

Федеральное агентство по образованию
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГОУВПО «АмГУ»

УТВЕРЖДАЮ
Зав. кафедрой энергетики
_____ Н.В.Савина
« ____ » _____ 2007 г.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ПО ДИСЦИПЛИНЕ
«Изоляция и перенапряжение»

для специальности:

- 140204 – «Электрические станции»
- 140205 – «Электроэнергетические системы и сети»
- 140211 – «Электроснабжение»
- 140203 – «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем»

Составитель: Н.В. Савина

Благовещенск
2007 г.

Печатается по решению
редакционно-издательского совета
энергетического факультета
Амурского государственного университета

Н.В. Савина

Учебно-методический комплекс по дисциплине «Изоляция и перенапряжения» для студентов очной, заочной и сокращенной заочной форм обучения специальностей 140204 – «Электрические станции»; 140205 – «Электроэнергетические системы и сети»; 140203 – «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем»; 140211 – «Электроснабжение». – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2007, 134 с.

Учебно-методический комплекс ориентирован на оказание помощи профессорско-преподавательскому составу и студентам очной, заочной и сокращенной заочной форм обучения по дисциплине «Изоляция и перенапряжения» специальности 140211 – «Электрические станции»; 140205 – «Электроэнергетические системы и сети»; 140203 – «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем»; 140211 – «Электроснабжение» в формировании специальных знаний в области грозовых и внутренних перенапряжений, средств защиты от них, эксплуатации изоляции высоковольтных установок.

© Амурский государственный университет, 2007

© Н.В. Савина

СОДЕРЖАНИЕ

1. Рабочая программа дисциплины	4
1.1. Цели и задачи дисциплины, ее место в учебном процессе	5
1.1.1. Цель преподавания дисциплины	5
1.1.2. Задачи изучения дисциплины	6
1.1.3. Перечень дисциплин с указанием разделов (тем), усвоение которых необходимо при изучении данной дисциплины	8
1.2. Содержание дисциплины	9
1.2.1. Федеральный компонент	9
1.2.2. Наименование тем, их содержание и объем в часах	9
1.2.3. Практические занятия, их наименования и объем в часах	12
1.2.4. Лабораторные занятия, их наименования и объем в часах	13
1.2.5. Самостоятельная работа студентов.	13
1.2.6. Формы контроля знаний студентов.	14
1.3. Учебно-методические материалы по дисциплине	17
1.3.1. Литература	17
1.3.2. Периодические издания (профессиональные журналы)	19
1.3.3. Информационное обеспечение дисциплины	19
1.3.4. Перечень наглядных и других пособий	19
1.3.5. Программы для ПЭВМ	19
1.4. Учебно-методическая карта дисциплины	20
2. Краткий конспект лекций	21
2.1. Методические указания по проведению лекций	21
2.2. Краткий конспект лекций	23
3. Практические занятия	47
3.1. Методические рекомендации по проведению практических занятий	47
3.2. Методические указания по проведению практических занятий	49
4. Лабораторные занятия	70
5. Самостоятельная работа студентов	71
5.1. График самостоятельной работы студентов	71
5.2. Методические указания по выполнению домашних заданий и контрольных работ	73
6. Перечень программных продуктов, используемых студентами при изучении данной дисциплины	112
7. Методические указания по применению современных информационных технологий	112
8. Контроль качества образования	115
8.1. Методические указания профессорско-преподавательскому составу по организации межсессионного и экзаменационного контроля знаний студентов.	115
8.2. Фонды тестовых и контрольных заданий для оценки качества знаний	118
8.3. Экзаменационный контроль	129
9. Карта обеспеченности дисциплины кадрами профессорско - преподавательского состава	131
10. Список использованных источников	132

1. Рабочая программа дисциплины

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

по дисциплине «Изоляция и перенапряжение»

для специальности:

140204 – «Электрические станции»

140205 – «Электроэнергетические системы и сети»

140211 – «Электроснабжение»

140203 – «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем»

Очная форма обучения

Курс - четвертый

Семестр - 8

Лекции - 45 часов

Экзамен - 8 семестр

Практические занятия - 15 часов

Лабораторные занятия - 15 часов

Самостоятельная работа – 32 часа

Всего часов - 107

Заочная форма обучения

Курс 5 семестр 10

Лекции – 16 часов

Практические занятия – 6 часов

Лабораторные занятия -

Самостоятельная работа - 85 часов

Всего часов - 107

Сокращенная форма обучения

Курс 3 семестр 6

Лекции – 18 часов

Практические занятия - 10 часов

Лабораторные занятия -

Самостоятельная работа – 71 час

Всего часов - 107

Рабочая программа составлена на основании *Государственного образовательного стандарта ВПО по направлению подготовки дипломированного специалиста 650900 ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА и типовых программ по специальностям 140204, 140205, 140211, 140203.*

Составитель: Савина Н.В.

2006 г.

1.1. Цели и задачи дисциплины, ее место в учебном процессе

Дисциплина «Изоляция и перенапряжения» относится к дисциплинам специализации и включает в себя углубленную проработку вопросов эксплуатации изоляционных конструкций при рабочих напряжениях и перенапряжениях. Она завершает цикл подготовки дипломированных специалистов по вопросам техники высоких напряжений.

1.1.1. Цель преподавания дисциплины.

Предмет изучения дисциплины - грозовые и внутренние перенапряжения, возникающие при эксплуатации электрических установок и систем, средства и методы испытания высоковольтных изоляционных конструкций.

Цель преподавания дисциплины заключается в формировании у студентов систематизированных знаний о причинах возникновения и физической сущности грозовых и внутренних перенапряжений, об электрических воздействиях их на изоляцию оборудования и линий электропередачи и методах и средствах их ограничений, о формах и методах испытания изоляции линий и электроустановок, а также в формировании у студентов креативной готовности к обеспечению надежной эксплуатации изоляции электроустановок при воздействии перенапряжений и защите от них.

Основой для изучения дисциплины являются следующие: физика, математика, ТОЭ, Электроматериаловедение, электроэнергетика, Эл. часть станций и подстанций.

В то же время она является базой для освоения следующих дисциплин «Основы эксплуатации электрооборудования станций и подстанций», «Эксплуатация электроэнергетических систем», «Эксплуатация систем электроснабжения», «Автоматика энергосистем».

1.1.2. Задачи изучения дисциплины.

Задачи изучения дисциплины заключаются в приобретении студентами знаний, умений и навыков, позволяющих на основе анализа электрического воздействия перенапряжений на изоляционные конструкции выбирать способы и средства защиты электроустановок от них, исключать возникновение ситуаций, приводящих к ряду внутренних перенапряжений, осуществлять диагностику изоляции.

В соответствии с требованиями к уровню профессиональной подготовленности дипломированного специалиста студент должен **знать**:

- классификацию и общие характеристики перенапряжений и средств защиты от них;
- грозовые перенапряжения;
- молниезащиту линий электропередачи;
- молниезащиту станций и подстанций;
- молниезащиту электрических машин высокого напряжения;
- квазистационарные перенапряжения;
- коммутационные перенапряжения;
- защитные аппараты;
- координацию изоляции;
- работу заземляющих систем в импульсном режиме;
- испытательные установки и методы проведения испытаний;
- профилактические испытания изоляций.

Уметь:

- оценивать влияние перенапряжений на электрические сети, электрооборудование станций и подстанций;
- анализировать схему сети станции с точки зрения возникновения в ней перенапряжений;

- оценивать амплитуду и вероятность возникновения перенапряжений, а также вероятность набегания электромагнитной волны с воздушных линий электропередачи и на оборудование станций и подстанций;
- рассчитывать число отключений линий электропередачи при грозовых перенапряжениях;
- определять показатели надежности молниезащиты, РУ станций и подстанций;
- выбирать систему молниеотводов и рассчитывать зоны молниезащиты станций и подстанций от прямых ударов молнии;
- рассчитывать импульсные сопротивления заземления РУ станций и подстанций опор ВЛ;
- выбирать защиту изоляции электроустановок от внутренних перенапряжений;
- определять максимальную длину защитного подхода;
- осуществлять координацию импульсной прочности изоляции подстанционного (станционного оборудования) с защитными характеристиками ОПН;
- определять ожидаемый срок службы ОПН;
- рассчитывать резонансные перенапряжения и выбирать меры защиты от них;
- выбирать оптимальные схемы молниезащиты, уметь расставлять защитные аппараты на схемах и планах подстанций и станций.

Студент при усвоении материалов дисциплины должен получить навыки анализа перенапряжений, выбора и проектирования средств защиты от грозовых и внутренних перенапряжений, выбора способов ограничения перенапряжений, эксплуатации изоляционных конструкций при воздействии перенапряжений, а также профилактического контроля изоляции, закрепления полученных теоретических знаний при выполнении дипломных проектов.

1.1.3. Перечень дисциплин с указанием разделов (тем), усвоение которых необходимо при изучении данной дисциплины.

Дисциплина базируется на усвоении студентами следующих курсов:

Высшая математика: математический анализ, решение дифференциальных уравнений, определенные интегралы, теория вероятностей и математическая статистика;

Физика: электричество, магнетизм;

Теоретические основы электротехники: весь курс;

Электроматериаловедение: поляризация, электропроводность, диэлектрические потери и пробой диэлектриков, классификация, свойства и характеристики диэлектриков, физические процессы, протекающие в диэлектриках под воздействием электромагнитных полей;

Математические задачи электроэнергетики: применение теории вероятностей и математической статистики для решения электроэнергетических задач;

Электроэнергетика, передача и распределение электроэнергии: общие сведения об электроэнергетических системах и сетях, конструктивных особенностях и параметрах схем замещения линий электропередачи;

Электроэнергетика. Изоляция: характеристика и конструкция внешней и внутренней изоляции; электрические разряды во внешней и внутренней изоляции;

Электрическая часть станций и подстанций: конструкции и характеристики силового электрического оборудования.

1.2. Содержание дисциплины

1.2.1. Федеральный компонент

Дисциплина входит в цикл дисциплин специальности и предназначена для углубленного изучения с акцентом на задачи эксплуатации электроэнергетических систем части раздела дисциплины «Электроэнергетика» (ОПД.Ф.08), посвященного перенапряжениям: «Молниезащита оборудования станций и подстанций; защита изоляции электрооборудования от внутренних перенапряжений».

Данная дисциплина обеспечивает выполнение требований к профессиональной подготовленности выпускников (п.7.1 ГОС ВПО по направлению подготовки «Электроэнергетика образца 2000») в части получения студентом знаний по принципам построения изоляционных конструкций устройств высокого напряжения, методов и средств испытаний и диагностики электроэнергетического оборудования.

1.2.2. Наименование тем, их содержание и объем в часах

Тема 1. Введение – 2 часа.

Общая характеристика перенапряжений. Классификация перенапряжений. Характеристика электрических сетей напряжением 6-1150 кВ. Аварийность в электрических сетях Современные состояния молниезащиты электроустановок и линий электропередачи.

