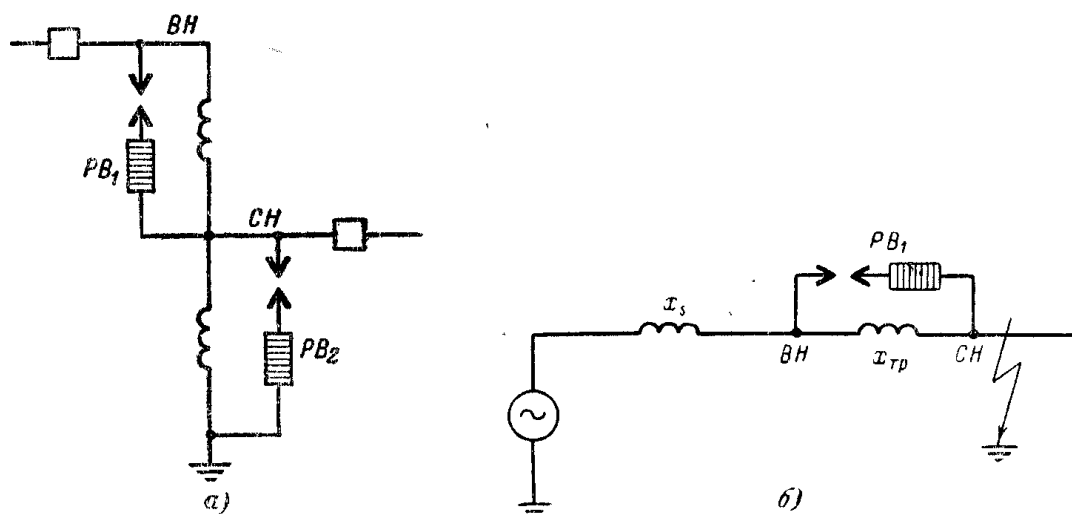


Рисунок 11.2 – Защита обмоток автотрансформаторов совмещенными вентильными разрядниками. а – схема включения РВ; б – схема расчета напряжения U

Использование совмещенной схемы защиты связано, однако, со следующей особенностью. В случае короткого замыкания (вызванного грозовым перенапряжением) на стороне СН на разрядник РВ1 действует напряжение рабочей частоты, определяемое схемой на рисунок 11.2, б. Если внешнее реактивное сопротивление x_s мало, то это напряжение приближается к полному напряжению ВН, на которое разрядник РВХ не рассчитан. В электропередачах 750—1 000 кВ реактивное сопротивление линии обычно значительно превышает реактивное сопротивление автотрансформатора и напряжение на РВ1 не превышает его номинального значения (ВН-СН).

Применение схемы на рисунке 11.2 позволяет снизить стоимость защиты и выравняет кривую первоначального распределения напряжения в обмотках СВН.

В целях снижения токов короткого замыкания часть трансформаторов в сетях с эффективно заземленной нейтралью (сети 110–220 кВ) может иметь разземленную нейтраль. Падение волн по всем трем фазам ведет к появлению перенапряжений в нейтрали, достигающих 170 – 190% амплитуды волн U_0 на линейных вводах.

Внутренняя и внешняя изоляция нейтрали такого трансформатора может выполняться на тот же класс напряжения, что и изоляция линейного конца обмотки, или на сниженный класс напряжения. В настоящее время трехфазные трансформаторы выпускаются только со сниженной изоляцией нейтрали. Во всех случаях защита нейтрали осуществляется вентильным разрядником на номинальное напряжение, соответствующее классу изоляции нейтрали. Для защиты пониженной изоляции нейтрали трансформаторов 110 кВ обычно устанавливаются разрядники 2ХРВС-20, трансформаторов 220 кВ — разрядники РВС-110.

Во время коммутационных операций неодновременность включения и отключения фаз трансформаторного выключателя или разъединителя может повести к срабатыванию разрядника в нейтрали и кратковременному воздействию на него фазного напряжения сети. Разрядник в нейтрали должен гасить дугу сопровождающего тока при этом напряжении. Разрядники 2ХРВС-20 и РВС-110 обычно удовлетворяют этому условию.

В сетях с изолированной нейтралью 35 кВ выведенная нейтраль трансформаторов защищается разрядником, рассчитанным на максимальное напряжение рабочей частоты на линейном конце, поделенное на 1,73. Установка разрядника обязательна при включении в нейтраль дугогасящей катушки.