Тема 2. Молния – как источник грозовых перенапряжений – 2 часа.

Развитие молнии. Количественные характеристики разряда молнии. Интенсивность грозовой деятельности. Грозопораженность воздушных линий.

Тема 3. Волновые процессы в ЛЭП – 4 часа.

Основные закономерности распространения электромагнитных волн. Эквивалентные схемы при волновых процессах. Набегания электромагнитных волн (ЭМВ) на шины подстанции. Прохождение ЭМВ через индуктивность прохождения ЭМВ мимо емкости. Волновые процессы в многопроводной

системе. Геометрический коэффициент связи. Распространение ЭМВ по нескольким проводам одновременно. Индуцированные перенапряжения. Влияние импульсной короны на волновой процесс.

Тема 4. Грозоупорность ВЛ – 4 часа.

Влияние конструктивных параметров ВЛ на показатели ее грозоупорности. Влияние природно-климатических условий и особенностей трассы на грозоупорность ВЛ. Разрядные характеристики линейной изоляции. Расчет числа грозových отключений ВЛ с тросом напряжением 110 кВ и выше. Расчет числа грозových отключений ВЛ без троса. Число отключений при ударах молнии вблизи ВЛ. Эксплуатационные показатели грозоупорности ВЛ.

Тема 5. Молниезащита подстанций и станций, ВЛ от прямых ударов молнии - 4 часа.

Задачи и критерии молниезащиты подстанций. Защита от прямых ударов молнии. Принципы действия и конструктивное исполнение молниеотводов. Стержневые, сетчатые и тросовые молниеотводы. Зоны защиты молниеотводов. Условия безопасного прохождения тока молнии по молниеотводу. Заземление молниеотводов, опор. Электрофизические характеристики грунта. Определение эквивалентного сопротивления неоднородного грунта. Стационарные и импульсные сопротивления заземления. Расчет сопротивления заземления (стационарного и импульсного) различных конструкций заземляющей системы.

Тема 6. Защитные аппараты и устройства – 4 часа.

Принцип действия защитных аппаратов. История развития защитных аппаратов: защитные промежутки, трубчатые и вентильные разрядники, ОПН. Вентильные разрядники, характеристики, конструктивное исполнение, группы вентильных разрядников, условия выбора вентильных разрядников. Комбинированные вентильные разрядники. Нелинейные ограничители перенапряжения (ОПН), конструкция, технические характеристики. Методика выбора ОПН. Определение ожидаемого срока службы ОПН. Длинноискровые разрядники.

Тема 7. Молниезащита ВЛ от перенапряжений – 2 часа.

Задачи и критерии молниезащиты линий. Допустимое число грозových отключений ВЛ и выбор средств защиты по критерию коммутационного ресурса линейных выключателей. Молниезащита ВЛ различных классов напряжений.

Тема 8. Молниезащита станций и подстанций, электрических машин высокого напряжения от набегающих волн перенапряжений – 5 часов.

Задачи и критерии молниезащиты подстанций и станций. Параметры импульсов грозových перенапряжений, набегающих на подстанции. Защита станций и подстанций от волн, набегающих с линий электропередач. Допустимые напряжения на защищаемой изоляции электрооборудования. Определение длины защищенного подхода к подстанции, станции. Эффективность защиты электрооборудования подстанции. Молниезащита подстанций различных классов напряжения. Молниезащита электрических машин. Определение показателей надежности молниезащиты РУ станций и подстанций. Координация импульсной прочности изоляции подстанционного (станционного) оборудования с защитными характеристиками ОПН.

Тема 9. Характеристика внутренних перенапряжений – 2 часа.

Перенапряжения – как случайное событие.

Коммутационные перенапряжения и их статистические характеристики. Квазистационарные перенапряжения. Методы их анализа.

Тема 10. Коммутационные перенапряжения и их ограничения – 6 часов.

Перенапряжения при плановых включениях линий. Перенапряжения при отключении перегруженных линий. Перенапряжения коммутации линии в блоке с трансформатором. АПВ линий. Перенапряжения при отключении коротких замыканий на линии. Перенапряжения при отключении реакторов, трансформаторов, электрических машин. Дуговые перенапряжения в сетях 3 ÷ 35 кВ. Основные принципы построения защиты от коммутационных перенапряжений, характеристика таких защит.

Тема 11. Квazистационарные перенапряжения – 4 часа.

Перенапряжения в конце разомкнутой линии (влияние емкостного эффекта). Перенапряжения при неполнофазных режимах. Дуговые перенапряжения. Резонансное смещение нейтрали в сети 3÷35кВ. Феррорезонансные перенапряжения. Интергармоники в электропередачах. Устройства защиты от перенапряжений.

Тема 12. Методы профилактического контроля изоляции – 4 часа.

Общая характеристика испытаний. Испытания установки и методы испытаний электрооборудования. Основы и методы неразрушающих испытаний изоляции. Использование абсорбционных явлений, контроль качества изоляции по тангенсу угла диэлектрических потерь, контроль изоляции по интенсивности частичных разрядов, тепловизионный контроль и т.д. Контроль изоляции повышенным напряжением.

1.2.3. Практические занятия, их наименования и объем в часах

Цель проведения практических занятий – научить студентов рассчитывать инженерные задачи, возникающие при проектировании и эксплуатации по обеспечению защиты подстанций, ВЛ, станций от набегающих волн перенапряжений и прямых ударов молнии.

№ п.п.	Наименование темы	Кол-во часов
1.	Расчет волновых процессов при перенапряжениях	2
2.	Грозоупорность ВЛ	2
3.	Защита подстанций, электрических станций, ВЛ от прямых ударов молнии	2
4.	Определение импульсного сопротивления заземления РУ, молниеотводов, опор	2
5.	ОПН, их характеристика и выбор. Выбор места расположения ОПН на плане РУ, на схеме.	2
6.	Определение длины защищенного подхода к ПС, электростанции	2
7.	Оценка надежности грозозащиты РУ ПС и станций	2
8.	Обзор задач по всем темам	1

Выполнение задач осуществляется с помощью пакета программ MathCad.

1.2.4. Лабораторные занятия, их наименования и объем в часах

Всего 15 часов

Целью проведения лабораторных занятий является изучение вопросов, связанных с эксплуатацией изоляции электроустановок и анализом перенапряжений и их влияния на электроустановки.

№ п.п.	Наименование лабораторных работ	Кол-во часов
1.	Изучение конструкции и методов измерения сопротивления элементов защитных аппаратов (на примере ОПН и РВ)	2
2.	Измерение тока проводимости защитных аппаратов. Измерение пробивного напряжения вентильных разрядников	2
3.	Испытание средств защиты, используемых в электроустановках	2
4.	Испытание повышенным напряжением промышленной частоты высоковольтных электрических аппаратов	2
5.	Методы профилактических испытаний изоляции силового трансформатора. Измерение сопротивления постоянному току обмоток трансформатора	2
6.	Испытание силовых кабелей выпрямленным током	2
7.	Исследование волновых процессов при перенапряжениях. Перенапряжения при работе длинной линии на холостом ходу	3

1.2.5. Самостоятельная работа студентов.

При изучении дисциплины реализуются следующие формы организации самостоятельной работы студентов:

- аудиторная СРС под руководством и контролем преподавателя с применением методов активного обучения: на лекциях, практических и лабораторных занятиях, контрольные работы и рефераты;
- внеаудиторная СРС под руководством и контролем преподавателя: консультации по разделам дисциплины: защита индивидуальных домашних заданий; деловые игры, оценка качества освоения разделов дисциплины, вынесенных на внеаудиторную СРС без преподавателя;
- подготовка к аудиторным занятиям;

- проработка устного материала, выполнение индивидуальных заданий, написание рефератов, подготовка к деловой игре;
- расчетно-графическая работа на тему «Защита РУ подстанции (станции) от прямых ударов молнии».

Объем и формы контроля самостоятельной работы отличаются для студентов очной и заочной (в том числе сокращенной) форм обучения и приведены в соответствии в табл. 1 - 2 по разделам дисциплины

Студент допускается к зачету или экзамену при условии выполнения всех видов самостоятельной работы, предусмотренных на практических и лабораторных занятиях.

1.2.6. Формы контроля знаний студентов.

Входит контроль – опрос, тестирование, промежуточный контроль

Перечень и темы промежуточных форм контроля знаний.

К промежуточным формам контроля знаний относятся:

- блиц-опрос на лекциях по пройденному материалу;
- контрольные работы;
- выполнение индивидуальных домашних заданий с последующей их защитой;
- коллоквиумы: «Грозовые перенапряжения», «Внутренние перенапряжения»;
- опрос студентов на практических занятиях;
- опрос во время допуска к проведению лабораторных занятий, защита лабораторных работ;
- тестирование.

Итоговый контроль – экзамен.

1.2.7. Вопросы к экзаменам и зачетам.

1. Общая характеристика перенапряжений.
2. Классификация перенапряжений.
3. Закономерности распространения электромагнитных волн перенапряжений
4. Многократные отражения электромагнитных волн перенапряжений и их анализ.
5. Набегание электромагнитных волн на шины подстанции.
6. Прохождение электромагнитных волн перенапряжений через индуктивность.
7. Прохождение электромагнитных волн перенапряжений мимо ёмкости
8. Волновые процессы в многопроводной системе.
9. Прохождение электромагнитных волн перенапряжений вдоль провода, расположенного вблизи другого изолированного провода (трос-провод).
10. Распространение электромагнитных волн перенапряжений по двум параллельным проводам в системе из трёх проводов(2троса-провод).
11. Распространение электромагнитных волн перенапряжений по нескольким проводам одновременно.
12. Затухание и деформация электромагнитных волн перенапряжений.
13. Влияние импульсной короны на волновой процесс перенапряжений.
14. Молния как источник грозовых перенапряжений.
15. Развитие молнии.
16. Основные параметры и электрические характеристики молнии.
17. Характеристики грозовой деятельности.
18. Эксплуатационные характеристики грозоупорности линий.
19. Прямой удар молнии в воздушную линию без тросов.
20. Прямой удар молнии в воздушную линию с тросом.
21. Определение удельного числа отключений ВЛ вследствие прямого удара молнии для линий с тросами и без них.
22. Индуцированные перенапряжения на ЛЭП.
23. Средства повышения грозоупорности ВЛ.
24. Молниеотводы, их принцип действия.
25. Конструктивное исполнение молниеотводов.
26. Конструктивное исполнение тросовых молниеотводов.
27. Зона защиты стержневых молниеотводов.
28. Зона защиты тросовых молниеотводов.
29. Условия безопасного прохождения молнии по молниеотводу.
30. Заземление в электроустановках высокого напряжения.
31. Заземление молниеотводов, опор.
32. Заземление подстанций.
33. Условия прохождения тока молнии по заземлителю.
34. Общая характеристика защитных аппаратов от перенапряжений и их анализ.
35. Защитные промежутки.
36. Трубочатые разрядники.