В настоящее время в электрических сетях широко применяется регулирование напряжения под нагрузкой. С этой целью в нейтрали трансформаторов и автотрансформаторов включаются регулировочные трансформаторы, обычно по схеме на рисунке 7.3, с реверсивным регулированием напряжения в пределах $\pm 10\%$ (или несколько выше). Для защиты изоляции регулировочного трансформатора между концом и началом обмотки каждой фазы включается разрядник, рассчитанный на максимальное рабочее напряжение, соответственно равное или большее $0,1 U_{РАБ}$ разрядника, установленного на линейном выводе трансформатора.

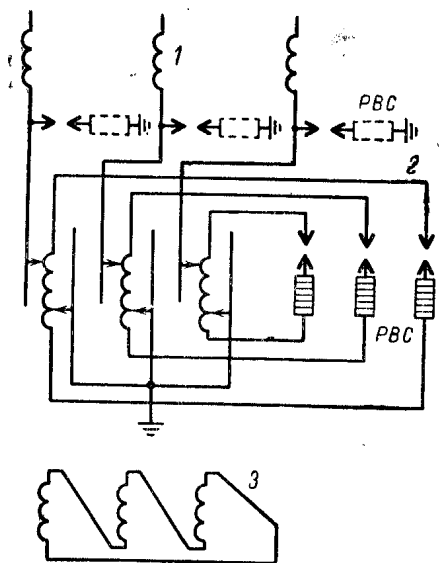


Рисунок 11.3 – Защита регулировочного автотрансформатора. 1 — главный трансформатор; 2 — регулировочный автотрансформатор; 3 — возбуждающая обмотка.

Обычно устанавливаются также разрядники на нейтральных выводах основного трансформатора (на рисунке 11.3 показаны пунктиром). Однако эти разрядники оказываются «шунтированными» разрядниками на выводах вольтодобавочного трансформатора и поэтому играют роль резервной защиты.

Опасные перенапряжения могут возникать в регулировочных обмотках вольтодобавочных трансформаторов. Схема такого трансформатора приведена на рисунке 11.4. Волна с амплитудой U_0 , набегающая со стороны высокого напряжения, ложится полностью на вольтодобавочную обмотку 1 – 2; вывод 2, присоединенный к линии, сохраняет низкий потенциал. Волна в обмотке 1 – 2 возбуждает в регулировочной обмотке 1'–2' напряжение, примерно равное $k_T U_0$, где k_T — коэффициент трансформации. Значение k_T близко к единице. Напряжение $k_T U_0$ в свою очередь возбуждает между концами 3–4 автотрансформатора напряжение $k_{T1} k_T U_0$. Коэффициент трансформации $k_{T1} > 1$ и достигает максимума при сближении регулировочных контактов. Таким образом, на изоляцию регулировочной обмотки воздействует напряжение, превышающее амплитуду волны на стороне высокого напряжения, между тем как регулировочная обмотка выполняется с пониженным классом изоляции. Защита такой обмотки должна осуществляться вентильным разрядником.

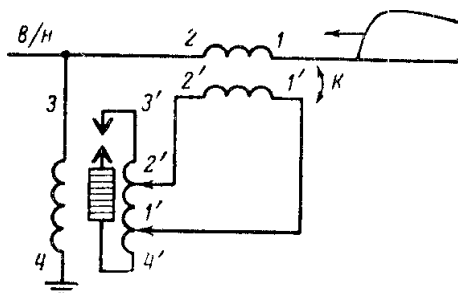


Рисунок 11.4 – Защита обмоток вольтодобавочного трансформатора

Типы разрядников для защиты регулировочных и вольтодобавочных трансформаторов и места присоединения РВ указываются заводами — поставщиками трансформаторов.

В некоторых случаях обмотки НН в высоковольтных трансформаторах остаются постоянно или длительно неприсоединенными к другим элементам сети, иначе говоря, свободными. Свободные обмотки НН часто встречаются в автотрансформаторах, где эти обмотки играют роль компенсационных (рисунок 11.5,а). В блочной схеме на рисунке 11.5,б при выводе одного из генераторов в капитальный ремонт его трансформаторная обмотка НН остается длительно свободной. Встречаются и другие аналогичные случаи.

При воздействии грозовых волн со стороны ВН (или СН) возникает переход волн на обмотку НН. Опасен обычно емкостный переход волн. В эксплуатации наблюдались случаи перекрытия внешней изоляции НН вследствие этих переходов. Опасные переходы волн наблюдались не только при грозовых перенапряжениях, но и при коммутациях, например включениях трансформатора на стороне ВН.

Для защиты свободных обмоток НН на их выводах устанавливаются вентильные разрядники (рисунок 11.5). Если свободные обмотки соединены в звезду, нейтраль звезды, кроме того, заземляется.

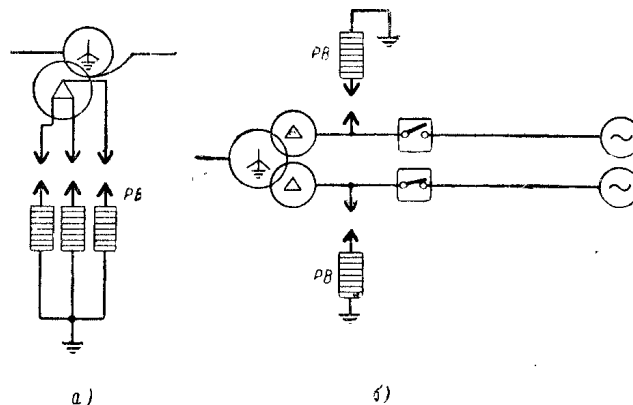


Рисунок 11.5 – Защита отключенных (свободных) обмоток НН. а - автотрансформаторов; б – повышающих трансформаторов сдвоенных блоков.

Задания

1. Определить необходимость установки РВ для защиты обмоток автотрансформатора 220/110 кВ с коэффициентами $a_{сн}=0,6$ и $a_{вн}=2,5$. Номинальное напряжение обмоток трансформатора 230 и 121 кВ. На шинах подстанции установлены разрядники типа РВМГ.

Решение.

Остаточное напряжение РВМГ-220 и РВМГ-110 составляет 570 и 295 кВ, соответственно. Подставляем в формулы (11.2) численные значения ($k_T=1,9$; $U_{ФВН}=188$ кВ $U_{ФСН}=99$ кВ)

$$\begin{aligned} U_{CH} &= a_{CH} \left[1,1U_{0ВН} \pm U_{ФВН} \left(1 - \frac{1}{a_{CH} k_T} \right) \right] = 390 \\ U_{ВН} &= a_{ВН} \left[1,1U_{0СН} \pm U_{ФСН} \left(1 - \frac{1}{a_{ВН} k_T} \right) \right] = 875 \end{aligned} \quad \text{кВ} \quad (11.3)$$

Сравниваем эти значения с импульсными испытательными напряжениями классов 110 и 220 кВ. Наименьшие значения имеют $U_{исп}$ внешней изоляции: для класса 110 кВ—460 кВ, для класса 220 кВ—900 кВ. Для обеих ступеней воздействующие напряжения оказываются меньшими $U_{исп}$, поэтому возможен отказ от установки РВ на выводах автотрансформатора. Этот вывод несправедлив для атмосферных условий, существенно отличных от нормальных, например при большой высоте над уровнем моря.

2. Определить схему защиты от перенапряжений трехобмоточного автотрансформатора автотрансформатора 330/110/10 кВ с коэффициентами $a_{сн}=0,6$ и $a_{вн}=2,5$. Номинальное напряжение обмоток трансформатора 330 кВ и 115 кВ и 10,5 кВ. На шинах подстанции установлены разрядники типа РВМГ. Обмотка низшего напряжения не используется.

Контрольные вопросы

1. Каковы причины возникновения перенапряжений при коммутациях линий, конденсаторов, реакторов и трансформаторов?
2. Что называют координацией изоляции?
3. Каковы принципы защиты изоляции искровыми промежутками и роговыми разрядниками?
4. Каковы принципы защиты изоляции трубчатыми и вентильными разрядниками и ОПН?
5. Как выполняется защита от перенапряжений изоляции линий электропередачи?
6. Как выполняется защита от перенапряжений изоляции контактной сети?
7. Как выполняется защита от перенапряжений изоляции оборудования подстанций?