37. Вентильные разрядники.
38. Группы вентильных разрядников и их электрические характеристики.
39. Комбинированные вентильные разрядники.
40. ОПН.
41. Защита подстанций от набегающих импульсов грозовых перенапряжений.
42. Типовые схемы молниезащиты подстанций.
43. Особенности молниезащиты подстанций различного уровня напряжения, присоединенных к ВЛ отпайками.
44. Молниезащита генераторных блоков и электрических машин.
45. Координация изоляции электрооборудования подстанции с защитными аппаратами.
46. Определение длин защищенных подходов к подстанции.
47. Грозоупорность подстанций.
48. Общая характеристика коммутационных перенапряжений.
49. Перенапряжение переходного процесса при отключении ёмкости ненагруженных линий.
50. Перенапряжение переходного процесса при включении разомкнутой линии.
51. Перенапряжение переходного процесса при АПВ.
52. Перенапряжение переходного процесса при отключении КЗ.
53. Перенапряжение переходного процесса при отключении малых индуктивных токов.
54. Общая характеристика установившихся перенапряжений в электропередачах.
55. Феррорезонансные перенапряжения в сети с изолированной нейтралью с падением провода.
56. Влияние насыщения силовых трансформаторов на повышение напряжения в системах с заземленной нейтралью.
57. Сравнительный анализ методов расчета коммутационных и установившихся перенапряжений.
58. Общая характеристика способов и средств ограничения внутренних перенапряжений.
59. Ограничение внутренних перенапряжений с помощью вентильных разрядников и выключателей двухступенчатого действия с шунтирующими сопротивлениями.
60. Основные принципы построения защит от коммутационных перенапряжений.
61. Испытательные установки и методы испытаний электрооборудования.
62. Основы неразрушающих испытаний изоляции.
63. Использование абсорбционных явлений.
64. Контроль качества изоляции по тангенсу угла диэлектрических потерь.
65. Контроль изоляции по интенсивности частичных разрядов.
66. Тепловизионный контроль.
67. Испытания изоляции повышенным напряжением.

1.3. Учебно-методические материалы по дисциплине.

1.3.1. Литература

Основная литература

1. Техника высоких напряжений: Учебник для вузов / И.М.Богатенков, Ю.Н.Бочаров, Н.И. Гумерова, Г.М.Иманов и др.; под ред. Г.С.Кучинского. – СПб.: Энергоатомиздат, 2003.– 608 с.
2. Защита сетей 6-35 кВ от перенапряжений / Ф.Х. Халилов, Г.А. Евдокунин, В.С. Поляков и др.; под ред. Ф.Х. Халилова. – СПб.: Энергоатомиздат, 2002. – 272 с.
3. Гольдштейн В.Г., Халилов Ф.Х., В.П.Бобров. Перенапряжения и защита от них в электрических сетях 35-220 кВ. – Самара.: Изд-во СамГТУ, 2001. – 259 с.
4. О.А. Аношин, П.П. Кутлер. Ограничители перенапряжений 6-35 кВ. Конструкция, расчет, рекомендации по эксплуатации. – М.: ИУЭ ГУУ, ВИПКЭнерго, ИПК Госслужбы, 2004. – 48 с.
5. Г.М. Иманов, Ф.Х. Халилов, А.И. Таджибаев. Методика выбора нелинейных ограничителей, необходимых для защиты изоляции сетей низкого, среднего, высокого и сверхвысокого напряжения трехфазного переменного тока. – СПб.: ПЭ ИПК, 2004. – 31 с.
6. Основы современной энергетики: Уч-ник для вузов ч. 2 Современная электроэнергетика / под ред. А.П. Бурмана и В.А. Строева. – М. Изд-во МЭИ, 2004. – 462 с.

Дополнительная литература

7. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 57 с.
8. Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования. Вып.21. Опыт создания и эксплуатации электрических аппаратов высокого напряжения с элегазовой изоляцией. – СПб: ПЭИПК, 2003. – 217 с.
9. Электрические аппараты высокого напряжения/ под ред. Г.Н. Александрова. Изд-во СПб ГТУ, 2000. -503 с.
10. Исследования и области применения ограничителей перенапряжений / Сборник научных трудов НИИПТ. – Ленинград.: Энергоиздат, 1981. – 87 с.
11. Полевой И.Ф., Михайлов Ю.А., Халилов Ф.Х. Внутренние перенапряжения на электрооборудовании высокого и сверхвысокого напряжения. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. -152 с.
12. Бикфорд Дж.П., Мюлина Н., Рид Дж. Р. Основы теории перенапряжений в электрических сетях. – М.: Энергоиздат, 1981. – 168 с.
13. Физика грозового разряда и грозозащита линий электропередачи / М.В. Костенко, И.М. Богатенков, Ю.А. Михайлов, Ф.Х. Халилов. – Л.: Изд-во ЛПИ, 1982. - 77 с.

14. Заземления в сетях высокого напряжения и средства защиты от перенапряжений / М.В. Костенко, И.М. Богатенков, Ю.А. Михайлов, Ф.Х. Халилов. – Л.: Изд-во ЛПИ, 1983. – 74 с.
15. Базуткин В.В., Ларионов В.П., Пинталь Ю.С. и др. Техника высоких напряжений. Изоляция и перенапряжения в электрических системах. / Под ред. В.П.Ларионова. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 464 с.
16. Сви П.М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 126 с.
17. Техника высоких напряжений. / Под ред. Д.В. Разевича. – М.: Энергия, 1976. – 426 с.
18. Степанчук К.Ф., Тиняков Н.А. Техника высоких напряжений. – Минск, Высш.школа, 1982. – 367 с.
19. Техника высоких напряжений. Теоретические и практические основы применения. / М.Б. Бейер, В.Бек, К. Меллер, В. Цэнгль. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 555 с.
20. Александров Г.Н., Установки сверхвысокого напряжения и охрана окружающей среды. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 308 с.
21. Лабораторные работы по ТВН / Аронов М.А. и др. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 352 с.
22. Справочник по электротехническим установкам высокого напряжения. / Под ред. И.А. Баумштейна, М.В.Хомякова. – М.: Энергия, 1981. – 568 с.
23. Электротехнический справочник в 3 томах. Т3. Производство и распределение электрической энергии. / Под ред. проф. МЭИ.: А.И. Попов (гл. ред.). – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – 964 с.
24. Кужекин И.П. Испытательные установки и измерения на высоком напряжении. – М.: Энергия, 1980. – 136 с.
25. Сви П.М. Контроль изоляции оборудования высокого напряжения. – М.: Энергия, 1988.–126 с.
26. Лабораторный практикум по ТВН. Изоляция и перенапряжения / под ред. Н.В.Савиной. – Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2006. – (электронное пособие).
27. Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозových и внутренних перенапряжений / под ред. Н.Н.Тиходеева. – С.Пб: ПЭ ИПК Минтопэнерго РФ, 1999.– 353 с.
28. Методические указания по применению ограничителей в электрических сетях 110-750 кВ. – М.: РАО «ЕЭС России», 2000. – 68 с.
29. Р.Н. Карякин. Заземляющие устройства промышленных электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 476 с.

1.3.2. Периодические издания (профессиональные журналы)

1. Энергетик
2. Промышленная энергетика.
3. Электрика
4. Вестник МЭИ
5. Известия вузов «Энергетика»
6. Новости электротехники
7. Электричество
8. Электрические станции
9. Известия РАН
10. Энергетика

1.3.3. Информационное обеспечение дисциплины

1. Центральное Диспетчерское управление (ЦДУ) ЕЭС России
<http://www.cdu.elektra.ru/>
2. Служба РЗ и А ЦДУ ЕЭС России <http://www.cdu.elektra.ru/rza/>
3. Объединённое Диспетчерское Управление энергосистемами Востока (ОДУ Востока) <http://www.oduv.ru/>
4. ОАО "АМУРЭНЕРГО" <http://www.ae.amur.ru/>
5. ОАО "ДАЛЬЭНЕРГО" <http://www.dalenergo.org/>
6. ОАО "ЗЕЙСКАЯ ГЭС" <http://www.rao-ees.ru/zges/>
7. ФОРЭМ <http://www.cdrforem.ru/>

1.3.4. Перечень наглядных и других пособий.

1. Слайды к медиапроектору по темам 2,4,5,6,8,9,12.
2. Типовые схемы РУ подстанций и станций.
3. Методические указания к расчетному заданию по курсу «Изоляция и перенапряжения на электрических станциях и подстанциях». Лопухова Т.В. Казанский ГУ, 2003. – 27 с.

1.3.5. Программы для ПЭВМ

1. Промышленные программно-вычислительные комплексы: “Wave”, “Perehod”, “Outvolt”.
2. Пакет автоматизации математических расчетов MathCAD
3. Графический редактор «VISIO».

1.4. Учебно-методическая карта дисциплины

№ лекции	№ темы	Наименование вопросов, изучаемых на лекции	Занятия		Используемые наглядные и методические пособия	Самостоятельная работа студентов		Формы контроля
			Практич.	Лаборат.		Содержание	Час	
1	1	1				Изучение материалов по теме лекции	1	Блиц-опрос на лекции
2	2	2			Слайды к медиапроектору	Изучение материалов по теме лекции	2	Блиц-опрос на лекции
3,4	3	3	1			Изучение материалов по теме лекции	3	Блиц-опрос на лекции Защита инд. дом. заданий
5,6	4	4	2		Слайды к медиапроектору	Изучение материалов по теме лекции	4	Блиц-опрос на лекции Защита инд. дом. заданий
7,8,9	5	5	3,4		Слайды к медиапроектору	Изучение материалов по теме лекции	6	Блиц-опрос на лекции Защита инд. дом. заданий
10,11	6	6	5	1,2	Слайды к медиапроектору	Изучение материалов по теме лекции	3	Блиц-опрос на лекции Защита инд. дом. заданий
12	7	7	6			Изучение материалов по теме лекции	1	Блиц-опрос на лекции Защита инд. дом. заданий
13,14,15	8	8	7		Слайды к медиапроектору	Изучение материалов по теме лекции	3	Блиц-опрос на лекции Защита инд. дом. заданий
16	9	9			Слайды к медиапроектору	Изучение материалов по теме лекции	1	Блиц-опрос на лекции
17,18,19	10	10		7		Изучение материалов по теме лекции	3	Блиц-опрос на лекции
20,21	11	11		7		Изучение материалов по теме лекции	3	Блиц-опрос на лекции
22,23	12	12		3-6	Слайды к медиапроектору	Изучение материалов по теме лекции	2	Блиц-опрос на лекции

2. Краткий конспект лекций

2.1. Методические указания по проведению лекций

Лекционный курс по дисциплине «Изоляция и перенапряжения» - направлен на формирование у студентов специальных знаний по грозовым и внутренним перенапряжениям, их расчету и анализу, методам и средствам их ограничения, по основам эксплуатации изоляции электроустановок.