Список литературы, рекомендуемый к использованию по данной теме

Основная литература

1. Электроснабжение сельского хозяйства: учебник / т. Б. Лещинская, и. В. Наумов ; [ред. Г. В. Лихачёва]. - М. : Колос, 2008. - 655 с. – ISBN 978-5-9532-0560-3.
2. Расчет электрических полей устройств высокого напряжения : учеб. пособие / И. П. Белоедова, Ю. В. Елисеев, Е. С. Колечицкий и др. ; ред. Е. С. Колечицкий. - М.: ИД МЭИ, 2008. - 248 с. – ISBN 978-5-383-00072-4

Дополнительная литература

3. Техника высоких напряжений : учебник для вузов / под ред. Д. В. Разевига. – 2-е изд., пер. и доп. – М. : Энергия, 1976. – 488 с.
4. Техника высоких напряжений(изоляция и перенапряжение в электрических установках) : учебник для техникумов / В. П. Ларионов, В.

В. Базуткин, Ю. Г. Сергеев ; под ред. В. П. Ларионова. – М. : Энергоиздат,
1982. – 296 с.

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего профессионального образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Методические указания

по расчету контрольной работы
по дисциплине «Техника высоких напряжений» для студентов направления
подготовки /специальности
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
Направленность (профиль) Цифровые технологии в электроэнергетике

Ставрополь, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

1. Формулировка задания и его объем.....	4
Задача 1 - Расчет параметров газового промежутка	4
Задача 2 - Электрический расчет кабеля.....	5
Задача 3 - Расчет потерь на корону.....	5
Задача 4 - Тепловой расчет кабеля.....	6
Задача 5 - Расчет гирлянды ВЛЭП.....	7
2. Общие требования к написанию домашнего задания.	
Требования к оформлению домашнего задания.....	8
3. Рекомендации по организации работ над домашним заданием, примерный календарный план его выполнения	8
4. Порядок защиты и ответственность студента за выполнение домашнего задания.....	9
Список рекомендуемой литературы	10

1. Формулировка задания и его объем

Контрольная работа включает в себя решение 5 задач. Перед решением, необходимо изучить теоретический материал по темам: «Электрическая прочность газовых промежутков», «Коронный разряд на линиях электропередачи», «Линейные и аппаратные изоляторы», «Кабельные линии 110 кВ», освоить методы расчета и конструирования внешней и внутренней изоляции и в соответствии с заданным вариантом, выполнить решение.

Задача 1. Расчет параметров газового промежутка

- Определить пробивное напряжение и электрическую прочность газового промежутка с однородным полем. Расстояние между электродами S .

Таблица 1 - Варианты заданий

Вариант	Газ	Температура, °C	S , см	Давление, кПа
1	Воздух	54	11	39
2	Кислород	51	15	111
3	Азот	403	16	94
4	Водород	233	13	445
5	Аргон	579	18	114
6	Гелий	58	6	330
7	Неон	486	5	456
8	Воздух	82	12	462
9	Азот	483	3	92
10	Элегаз	60	3	293

11	Воздух	428	23	473
12	Кислород	139	22	298
13	Азот	397	6	143
14	Водород	422	11	188
15	Аргон	39	16	402
16	Гелий	494	12	54
17	Неон	291	15	304
18	Воздух	233	22	115
19	Азот	568	16	329
20	Элегаз	312	15	310
21	Воздух	262	5	232
22	Кислород	502	14	210
23	Азот	252	7	304
24	Водород	589	16	476
25	Аргон	433	15	208
26	Гелий	85	13	109
27	Неон	497	19	296
28	Воздух	281	16	321
29	Азот	-22	20	44
30	Элегаз	326	15	145
31	Воздух	300	23	450
32	Кислород	500	18	370
33	Азот	381	17	209
34	Водород	499	9	454
35	Аргон	30	8	206
36	Гелий	161	4	190
37	Неон	143	21	378

38	Воздух	50	5	375
39	Азот	494	3	116
40	Элегаз	344	16	347
41	Воздух	122	14	197
42	Кислород	-39	11	73
43	Азот	476	12	117
44	Водород	95	5	334
45	Аргон	314	19	350
46	Гелий	33	21	58
47	Неон	441	22	33
48	Воздух	308	8	167
49	Азот	239	4	88
50	Элегаз	406	20	53
51	Кислород	51	15	111
52	Водород	233	13	445
53	Гелий	58	6	330
54	Воздух	82	12	462
55	Элегаз	60	3	293
56	Кислород	139	22	298
57	Водород	422	11	188
58	Гелий	494	12	54
59	Воздух	233	22	115
60	Элегаз	312	15	310
61	Кислород	502	14	210
62	Водород	589	16	476
63	Гелий	85	13	109
64	Воздух	281	16	321

65	Элегаз	326	15	145
66	Кислород	500	18	370
67	Водород	499	9	454
68	Гелий	161	4	190
69	Воздух	50	5	375

Задача 2. Электрический расчет кабеля

Рассчитать толщину изоляции одножильного кабеля с радиусом жилы r_0 -
Номинальное напряжение $U_{ном}$. Допустимую рабочую напряженность
обосновать по виду изоляции. Дать предложения и расчеты по уменьшению
толщины изоляции.