Целью данного раздела является оказание методической помощи в оптимальном распределении теоретического материала между лекциями, а также между аудиторными занятиями и самостоятельной работой по изучению дисциплины. Кроме того будет осуществлена систематизация излагаемого материала.

Лекцию нужно строить таким образом, чтобы осуществлять сквозную подготовку студентов, активизировать работу аудитории, поддерживать интерес к излагаемому материалу, развивать инженерное мышление у студентов. Методически лекция должна быть направлена на усвоение студентами излагаемого материала и меть эмоциональную окраску. Материал целесообразно излагать в доступной форме, приводя примеры из реальной жизни как в части эксплуатации, так и проектирования или развития систем, выделяя при этом наиболее насущные проблемы по рассматриваемой тематике общероссийской и региона.

Поставив задачи, которые будут решаться на лекции, преподаватель должен методически подвести аудиторию к их решению, играя при этом роль лидера. Тем самым у студентов развиваются способности логически мыслить и генерировать идеи. Для максимального усвоения материала целесообразно задействовать зрительную, слуховую и моторную память студентов. Для каждой лекции должна быть подготовлена презентация, включающая название лекции, цель и задачи, решаемые на лекции, план лекции, основные теоретические материалы, содержащие математические выкладки, рисунки,

схемы, выводы. Презентацию не нужно загромождать текстом, справочным материалом.

В ходе лекции необходимо, опираясь на физическую сущность рассматриваемой задачи или процесса, показать основные теоретические выкладки и довести теоретический материал до инженерных решений и их технической реализации, показать область их применения.

Целесообразно, в процессе лекции использовать передовые образовательные технологии, например, методы активизации обучения, информационные технологии. Технические средства, используемые на лекции: медиапроектор, экран, ноутбук, проектоскоп.

Предлагается следующая структура построения лекции:

- тема;
- цель и задачи;
- план;
- фронтальный блиц-опрос (3-5 минут);
- вступление;
- изложение основного материала;
- закрепление;
- разделы, выносимые на самостоятельную проработку;
- выводы.

Блиц-опрос должен периодически чередоваться с самостоятельной работой (10-15 минут), проводимой в конце лекции.

При выдаче задания на самостоятельную проработку необходимо назвать учебники предложить найти дополнительные источники, в т.ч. и электронные, помимо указанных в рабочей программе.

Выводы должны быть краткими, но емкими и содержать основную мысль, которую лектор хотел донести до аудитории.

2.2. Краткий конспект лекций

Лекция 1.

Введение. Общая характеристика перенапряжений. Классификация перенапряжений. Молния как источник грозовых перенапряжений.

Перенапряжения могут быть разделены на 2 группы:

- грозовые перенапряжения, связанные с разрядами молнии в токоведущей части установки или в землю по близости от нее (атмосферные);
- внутренние перенапряжения, возникающие в результате различных нормальных или аварийных коммутаций в системе (коммутационные).

Перенапряжения связаны с появлением в электроустановках потенциалов и разностей потенциалов, значительно превышающих их номинальное значение. Поэтому перенапряжение представляет большую опасность, и являются основной причиной повреждений и аварий в электроустановках.

Хорошо известным средством грозозащиты являются молниеотводы – надежно заземленные металлические стержни или провода, расположенные вблизи защищаемого объекта таким образом, что подавляющее большинство разрядов молнии попадает в молниеотвод, минуя объект, итого молнии отводится в землю.

Поскольку повреждение изоляции подстанций является гораздо более серьезной аварией, чем повреждение изоляции линий, принимают дополнительные меры для ограничения вероятности таких повреждений. С этой целью применяют нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН).

Внутренние перенапряжения зависят от видов коммутации, режима, характеристики, параметров сети, и коммутационных аппаратов.

Курс посвящен изучению физических процессов, анализу грозовых и внутренних перенапряжений, их ограничениям, изучению причин, параметров (величина, длительность, повторяемость). Методы и средства, а также координация и методы испытания изоляции, т.е. согласование характеристик защитных устройств и характеристик изоляции, обеспечивающее высокую надежность работы изоляции.

Лекция 2.

Молния – как источник грозовых перенапряжений.

Атмосферными перенапряжениями называются повышения потенциалов и их разностей в электроустановках, вызванные разрядами атмосферного электричества – молниями.

Молния представляет собой электрический разряд между облаком и землей или между облаками. Молнии предшествует процесс разделения и накопления электрических зарядов в грозовых облаках, происходящий в результате возникновения в облаках мощных восходящих воздушных потоков и интенсивной конденсации в них водяных паров.

Развитие молнии.

На начальной стадии, называемой лидерной, молния представляет собой относительно медленно развивающийся слабосветящийся канал (лидер). Лидер прорастает от облака к земле скачками или ступенями. Канал лидера заполнен плазмой, следовательно обладает определенной проводимостью. Зона ионизации лидера имеет избыточный заряд того же знака, что и облако.

Когда канал развивающейся от облака лидера приближается к земле или к одному из встречных лидеров, то между ними на расстоянии 25-100 м возникает высокая напряженность электрического поля. Этот промежуток пробивается за несколько микросекунд, и в нем выделяется энергия 0,5-5МДж, которое расходуется на нагрев и термоионизацию. Проводимость этой части канала резко возрастает, и зона повышенной напряженности перемещается по направлению к облаку со скоростью 0,05-0,5 скорости света. Это главный разряд.

Наращение тока главного разряда, называемое фронт импульса тока, соответствует нейтрализации зарядов в лидерном канале, а спад тока – нейтрализации зарядов в зоне ионизации лидера. В завершающейся (финальной) стадии молнии по каналу в течение десятков мсек. проходит ток десятков-сотен Ампер. В это время нейтрализуются заряды облака.

С точки зрения электромагнитного воздействия на установки высокого напряжения важное значение имеют форма и значения тока главного разряда. Приблизительно он имеет вид апериодического импульса, который характеризуется длительностью фронта и длительностью импульса. Важнейшей характеристикой является максимальное значение тока молнии, часто называемое просто током молнии.

Крутизна фронта тока молнии определяет индуктивные падения напряжения в проводниках и индуктированные напряжения в магнитосвязанных цепях. Обычно пользуются средней крутизной $a_{cp} = \frac{I_M}{\tau_\phi}$.

Характеристикой грозовой деятельности является число грозовых часов в году, плотность разрядов молний на землю.

Лекция 3.

Закономерности распространения электромагнитных волн перенапряжения.

При движении электромагнитной волны вдоль проводов линии без потерь скорость распространения волны равна скорости света.

Напряжения и токи волны связаны между собой волновым сопротивлением, которое определяется геометрическими параметрами линии.

Вводятся понятия коэффициентов преломления α и отражения β .

При набегании электромагнитной волны на разомкнутый конец линии происходит удвоение напряжения в узловой точке. При $Z_2=0$ – короткозамкнутый конец первого участка, $\alpha=0$, $\beta=-1$, в узловой точке напряжение будет равно 0.

Набегание электромагнитной волны на шины подстанции, к которой подходят n линий. При $n=2$ преломления волны на шинах ПС не происходит. При $n=1$ (тупиковая ПС, к шинам которой подходит одна линия) на шинах происходит удвоение напряжения падающей волны. При $n \geq 3$ $U_{np} < U_{над}$,

отсюда следует, что тупиковый режим работы ПС наиболее не благоприятный. Большое число линий способствует снижению напряжения на шинах.

Прохождение электромагнитной волны через индуктивность. Индуктивность приводит к сглаживанию фронта волны и не влияет на ее амплитуду при бесконечной длине падающей волны. Перед индуктивностью происходит удвоение падающей волны.

Прохождение электромагнитной волны (ЭМВ) мимо емкости. Емкость сглаживает фронт ЭМВ, что благоприятно сказывается на условиях работы межвитковой изоляции обмоток электрических машин и трансформаторов при набегании на них ЭМВ. Чем меньше крутизна фронта волны, тем ниже будут разности потенциалов между витками при прохождении вдоль обмотки фронта волны. Емкости используются в схемах грозозащиты для сглаживания фронта набегающих волн и защиты межвитковой изоляции.

Лекция 4.

Волновые процессы в многопроводной системе.

Прохождение ЭМВ вдоль провода, расположенного вблизи другого изолированного провода. На проводе, находящемся в поле ЭМВ, движущейся по другому проводу, наводится напряжение, составляющее какую-то часть напряжения основной волны. Коэффициент, равный отношению индуктированного напряжения к индуктирующему напряжению, называется геометрическим коэффициентом связи.

Прохождение ЭМВ по двум соединенным между собой одинаковым и подвешенным на одной высоте проводам вблизи третьего изолированного провода.

Выводится выражение для расчета геометрического коэффициента связи между двумя грозозащитными тросами и линейными проводами.

Распространение ЭМВ с одинаковыми напряжениями по нескольким проводам одновременно. Этот случай эквивалентен присоединению проводов к общему источнику.

Здесь выводится выражение для эквивалентного сопротивления двух и более проводов.

Влияние импульсной короны на волновой процесс. Импульсная корона приводит к удлинению фронта волны, снижению скорости распространения ЭМВ, волнового сопротивления коронирующей линии, но увеличению коэффициента связи.

Лекция 5.

Грозоупорность ВЛ с тросами.

Возвышаясь над окружающей местностью, ВЛ поражается разрядами, развевающимися непосредственно под ней, и стягивает боковые разряды.

Определяется число ударов молнии на 100 км длины линии.

Рассматривается влияние конструктивных параметров ВЛ на показатель ее грозоупорности, а также влияние природно-климатических условий.

Расчет числа грозовых отключений ВЛ напряжением 110 кВ и выше с тросом.

На ВЛ, имеющей тросовую защиту, рассматривают три расчетных случая грозовых поражений: удар в опору или в трос вблизи опоры; удар в трос в середине пролета; удар в провод при прорыве сквозь тросовую защиту.

Лекция 6.

Грозоупорность ВЛ без тросов.

Расчет числа отключений ВЛ без троса на металлических и железобетонных опорах.

На ВЛ без тросов разряды молнии могут поражать опоры и провода в пролете, причем разряды молнии распределяются примерно поровну между опорами и проводами в пролете.

Рассматриваются два расчетных случая:

1. Удар молнии в опору;
2. Удар молнии в провод.

Индуктированные перенапряжения на ЛЭП. Разряды молнии в землю вблизи ЛЭП вызывают на проводах линий индуктированные перенапряжения.

Практически учитывать отключения ВЛ вследствие перекрытий изоляций при индуктированных перенапряжениях следует только для ВЛ 6-35 кВ на металлических железобетонных опорах.

Анализ показателей грозоупорности и средств грозозащиты ВЛ 110-500 кВ различного конструктивного исполнения.