Таблица 2 - Варианты заданий

№ Варианта	r_0 , мм	Тип изоляции	$U_{ном}$, кВ
1	23	Бумажномаслянная	6
2	22	Полиэтилен	10
3	21	Поливинилхлорид	35
4	7	Бумажная с пропиткой элегазом	110
5	36	Резиновая	154
6	17	Элегаз под давлением 1 МПа	220
7	23	Маслонаполненная	330
8	22	В трубе с маслом под давлением	400
9	14	Полистирол	6
10	6	Бумажная с вязкой пропиткой	35
11	9	Бумажномаслянная	6

12	13	Полиэтилен	10
13	10	Поливинилхлорид	35
14	17	Бумажная с пропиткой элегазом	110
15	16	Резиновая	154
16	20	Элегаз под давлением 1 МПа	220
17	15	Маслонаполненная	330
18	26	В трубе с маслом под давлением	400
19	21	Полистирол	6
20	6	Бумажная с вязкой пропиткой	35
21	27	Бумажномаслянная	6
22	13	Полиэтилен	10
23	6	Поливинилхлорид	35
24	15	Бумажная с пропиткой элегазом	110
25	6	Резиновая	154
26	26	Элегаз под давлением 1 МПа	220
27	15	Маслонаполненная	330
28	20	В трубе с маслом под давлением	400
29	27	Полистирол	6
30	20	Бумажная с вязкой пропиткой	35
31	25	Бумажномаслянная	6
32	20	Полиэтилен	10
33	19	Поливинилхлорид	35
34	22	Бумажная с пропиткой элегазом	110
35	25	Резиновая	154
36	14	Элегаз под давлением 1 МПа	220
37	24	Маслонаполненная	330
38	27	В трубе с маслом под давлением	400
39	23	Полистирол	6
40	27	Бумажная с вязкой пропиткой	35
41	18	Бумажномаслянная	6

42	25	Полиэтилен	10
43	10	Поливинилхлорид	35
44	25	Бумажная с пропиткой элегазом	110
45	26	Резиновая	154
46	21	Элегаз под давлением 1 МПа	220
47	20	Маслонаполненная	330
48	41	В трубе с маслом под давлением	400
49	25	Полистирол	6
50	23	Бумажная с вязкой пропиткой	35
51	23	Бумажномаслянная	6
52	21	Поливинилхлорид	35
53	36	Резиновая	154
54	23	Маслонаполненная	330
55	14	Полистирол	6
56	9	Бумажномаслянная	6
57	10	Поливинилхлорид	35
58	16	Резиновая	154
59	15	Маслонаполненная	330
60	21	Полистирол	6
61	27	Бумажномаслянная	6
62	6	Поливинилхлорид	35
63	6	Резиновая	154
64	15	Маслонаполненная	330
65	24	Маслонаполненная	330
66	19	Поливинилхлорид	35
67	14	Полистирол	6
68	10	Поливинилхлорид	35

Задача 3. Расчет потерь на корону

Рассчитать среднегодовые потери мощности на корону для трехфазной ВЛЭП с горизонтальным расположением фаз, напряжением U_n , степенью расщепления n , шагом расщепления α и диаметром проводников в фазе d для района с суммарной длительностью хорошей погоды 7200 часов, тумана 235 часов, дождя 500 часов с общим количеством осадков 600 мм, снега 600 часов с количеством 200 мм, изморози 225 часа при атмосферном давлении 720 мм рт.ст. Средние температуры при снеге и изморози -5°C , хорошей погоде $+20^\circ\text{C}$, дожде и тумане $+10^\circ\text{C}$, Высота подвеса проводов над землей S и расстоянием между проводами a .

Таблица 3 - Варианты заданий

1 цифра варианта	U_n , кВ	n	d , мм	a , м	S , м	α , см
1	154	2	16	13	14	49
2	220	2	28	21	17	46
3	330	2	20	19	19	46
4	330	3	22	16	10	33
5	500	2	18	17	9	30
6	500	3	30	22	18	45
7	500	4	25	30	18	48
8	750	6	18	13	7	45
9	750	8	19	24	9	43
10	1150	8	28	26	12	44
11	154	2	21	22	19	40
12	220	2	18	24	14	35

13	330	2	18	21	13	43
14	330	3	30	21	20	35
15	500	2	15	15	18	39
16	500	3	17	20	8	37
17	500	4	15	23	10	40
18	750	6	25	22	20	38
19	750	8	21	26	16	31
20	1150	8	16	30	15	42
21	154	2	25	23	16	39
22	220	2	25	22	8	38
23	330	2	23	20	11	30
24	330	3	16	19	19	47
25	500	2	19	29	12	44
26	500	3	28	15	12	42
27	500	4	16	25	9	41
28	750	6	26	23	8	38
29	750	8	28	23	13	49
30	1150	8	19	21	17	49
31	154	2	25	19	9	42
32	220	2	27	30	17	38
33	330	2	28	22	14	40
34	330	3	29	13	18	47
35	500	2	22	17	14	46
36	500	3	20	23	18	42
37	500	4	21	19	9	36

38	750	6	15	24	11	47
39	750	8	27	20	6	36
40	1150	8	16	26	12	47
41	154	2	25	10	11	34
42	220	2	17	18	9	48
43	330	2	16	27	18	31
44	330	3	15	28	19	31
45	500	2	25	23	9	35
46	500	3	29	25	14	32
47	500	4	21	29	12	40
48	750	6	19	18	18	31
49	750	8	25	28	10	37
50	1150	8	15	19	16	40
51	220	2	28	21	17	46
52	500	2	18	17	9	30
53	500	4	25	30	18	48
54	750	8	19	24	9	43
55	750	8	21	26	16	31
56	154	2	25	23	16	39
57	500	2	19	29	12	44
58	500	4	16	25	9	41
59	750	8	28	23	13	49
60	154	2	25	19	9	42
61	330	2	28	22	14	40
62	500	2	22	17	14	46

63	500	4	21	19	9	36
64	750	8	27	20	6	36
65	154	2	25	10	11	34
66	330	2	28	22	14	40
67	500	4	21	19	9	36
68	500	2	25	23	9	35

Задача 4. Тепловой расчет кабеля

Определить допустимый в летнее время ток нагрузки трехфазной кабельной линии из трех одножильных маслонаполненных кабелей, проложенных в земле по вершинам треугольника вплотную: номинальное напряжение $U_{ном}$, сечение жилы q мм², толщина свинцовой оболочки 3 мм, толщина защитных покровов S мм.

Глубина прокладки кабелей – L , грунт – сухая почва

Таблица 4 - Варианты заданий

№ варианта	$U_{ном}$, кВ	q , мм ²	S , мм	L , см
1	35	549	6	186
2	75	662	2	63
3	110	703	7	181
4	154	603	2	74
5	220	757	3	273
6	330	352	9	87
7	400	343	7	283
8	330	566	5	62
9	220	278	5	134
10	154	276	6	150

11	35	945	7	287
12	75	916	6	184
13	110	382	1	223
14	154	529	2	115
15	220	702	9	181
16	330	561	8	150
17	400	678	4	196
18	330	884	6	221
19	220	700	10	159
20	154	653	3	52
21	35	347	2	200
22	75	644	10	194
23	110	394	1	106
24	154	684	2	51
25	220	668	2	71
26	330	596	9	264
27	400	793	7	253
28	330	696	1	223
29	220	844	7	183
30	154	661	3	86
31	35	929	3	232
32	75	782	4	58
33	110	734	4	211
34	154	452	8	71

35	220	445	6	287
36	330	287	8	119
37	400	881	2	295
38	330	324	5	123
39	220	263	2	142
40	154	713	2	105
41	35	636	6	110
42	75	527	6	276
43	110	572	4	276
44	154	322	8	70
45	220	790	4	93
46	330	861	9	244
47	400	899	8	103
48	330	440	4	51
49	220	302	3	79
50	154	828	3	128
51	220	757	3	273
52	400	343	7	283
53	220	278	5	134
54	35	347	2	200
55	110	394	1	106
56	220	668	2	71
57	400	793	7	253
58	220	844	7	183