Лекция 7.

Молниезащита подстанций и станций, ВЛ от прямых ударов молнии.

Принцип действия молниеотводов.

Защита от прямых ударов молнии осуществляется с помощью молниеотводов. Назначение молниеотвода – принять подавляющее число ударов молнии в пределах защищаемой территории и отвести ток молнии в землю. Молниеотвод – это возвышающееся над защищаемым объектом устройство, через которое ток молнии, минуя защищаемый объект, отводится в землю. Молниеотвод состоит из молниеприемника, непосредственно воспринимающего удар молнии на себя, токоотвода и заземлителя.

По типу молниеприемников различают молниеотводы стержневые и тросовые.

Защитное действие молниеотвода основано на том, что во время лидерной стадии на вершине молниеотвода скапливаются заряды, и наибольшие напряженности электрического поля создаются на пути между развивающимся лидером и вершиной молниеотвода. Возникновение и развитие с молниеотвода встречного лидера еще более усиливает напряженность поля на этом пути, что и приводит к удару молнии в молниеотвод. При этом высота над поверхностью земли, при которой лидер начинает ориентироваться по направлению к наиболее высокому наземному объекту, называется высотой ориентировки молнии.

Зоны защиты молниеотводов. Зоной защиты молниеотвода принято называть определенное пространство вокруг молниеотвода: удары молнии в объект, полностью расположены в этом пространстве, маловероятны.

Различают две зоны защиты по степени надежности. Зона защиты А обладает степенью надежности 0,995 и выше, т.е. вероятность прорыва молнии через границу зоны не превышает 0,005. Зона защиты Б – степенью надежности 0,95 и выше, т.е. вероятность прорыва молнии через границу зоны не превышает 0,05.

Рассматриваются зоны молниезащиты одиночного стержневого молниеотвода. Ее параметры: эффективная высота молниеотвода; радиусы зоны защиты на высоте защищаемого объекта и на уровне земли.

Рассматриваются зоны молниезащиты двойных стержневых молниеотводов. Зона защиты делится на внешнюю и внутреннюю.

Параметры внешней зоны такие же как и у одиночного молниеотвода.

Параметры внутренней зоны: наименьшая высота; половина ширины внутренней зоны на уровне высоты защищаемого объекта.

Рассматриваются зоны защиты многократных молниеотводов, тросовых молниеотводов.

Лекция 8.

Заземления в электроустановках высокого напряжения.

Различают три вида заземлений: рабочее, защитное и грозозащиты, причем иногда один и тот же заземлитель выполняет 2 или 3 назначения одновременно.

К рабочему заземлению относятся: заземления нейтралей СТ, ДГК, Г, ТН, реакторов; заземления фазы при использовании земли в качестве рабочего провода.

Защитное заземление – для обеспечения безопасности людей, обслуживающих электроустановку, путем заземления металлических частей установки (например, баков СТ), которые нормально имеют нулевой

потенциал, но могут оказаться под напряжением при перекрытии или пробое изоляции.

Заземление грозозащиты – служит для отвода тока молнии в землю от стержневых, тросовых молниеотводов или других конструкций, в которые произошел удар молнии, от защитных разрядников.

Для устройства заземления применяются вертикальные и горизонтальные электроды (заземлители).

Заземлитель характеризуется сопротивлением, которое окружающая земля оказывает стекающему с него току. Сопротивление заземлителя при стекании с него тока промышленной частоты называется стационарным.

Сопротивление заземлителя при стекании с него токов молнии называется импульсным, а отношение импульсного сопротивления к стационарному называется импульсным коэффициентом заземлителя, α .

Заземлитель небольшой длины, у которого L не играет роли, называется сосредоточенным заземлителем, у него $\alpha < 1$ или $\alpha > 1$ в зависимости от преобладающего влияния L или искровых процессов.

Рассматривается заземление молниеотводов.

Заземление подстанции выполняется в виде сетки. Приводится конструкция заземлителя и порядок определения его импульсного сопротивления.

Рассматриваются условия безопасного стекания тока молнии по молниеотводу.

Лекция 9.

Защитные аппараты и их характеристика.

Принципы действия защитных аппаратов: предотвратить появление на электроустановке импульсов перенапряжений, опасных для ее изоляции, и не препятствовать работе установки при рабочем напряжении.

История развития защитных аппаратов.

Простейшим защитным устройством является искровой промежуток, включаемый параллельно изоляционной конструкции.

Защитные промежутки. Конструктивно выполняются в виде стержневых электродов, создающих резконеоднородное поле. Для таких электродов характерно значительное возрастание разрядного напряжения при малых временах, что не всегда позволяет осуществлять координацию вольт-секундных характеристик изоляции и защитных промежутков во всем диапазоне предразрядных времен.

Трубчатые разрядники состоят из газогенерирующей трубки и двух электродов. Гашение дуги осуществляется за счет интенсивного продольного дутья.

Вентильные разрядники основаны на гашении дуги за счет снижения значения сопровождающего тока с помощью сопротивления, включенного последовательно с искровым промежутком. Различают вилитовые и тервитовые резисторы вентильных разрядников. Искровые промежутки делятся на простейшие, с магнитным гашением дуги и токоограничивающие.

Различают четыре группы вентильных разрядников и комбинированные вентильные разрядники.

Лекция 10.

Нелинейные ограничители перенапряжений.

Значительное улучшение защитных характеристик разрядников может быть достигнуто при отказе от использования искровых промежутков. Это возможно при переходе к резисторам с резконелинейной ВАХ и достаточной пропускной способностью.

ОПН предназначены для защиты изоляции электрооборудования от атмосферных и коммутационных перенапряжений.

В отличие от РВ с искровым промежутком и карборундовыми резисторами ОПН не содержит ИП и состоят из колонок металлооксидных

нелинейных резисторов (варисторов) на основе оксида цинка, заключенных в полимерную или фарфоровую покрышку.

Количество резисторов в колонке зависит от максимального рабочего напряжения ОПН. Колонки ведут себя при воздействии напряжения подобно конденсаторам. В нормальном режиме ток через варистор носит емкостной характер и составляет десятые доли миллиампера. При возникновении волн перенапряжений варисторы ОПН переходят в проводящее состояние и ограничивают дальнейшее нарастание напряжения на выводах. Когда напряжение снижается, ОПН возвращается в непроводящее состояние.

Преимущества ОПН по сравнению с вентильными разрядниками:

- глубокий уровень ограничений для всех видов волн перенапряжений;
- отсутствие сопровождающего тока после затухания волны перенапряжений;
- простота конструкции и высокая надежность в эксплуатации;
- стабильность характеристик и устойчивость к старению;
- способность к рассеиванию больших энергий;
- непрерывное подключение к защищаемой сети;
- стойкость к атмосферным перенапряжениям;
- малые габариты, вес и стоимость.

Выбор ОПН осуществляется в два этапа: предварительный и окончательный после уточнения всех влияющих факторов.

Порядок выбора.

1. Определяется расчетная величина рабочего напряжения ОПН.
2. Определяется импульсный ток, протекающий через ОПН.
3. Рассчитывается энергия, поглощаемая ОПН и сравнивается с указанной в технических характеристиках ОПН.

Далее рассматривается определение ожидаемого срока службы ОПН и дается характеристика длинноискровых разрядников.

Лекция 11.

Молниезащита ВЛ от перенапряжений.

Высокую надежность молниезащиты ВЛ обеспечивают следующие мероприятия:

- подвеска грозозащитных тросов с малыми углами защиты;
- снижение импульсного сопротивления заземления опор;
- повышение импульсной прочности изоляции и снижение вероятности возникновения дуги;
- применение изолированной или компенсированной нейтрали;
- использование АПВ линий.

Далее рассматривается характеристика молниезащиты ВЛ 110-750 кВ (табл. 10.1 [1]).

Для снижения грозопоражаемости линий СВН и УВН рекомендуется применять тросы с отрицательными углами защиты, использовать опоры с горизонтальным расположением фаз и оттяжками.

Тросы на промежуточных опорах подвешивают на одном-двух изоляторах, зашунтированных искровым промежутком, который пробивается при грозовых перенапряжениях.

Далее рассматривается характеристика молниезащиты ВЛ 6-35 кВ [табл. 10.2, 1]. На опорах с ослабленной изоляцией или с повышенной вероятностью грозового поражения нужно устанавливать ОПН или вентильные разъединители.

Дополнительных средств защиты требуют пересечения линий.

Лекция 12.

Молниезащита подстанций разных классов номинального напряжения.

Для защиты подстанций напряжением до 110 кВ включительно и силовых трансформаторов напряжением 150-220 кВ с повышенным уровнем изоляции на систему шин устанавливают один комплект ОПН. Между ОПН и силовым

трансформаторов допускается установка коммутационных аппаратов. На шинах 220 кВ также устанавливается один комплект ОПН.

На шинах 330-500 кВ устанавливаются два комплекта ОПН. На шинах 750-1150 кВ – 3 комплекта ОПН.

На линиях СВН в ячейке реактора поперечной компенсации устанавливается ОПН.

Силовые трансформаторы защищаются ОПН со всех сторон.

Для защиты изолированной или разземленной нейтрали в нейтраль включается ОПН с номинальным напряжением на класс ниже номинального напряжения силового трансформатора.

Вводится понятие защищенного подхода линий – это такой участок, который обеспечивает достаточное сглаживание фронта набегающих волн и снижения тока в защитных аппаратах.

Рассматриваются типовые схемы молниезащиты подстанций.

Лекция 13.

Защищенные подходы линий.

Конструктивное исполнение защищенного подхода:

- подвеска грозозащитных тросов;
- снижение угла тросовой защиты до 20°;
- заземление троса на каждой опоре подхода;
- снижение сопротивления заземления опор на подходе до 10-20 Ом;
- переход на опоры с горизонтальным расположением фаз на защищенном подходе.

Рассматриваются схемы исполнения защищенных подходов.

При проектировании схем молниезащиты длина защищенного подхода не должна превышать следующих предельных значений:

35 кВ	1-2 км;
110 кВ	1-3 км;
220 кВ	2-3 км;

330 кВ 2-4 км;
500 кВ 2,5-3 км.

Проверка надежности прямого защищенного подхода линии.

- 1) Определяется скорость распространения ЭВМ с учетом импульсной короны.
- 2) Определяется расстояние между ОПН и электроустановкой по плану ПС.
- 3) По характеристикам ОПН принимается значение остающегося напряжения.
- 4) Определяется допустимое на внутренней и внешней изоляции напряжение при воздействии грозových импульсов.
- 5) Определяется допустимая крутизна фронта волны перенапряжения.
- 6) Определяется коэффициент деформации фронта волны из-за импульсной короны.
- 7) Определяется длина защищенного подхода и делается вывод и надежности схемы защищенного подхода.

Лекция 14.

Оценка надежности молниезащиты подстанции.