59	35	929	3	232
60	110	734	4	211
61	220	445	6	287
62	400	881	2	295
63	220	263	2	142
64	35	636	6	110
65	110	572	4	276
66	220	790	4	93
67	400	899	8	103
68	220	302	3	79

Задача 5. Расчет гирлянды ВЛЭП

Выбрать тип и рассчитать количество изоляторов в гирлянде для ВЛ на напряжение U_n для заданной степени загрязненности атмосферы. |

Таблица 5 - Варианты заданий

№ варианта	U_n , кВ	опоры	Степень загрязненности атмосферы
1	35	деревянные	1
2	35	железобетонные	2
3	35	металлические	2
4	110	деревянные	5
5	110	железобетонные	2
6	220	железобетонные	4
7	330	металлические	6

8	500	металлические	6
9	750	металлические	2
10	1150	металлические	4
11	35	деревянные	6
12	35	железобетонные	4
13	35	металлические	2
14	110	деревянные	3
15	110	железобетонные	5
16	220	железобетонные	1
17	330	металлические	4
18	500	металлические	2
19	750	металлические	4
20	1150	металлические	4
21	35	деревянные	3
22	35	железобетонные	3
23	35	металлические	4
24	110	деревянные	6
25	110	железобетонные	3
26	220	железобетонные	2
27	330	металлические	4
28	500	металлические	4
29	750	металлические	1
30	1150	металлические	2
31	35	деревянные	5
32	35	железобетонные	5
33	35	металлические	3
34	110	деревянные	6

35	110	железобетонные	3
36	220	железобетонные	3
37	330	металлические	5
38	500	металлические	5
39	750	металлические	2
40	1150	металлические	4
41	35	деревянные	3
42	35	железобетонные	2
43	35	металлические	2
44	110	деревянные	4
45	110	железобетонные	4
46	220	железобетонные	1
47	330	металлические	1
48	500	металлические	3
49	750	металлические	2
50	1150	металлические	1
51	35	деревянные	1
52	35	железобетонные	2
53	110	деревянные	5
54	220	железобетонные	4
55	500	металлические	6
56	1150	металлические	4
57	35	железобетонные	4
58	110	деревянные	3
59	220	железобетонные	1
60	500	металлические	2
61	1150	металлические	4

62	35	железобетонные	3
63	110	деревянные	6
64	220	железобетонные	2
65	500	металлические	4
66	1150	металлические	2
67	35	железобетонные	5
68	220	железобетонные	3

Список рекомендуемой литературы

Основная учебная литература

1. Разевиг Д.В., Дмоховская Л.Ф., Ларионов В.П.: Техника высоких напряжений. Учебник для студентов электротехнических и электроэнергетических специальностей вузов. Под общей редакцией Д.В. Разевига.: М.: Энергия. 1990. 488с.
2. Ларина Э. Т. «Силовые кабели и высоковольтные кабельные линии» - М. Энергия, 1993.
3. Долгинов А. И. «Техника высоких напряжений в электроэнергетике» - М. Энергоатомиздат, 1968.

Дополнительная учебная литература

1. Ларионов В. П. «Техника высоких напряжений» - М.: Энергия, 1989.
2. Костенко Ю. М. «Техника высоких напряжений» - М.: Энергия, 1992.
3. Герасимов В. И. «Электротехнический справочник: В 4 т. Т. 2. Электротехнические изделия и устройства» - М.: Издательство МЭИ, 2001.
4. Идельчик В. И. «Электрические системы и сети» - М.: Энергоатомиздат, 1999.
5. Ушаков В. Я. Изоляция установок высокого напряжения М.: Энергоатом издат, 1994.
6. Ларионова В. П. «Техника высоких напряжений» - М.: Высшая школа,

1986.

7. Привезенцева В. А. «Основы кабельной техники» - М.: Энергия, 1975.
8. Большама Я. М. «Справочник по проектированию электроснабжения, линий электропередачи и сетей» - М.: Энергия, 1974.
9. Александров Г. П., Иванов В. Л. «Изоляция электрических аппаратов Высокого напряжения» - М.: Энергия, 1984.
10. Васильев А. А. «Электрическая часть станций и подстанций» - М.: Энергоатомиздат, 1990.
11. Минаков П. В. «Электрические изоляторы» - М. Энергия, 1992.
12. Горелов С. В. «Перенапряжения и молниезащита» - Учебное пособие 2003.