Надежность защиты ОРУ станций и ПС от ПУМ характеризуется числом случаев перекрытия изоляции при прорывах молнии через зону защиты молниеотводов и обратных перекрытий при ударах молнии в молниеотвод (для ОРУ 35-110 кВ) в год.

Она определяется следующим образом.

- 1) Определим число случаев перекрытия изоляции при прорывах ПУМ и образованных перекрытий.
- 2) Определим среднюю повторяемость (в годах) опасных перенапряжений на ПС из-за грозových разрядов в ОРУ или ЗРУ.

T_{ny} должны быть не ниже:

35 кВ – 500 лет, 110 кВ – 700 лет, 220 кВ – 1000 лет, 500 кВ – 2000 лет.

Надежность грозозащиты ПС оценивается средним числом случаев появления опасных для ПС изоляции грозовых импульсов в год. Опасность представляют только грозовые импульсы, возникающие при ударе молнии в пределах опасной зоны. При оценке надежности грозозащиты ПС от набегающих с ВЛ грозовых импульсов используются методы, учитывающие статические распределения амплитуды, крутизны и длительности первого и последующих импульсов тока многократного разряда, рабочего напряжения и удаленность грозового разряда.

Оценка надежности грозозащиты РУ состоит в определении доли опасных импульсов среди поражающих ВЛ в пределах опасной зоны.

Определяется среднее число грозовых перенапряжений от набегающих волн на навал аппаратов или ПС в целом, т.е. перенапряжение, превышающее допустимое значение за год.

Находится величина ограничения $T_{НВ}$, которая характеризует среднюю повторяемость опасных перенапряжений на ПС (в годах).

Лекция 15.

Молниезащита электрических машин. Координация импульсной прочности изоляции подстанционного оборудования с защитными характеристиками ОПН.

Молниезащита электрических машин имеет свои особенности:

- уровень электрической прочности изоляции у электрических машин, бывших длительное время в эксплуатации значительно ниже, чем у другого электрооборудования;
- отсутствуют ОПН, которые могли бы обеспечить достаточно высокую надежность защиты такой изоляции;
- грозовые повреждения изоляции машин весьма значительны;
- выход из строя электрических машин приводит к большому экономическому ущербу.

В результате этого применяются специальные мероприятия для обеспечения надежной молниезащиты:

- установка дополнительных ОПН на защищенном подходе;
- использование кабельных вставок на подходе;
- параллельное подключение конденсаторов к зажимам электрических машин;
- применение фидерных реакторов.

Координация изоляции.

На оборудовании, установленном между ВЛ и защитным аппаратом по ходу волны по ошиновке. Форма импульсного перенапряжения в первый момент времени повторяет форму исходного грозового импульса.

После прихода волны, отраженной от вступившего в работу защитного аппарата, перенапряжение быстро снижается, приближаясь к значению, равному сумме остаточного напряжения к падению напряжения на индуктивности ошиновки. Перенапряжение в точках ПС, расположенных по движению волны за защитным аппаратом, имеет вид униполярной формы, где период затуханий колебаний, наложенных на оставшееся напряжение защитного аппарата, зависит от параметров схемы ПС.

В расчетных схемах грозозащиты оборудование представляется входными емкостями по отношению к земле.

Разность между допустимым напряжением на СТ (АТ) и остающемся напряжении на защитном аппарате при нормированном импульсе тока (токе координации) над координационным интервалом, ΔU_k .

Т.о., основным условием обеспечения надежной защиты ПС от грозовых перенапряжений является координация прочности изоляции ПС оборудования и характеристик защитного аппарата.

Координационный интервал необходим для компенсации:

- превышения грозового перенапряжения на защищаемом оборудовании по отношению к напряжению на защитном аппарате из-за его удаленности;

- увеличения остаточного напряжения при крутом токе волны через защитный аппарат.

Достаточность координационного интервала проверяется путем сопоставления тока, протекающего через защитный аппарат с нормированным током координации.

Лекция 16.

Характеристика внутренних перенапряжений.

Основные виды внутренних перенапряжений.

Внутренние перенапряжения делятся на коммутационные и квазистационарные.

К коммутационным перенапряжениям относятся дуговые, при отключении трансформаторов, при отключении ВЛ с повторным зажиганием дуги, при АПВ линии, при включении линий и трансформаторов.

К квазистационарным перенапряжениям относятся параметрический резонанс, феррорезонанс на частотах высших гармоник и субгармоник, феррорезонанс на промышленной частоте, резонанс. Квазистационарные перенапряжения называют также резонансными.

После любой коммутации, как плановой, так и аварийной, возникают коммутационные перенапряжения. Они образуются при резком изменении параметров и структуры сети из-за заряда и перезаряда ее емкостей в процессе перехода системы от одного состояния к другому.

Наиболее возможные виды коммутационных перенапряжений возникают при:

- плановых включениях и отключениях нагруженных линий, ненагруженных СТ и АТ, реакторов;
- аварийных разрывах электропередачи в процессе ликвидации КЗ или асинхронного хода;
- работе АВР;

- включении или отключении разъединителями участков холостых шин ОРУ, ЗРУ, КРУЭ.

Квазистационарные перенапряжения возникают при временных с точки зрения эксплуатации режимах работы, неблагоприятных сочетаниях параметров сети и могут продолжаться до тех пор, пока не изменится схема или режим сети. Их длительность от долей секунд до десятков минут ограничивается действием РЗ или оперативного персонала.

Далее приводится характеристика вышеперечисленных перенапряжений.

Лекция 17.

Перенапряжения при коммутациях ВЛ.

Рассматриваются следующие случаи: перенапряжения при плановых включениях линий, при отключениях нагруженных линий, при коммутации линий в блоке с трансформатором.

Перенапряжения при плановых включениях линий.

Главной причиной перенапряжений при включении ВЛ является перезаряд в колебательном режиме емкости линии через индуктивность от начального напряжения до установившегося, зависящего от мгновенного напряжения источника ЭДС в момент включения.

Вводится понятие коэффициента коммутационных перенапряжений, равного отношению амплитуды перенапряжений к амплитуде установившейся составляющей.

Перенапряжение при плановых включениях линии слабо зависят от типа выключателя, если только он не снабжен специальными мерами борьбы с коммутационными перенапряжениями: устройством для выбора оптимальной фазы включения или индуктирующим сопротивлением.

Меры, направленные на снижение вероятности появления высоких кратностей перенапряжений:

1. Меры ограничения вынужденной составляющей напряжения коммутационных перенапряжений. К ним относятся: деление дальних ЛЭП на

участки длиной 250...300 км с подключением к промежуточным точкам устройств поддержания нормального уровня напряжения; применение СТ с регулирующимся коэффициентом трансформации; шунтирующих реакторов и синхронных компенсаторов; включение ВЛ вначале к шинам более мощной ПС, затем – к менее мощной.

2. Меры, направленные на ослабление переходной составляющей коммутационного процесса при включении линий. Это установка шунтирующих сопротивлений в выключателях; синхронное включение выключателей с выбором такого момента включения, при котором обеспечиваются невысокие значения X ; введение на время коммутации активных сопротивлений в цепь тока, протекающего по шунтирующим реакторам, например, включение реактора в нейтраль обмоток группы трехфазных реакторов.

3. Использование ОПНГ, которые в своих рабочих резисторах поглощают значительную часть энергии перенапряжений, что приводит к снижению амплитуды их.

Перенапряжения при отключении ненагруженной линии.

Отключение ненагруженной линии может привести к значительным перенапряжениям. Рассматривается физика этих процессов и определяется прочность таких перенапряжений.

Меры борьбы с ними:

1) применение выключателей без опасных повторных зажиганий дуги при отключении ВЛ;

2) оснастить линию средствами снятия остаточного заряда: вынести на линию измерительный электромагнитных ТН; подключить к ним шунтирующий реактор или принять другие меры;

3) применение ОПН или РВ. Но вследствие многократности зажигания дуги в ходе каждой коммутации происходит ускоренное расходование ресурса пропускной способности резисторов этих аппаратов.

Перенапряжения при коммутации линий в блоке с трансформаторами.

В некоторых схемах коммутации линий производится совместно с присоединенными к ним СТ. К таким схемам относятся: блочные, полублочные, схемы и линии с присоединенными в промежуточных точках силовых трансформаторах без выключателей.

Силовые трансформаторы на линии при наличии остаточного заряда и при повышении напряжения быстро входят в режим насыщения магнитопровода, т.е. становится возможным возбуждение феррорезонанса на ВГ.

Лекция 18.

Перенапряжения при АПВ линий.

Перенапряжения при отключении коротких замыканий.

Коммутации АПВ сопровождаются более высокими перенапряжениями, чем при плановых отключениях. Их главная причина наличие на линии остаточного заряда, не успевающего стечь за время безтоковой паузы АПВ и создающего в момент включения начального напряжения на линии перенапряжения.

Особенно неблагоприятным АПВ является неустойчивые к.з., не устраненные действием АПВ.

Для защиты от таких перенапряжений применяются также меры, что уже рассмотрены выше. Кроме того предлагается для снятия остаточного заряда в безтоковую паузу использовать подключения к линии электромагнитных ТН, т.е. их вынос на линию.

Перенапряжения при отключении линий с КЗ.

Коммутационные перенапряжения на ВЛ могут возникать при отключениях КЗ при разрыве электропередачи в случае потери синхронизма.

Для предотвращения перенапряжений применяется автоматическое шунтирование БК перед коммутацией отключения КЗ.

Средства борьбы – срабатывание РЗА от асинхронного хода.

Лекция 19.

Перенапряжения при отключении индуктивностей: реакторов, трансформаторов, электрических машин. Перенапряжения при срезе тока в дугогасящем реакторе.

Разрыв контура, содержащего индуктивность, при значении тока, отключенного от 0, должен сопровождаться преобразованием этой энергии в другие виды, в частности в энергию электрического поля. Этим объясняется возникновение перенапряжения на индукционных элементах.

Рассматриваются процессы протекания таких перенапряжений и определяется их кратность.

При оценке опасности воздействия на изоляцию перенапряжения при отключении ненагруженных СТ необходимо учитывать, что это отключение может происходить из неустановившегося режима, связанного с его предшествующим выключением. Например, с операцией ошибочного включения СТ на КЗ, неуспешное АПВ, либо частые технологические включения.

Для ограничения таких перенапряжений необходимо ОПН устанавливать как можно ближе к защищаемому СТ или реактору. Также рекомендуется подключать параллельно обмотке СТ конденсатор связи.

В компенсированной нейтрали при двухфазном КЗ на землю через LUR резко увеличивается ток, т. к. появляется несимметрия в сети. Этот ток замыкается через аварийные фазы выключателя и точку КЗ. Возникают значительные перенапряжения.

Рассматривается методика расчета ожидаемого срока службы ОПН 110-1150 кВ, которая состоит из двух этапов:

- расчет статического распределения амплитуд неограниченных перенапряжений в точке установки ОПН;
- расчет статического распределения ресурса, расходуемого резистором ОПН в течение одного года;
- определение ожидаемого срока службы ограничителя.

Лекция 20.

Резонансные перенапряжения.

Вынужденное напряжение переходного процесса перенапряжений промышленной частоты в симметричном режиме – это напряжение рабочей частоты, которое устанавливается после затухания электромагнитных переходных процессов, вызванных плановой или аварийной коммутацией через 0,03-0,06 с. после коммутации.

Порядок его расчета следующий:

- 1) Определить напряженность электрического поля.
- 2) Найти волновое сопротивление ВЛ.
- 3) Определить длину волны на прямой последовательности.
- 4) Определить угол φ .
- 5) Определить вынужденное напряжение в симметричном режиме на разомкнутом и питающем концах ВЛ.
- 6) Далее рассматриваются условия, когда необходим учет насыщения и определяются вынужденные напряжения с учетом насыщения.
- 7) Определяется вероятность того, что в симметричном режиме напряжение на разомкнутом конце не превзойдет своего максимального значения в годовом интервале его случайных изменений.

Вынужденное напряжение промышленной частоты в несимметричном режиме однополюсного КЗ.

Этот режим имеет место в результате аварийных коммутаций разрыва передачи вследствие ликвидации несимметричного КЗ, возникшего в результате неуспешного ТАПВ или вследствие ошибок оперативного персонала.

Порядок расчета.

- 1) Определить входные сопротивления относительно разомкнутого конца электропередачи, рассчитанные по параметрам нулевой, обратной и прямой последовательности при закороченных режимах эдс.

2) Рассчитать коэффициент несимметрии при однополюсном КЗ в конце и начале ВЛ соответственно.

3) Определяются величины ненасыщенного значения вынужденного напряжения на разомкнутом и питающем концах ВЛ.

4) Рассчитываются вспомогательные коэффициенты и математическое ожидание вынужденного напряжения при насыщении в несимметричном режиме однополюсного КЗ.

Лекция 21.

Феррорезонансные перенапряжения.

Перенапряжения вследствие емкостного эффекта ЛЭП.

Т.к. в сетях практически всегда есть элементы содержащие ферромагнитные сердечники, в любой схеме любого класса напряжения всегда есть возможность появления феррорезонансных процессов на частотах ВГ или НГ. Для этого должны выполняться два условия: токи должны быть достаточны для перехода кривых намагничивания за колено насыщения; входное сопротивление сети, подключенной к зажимам обмотки, должно иметь емкостной характер. Активные сопротивления входные и самой обмотки демпфируют феррорезонансные колебания. Поэтому наиболее опасны режимы ХХ или преобладания реактивной нагрузки в отношении феррорезонансных перенапряжений.

Наиболее частые случаи возникновения феррорезонансных перенапряжений в ЭЭС: однофазное включение участка ВЛ с холостым СТ, имеющим незаземленную нейтраль; двухфазное включение такой же линии; разрыв одной фазы с падением оборванного провода на землю со стороны ИП в сетях с изолированной нейтралью.

В сетях ВН феррорезонансные перенапряжения могут возникать не только на основной частоте, но и на ВГ и НГ. Для существования ВГ, на которой возможен феррорезонанс, необходимо выполнение следующих условий:

1) входное сопротивление внешней по отношению к индуктивности цепи должно иметь емкостный характер и быть соизмеримым с индуктивным сопротивлением нелинейного элемента на этой же частоте;

2) активные потери должны быть малы, чтобы прирост энергии резонансной гармоники больше расхода энергии на покрытие потерь;

3) для резонансной гармоники должны быть выполнены условия возбуждения.

Для защиты оборудования от феррорезонанса рекомендуется:

1) тщательно следить за симметрией параметров нагрузки и самой сети; применять «Q» с трехфазным приводом, обеспечивающих малую вероятность неполнофазных включений и отключений;

2) введение в схему дополнительных элементов, обеспечивающих достаточное повышение активных потерь, феррорезонансных перенапряжений на измерительных трансформаторах рекомендуется одну из его вторичных обмоток замкнуть на сопротивление равное несколько десятков Ом;

3) возможное понижение нелинейности кривой намагничивания индуктивности элементов сети. С этой же целью, в частности, сердечников реакторов поперечной компенсации снабжают воздушным зазором, увеличивающим их магнитное сопротивление и понижающее рабочую индукцию магнитного поля в стали сердечника.

Перенапряжения вследствие емкостного эффекта ЛЭП являются квазистационарными.

Схема одностороннего питания ВЛ возникает в процессе каждого ее включения и отключения. Длительности работы ВЛ в режиме одностороннего питания могут быть до 20 мин. в случае неавтоматической синхронизации.

Рассматриваются процессы, которые при этом происходят.

Важными мерами для понижения перенапряжений в питаемых ВЛ 110-220 кВ вследствие емкостного эффекта являются: подключение ВЛ к ПС с меньшим значением реактивного сопротивления X и в режиме одностороннего питания.

Лекция 22.

Методы профилактического контроля изоляции.

Общая характеристика искажений. Для выявления дефектов изоляции в эксплуатации служат профилактические испытания. Профилактические испытания делятся на две группы: разрушающие, при которых применяют повышенные напряжения, и неразрушающие, при которых определяются сопротивления изоляции, величина и характер изменения токов абсорбции, тангенс угла диэлектрических потерь, емкость изоляции, наличие и интенсивность частичных разрядов, состав растворенных в масле газов и т.д.

Методы неразрушающих испытаний изоляции: контроль изоляции по диэлектрическим потерям; измерение частичных разрядов в изоляции; измерение сопротивления изоляции, контроль изоляции по емкостным характеристикам; инфракрасная термография.

Лекция 23.

Испытание изоляции повышенным напряжением.

К изоляции прикладывается повышенное напряжение. Если изоляция нормального качества, она выдержит испытания, если дефектная – пробьется. При профилактических испытаниях проверяется способность изоляции проработать без отказов до следующих испытаний. Основная задача таких испытаний – проверка отсутствия грубых сосредоточенных дефектов.

В условиях эксплуатации контроль изоляции повышенным напряжением проводится для оборудования напряжением не выше 35 кВ. При профилактических испытаниях используют как переменное, так и постоянное испытательное напряжение.

Рассматривается каким образом проводятся такие испытания. Делается вывод о целесообразности комплексной проверки изоляции электрооборудования.

Подводятся итоги по изучению курса.

3. Практические занятия

3.1. Методические рекомендации по проведению практических занятий

В результате проведения практических занятий студенты должны научиться решать инженерные задачи, возникающие при проектировании и эксплуатации в области высоких напряжений. В частности студенты должны уметь оценивать грозоупорности линий и подстанций, обеспечивать надежную молниезащиту ВЛ и подстанции от набегающих волн перенапряжений и прямых ударов молнии, координацию импульсной прочности изоляции подстанционного оборудования с защитными характеристиками ОПН.

При изучении дисциплины предусмотрено проведение 8 практических занятий, перечень которых приведен ниже.

ПЗ 1. Расчет волновых процессов при перенапряжениях.

ПЗ 2. Грозоупорность ВЛ.

ПЗ 3. Защита подстанций, электрических станций, ВЛ от прямых ударов молнии.

ПЗ 4. Определение импульсного сопротивления заземления РУ, молниеотводов, опор.

ПЗ 5. ОПН, их характеристика и выбор. Выбор места расположения ОПН на плане РУ, на схеме ПС.

ПЗ 6. Определение длины защищенного подхода к ПС, электростанции.

ПЗ 7. Оценка надежности грозозащиты НЕ ГС и электростанций.

ПЗ 8. Обзор задач по всем темам.

При обучении студентов целесообразно использовать методы активизации обучения, информационные технологии. Решение задач должно быть выполнено с помощью комплексов MathCad, Visio.

Практические занятия целесообразно проводить согласно следующему плану.

План проведения практического занятия.

1. Цель занятия.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Блиц-опрос студентов.
4. Решение задач.
5. Анализ качества выполнения индивидуальных домашних заданий и разбор типовых ошибок.
6. Выводы и обобщение результатов.
7. Домашнее задание и задание на самостоятельную проработку.

На первом занятии целесообразно устроить входной контроль, на последнем – комплексную проверку качества знаний студентов.

При изложении кратких теоретических сведений рекомендуется систематизировать и обобщить материал, выделив при этом главные моменты. В процессе изложения материала целесообразно вовлекать студентов в его анализ, активизировать процесс мышления студентов за счет средств интенсивного обучения.

Блиц-опрос студентов или небольшая самостоятельная работа по теме практического занятия позволят лучше усвоить ход решения задач, понять их сущность.

При решении задач можно использовать разные формы. Например, преподаватель, решая задачу на доске, поясняет ее и привлекает к работе всю группу путем вопросов, постоянно подводя студентов к правильному решению. Другая форма решения задач - самостоятельная работа студентов под контролем преподавателя с пояснением наиболее трудных моментов. Возможно решение задачи на доске студентом, но в этом случае преподаватель руководит процессом решения и вовлекает в работу всю группу.

Как правило, защита индивидуальных домашних заданий должна проводиться во внеаудиторное время, а на практическом занятии следует показать типовые ошибки, проанализировать результаты выполнения и защиты

индивидуальных заданий, отметить лучшие и худшие из них, предложить студентам в виде деловой игры принять решение по устранению замечаний.

В конце практического занятия преподаватель называет тему следующего, указывает разделы теоретического материала, которые студент должен освоить для наиболее эффективного решения задач, выдает домашнее задание.

В процессе проведения практических занятий используются классические и современные педагогические технологии.

Целесообразно рассматривать примеры решения задач на простых схемах и только затем переходить к реальным схемам энергокомпаний.

Индивидуальные домашние задания по темам практических занятий № 2-7 нужно увязывать не только с типовыми схемами подстанций, но и со схемами существующих и проектируемых подстанций и линий электропередачи.

3.2. Методические указания по проведению практических занятий

Практическое занятие № 1.

Расчет волновых процессов при перенапряжениях.

Цель занятия: освоить методы расчета волновых процессов при перенапряжениях, научиться определять коэффициенты связи, анализировать набегание электромагнитных волн (ЭМП) на шины подстанций и электростанций.

В процессе проведения занятия рассматриваются три случая:

- а) набегание ЭМП на шины подстанций;
- б) прохождение ЭМП мимо емкости;
- в) прохождение ЭМП через индуктивность.

Кроме этого решаются небольшие задачи по определению коэффициентов геометрической связи в системе трос-привод и в системе два троса-провод.

Рассматриваются задачи, позволяющие проанализировать влияние импульсной короны на волновой процесс при перенапряжении.

Примеры решения задач.

ЗАДАЧА.

1. Определить напряжение на шинах подстанции и ВЛ при набегании электромагнитных волн по ВЛ1 и скорость ее распространения:

- а) на шины подстанции;
- б) при прохождении ЭМВ через индуктивность, L ;
- в) при прохождении ЭМВ мимо емкости, C .

2. Найти индуктивное напряжение на проводах при ударе молнии в трос.

Исходные данные: номинальное напряжение $U_H=220\text{кВ}$; тип опоры УБ-500-1; марка и сечение провода АС-400; кол-во ВЛ, $n=3$; $U_{\text{пад}}/U_{\text{доп}}=1600/200$; $l_{\text{зп}}=2,5/2$ км; $C=0,25$ мкФ; $L=4,2\text{мГн}$; $dU_{\text{пр.мах}}/dt=3,5\text{кВ/мкс}$.

Решение.

1. Волновое сопротивление линии до шины: $Z_1 = 60 \ln \cdot \frac{2 \cdot h}{r_{\text{пр}}}$,

где h - средняя высота подвеса провода над землей, $h=27,4\text{м}$;

$r_{\text{пр}}$ - радиус провода, $r_{\text{пр}}=15\text{см}$.

$$Z_1 = 60 \ln \cdot \frac{2 \cdot 27,4}{0,015} = 492,2 \text{ Ом.}$$

Волновое сопротивление линии после шины: $Z_2 = \frac{Z_1}{n-1} = \frac{492,2}{3-1} = 246,1 \text{ Ом.}$

а) определим напряжение на шинах подстанции при набегании ЭМВ на шины п/ст:

$$U_{\text{опр}} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \cdot U_{\text{над}} = \frac{246,1 - 492,2}{492,2 + 246,1} \cdot 1600 = -533,3 \text{ В.}$$

Напряжение на ВЛ: $U_{\text{ВЛ}} = U_{\text{пр}} = U_{\text{над}} + U_{\text{опр}} = 1600 - 533,3 = 1066,6 \text{ В.}$

б) определим напряжение преломления и отражения при набегании ЭМВ при включенной индуктивности:

$$T_L = \frac{L \cdot 10^{-3}}{Z_2 + Z_1} = \frac{4,2 \cdot 10^{-3}}{492,2 + 246,1} = 5,6 \cdot 10^{-6}.$$

$$U_{\text{пр1}} = \frac{2 \cdot Z_2}{Z_2 + Z_1} \cdot U_{\text{над}} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_L}} \right) = \frac{2 \cdot 246,1}{246,1 + 492,2} \cdot 1600 \cdot \left(1 - e^{-\frac{0}{5,6 \cdot 10^{-6}}} \right) = 0 \text{ В.}$$

$$U_{\text{пр}2}=1067\text{В}; U_{\text{пр}3}=1073\text{В}; U_{\text{пр}4}=1100\text{В}; U_{\text{пр}5}=1130\text{В}; U_{\text{пр}6}=1190\text{В} U_{\text{пр}7}=1256\text{В}.$$

$$U_{\text{омп}1} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \cdot U_{\text{над}} + \frac{2 \cdot Z_2}{Z_2 + Z_1} \cdot U_{\text{над}} \cdot e^{\frac{-t}{T_c}} = \frac{246,1 - 492,2}{246,1 + 492,2} \cdot 1600 + \frac{2 \cdot 246,1}{246,1 + 492,2} \cdot 1600 \cdot e^{\frac{-0}{5,6 \cdot 10^{-6}}} = 0$$

$$U_{\text{отр}2}=-354\text{В}; U_{\text{отр}3}=-410\text{В}; U_{\text{отр}4}=-490\text{В}; U_{\text{отр}5}=-500\text{В}; U_{\text{отр}6}=-527; U_{\text{отр}7}=-533.$$

в) определим напряжение преломления и отражения при набегании ЭМВ при включенной емкости:

$$T_c = \frac{C \cdot Z_1 \cdot Z_2}{Z_2 + Z_1} = \frac{0,25 \cdot 492,2 \cdot 246,1}{492,2 + 246,1} = 41,01.$$

$$U_{\text{пр}1} = \frac{2 \cdot Z_2}{Z_2 + Z_1} \cdot U_{\text{над}} \left(1 - e^{\frac{-t}{T_c}} \right) = \frac{2 \cdot 246,1}{492,2 + 246,1} \cdot 1600 \cdot \left(1 - e^{\frac{-0}{41,01}} \right) = 0 \text{ В}.$$

$$U_{\text{пр}2}=1298\text{В}; U_{\text{пр}3}=1260\text{В}; U_{\text{пр}4}=1243\text{В}; U_{\text{пр}5}=1182\text{В}; U_{\text{пр}6}=1113\text{В} U_{\text{пр}7}=1065\text{В}.$$

$$U_{\text{омп}1} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \cdot U_{\text{над}} - \frac{2 \cdot Z_2}{Z_2 + Z_1} \cdot U_{\text{над}} \cdot e^{\frac{-t}{T_c}} = \frac{246,1 - 492,2}{492,2 + 246,1} \cdot 1600 + \frac{2 \cdot 246,1}{492,2 + 246,1} \cdot 1600 \cdot e^{\frac{-0}{41,01}} = 0$$

$$U_{\text{отр}2}=-302\text{В}; U_{\text{отр}3}=-344\text{В}; U_{\text{отр}4}=-388\text{В}; U_{\text{отр}5}=-420\text{В}; U_{\text{отр}6}=-482; U_{\text{отр}7}=-533. \quad 2.$$

Найдем индуктивное напряжение на проводах при ударе молнии в трос.

Для этого найдем электромагнитный коэффициент связи: $K = \frac{K_\Gamma}{\beta}$,

где коэффициент, учитывающий деформацию электромагнитной волны:

$$\beta = 0,86.$$

$$K_\Gamma - \text{геометрический коэффициент связи: } K_\Gamma = \frac{\ln \frac{d_{12}'}{d_{12}}}{\ln \frac{2h_{\text{тр}}}{r_{\text{тр}}}}$$

d_{12}' – расстояние между тросом и зеркальным изображением провода,

$$d_{12}' = 55,24;$$

d_{12} – расстояние между тросом и проводом, $d_{12} = 7\text{м}$;

$h_{\text{тр}}$ – средняя высота подвеса троса, $h_{\text{тр}} = 27,4$;

$r_{\text{тр}}$ – радиус троса, $r_{\text{тр}} = 0,015\text{м}$.

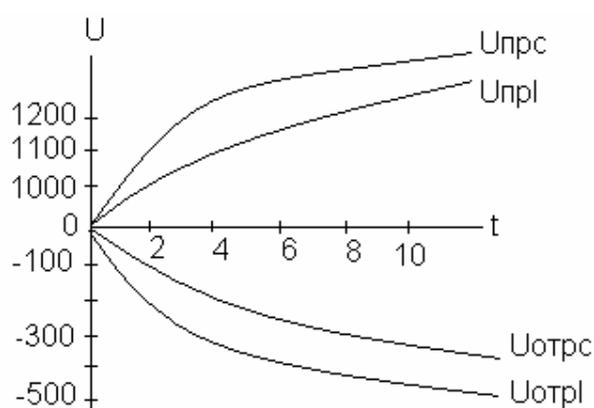
$$K_\Gamma = \frac{\ln \frac{55,24}{7}}{\ln \frac{27,4}{0,015}} = 0,27.$$

Электромагнитный коэффициент связи: $K = \frac{K_{\Gamma}}{\beta} = \frac{0,27}{0,86} = 0,31$.

Индуктированное напряжение на проводе: $U_{\text{инд}} = K \cdot U_0 = 0,31 \cdot 1600 = 502,3 \text{ В}$.

Сделаем вывод о влиянии индуктивности и емкости на волновой процесс.

Индуктивность и емкость необходимы для сглаживания фронта электромагнитной волны.



Практическое занятие № 2.

Грозоупорность ВЛ.

Цель занятия: научиться определять число грозовых отключений ВЛ с тросами и без тросов и оценивать надежность грозозащиты.

В процессе практического занятия рассматривается задача по оценке грозоупорности ВЛ с тросом на примере ВЛ 110 или 220 кВ по выбору преподавателя.

Рекомендуется вначале рассмотреть отключения ВЛ при ударе молнии в опору, затем в трос и затем в провод при прорыве тросовой защиты. Полученные результаты суммируются и сравниваются с приведенными в [27,1], делается вывод о надежности грозозащиты рассмотренной ВЛ. Студенты предлагают мероприятия по ее понижению и в процессе деловой игры выбирают оптимальное для рассмотренного случая.

Пример решения задачи.

Грозоупорность ВЛ

1. Удар молнии в опору

$n_{\text{из}} := 12$ число изоляторов в гирлянде.

$H_{\text{из}} := 0.127$ высота одного изолятора, (м).

$$L_{\text{разр}} := n_{\text{из}} \cdot H_{\text{из}} \quad L_{\text{разр}} = 1.524$$

$U_{\text{дл.доп}} := 252$ наибольшее длительно допустимое рабочее (линейное) напряжение (кВ).

Коэффициент перехода импульсного перекрытия в дугу тока пром. частоты:

$$\eta := \left(0.92 \cdot \frac{U_{\text{дл.доп}}}{L_{\text{разр}}} - 6 \right) \cdot 10^{-2} \quad \eta = 1.461 \quad \eta := 1$$

$t := 7 \cdot 10^{-6}$ время перекрытия изоляции, (сек).

$k_{\text{констр}} := 2.2$ коэф. учитывающий разницу в конструкции изоляторов (т.к. чистая атмосфера).

$k_E := 1$ коэф. учитывающий снижение градиента разрядного напряжения с увеличением длины гирлянды.

$$U_{50\%} := 340 \cdot k_{\text{констр}} \cdot k_E \cdot L_{\text{разр}} \cdot \left(1 + \frac{15}{t + 9.5} \right) \quad U_{50\%} = 2939.875 \text{ В}$$

$R_{\text{и}} := 0.5$ импульсное сопротивление заземлителя, (Ом).

$\delta := 0.3$ для одного троса.

$h_{\text{опоры}} := 36$ высота опоры (стальная, одноцепная, башенного типа), (м).

Крутизна тока молнии:

$$I_{\text{кр}} := \frac{U_{50\%}}{R_{\text{и}} + \delta \cdot h_{\text{опоры}}} \quad I_{\text{кр}} = 260.166$$

Вероятность перекрытия лин. изоляции:

$$P_{\text{опоры}} := e^{-0.04 \cdot I_{\text{кр}}} \quad P_{\text{опоры}} = 0.00003$$

$P_{\text{АПВ}} := 0.75$ вероятность успешной работы АПВ (т.к. $U=220$ кВ).

$h_{\text{тр}} := 36$ высота подвеса троса (м).

$L_{\text{прол}} := 500$ длина пролета (м).

$N_{\text{гроз.деят}} := 30$ число грозových часов.

Плотность разрядов молнии на землю:

$$p_0 := 0.05 \cdot N_{\text{Гроз.деят}}$$

$$p_0 = 1.5$$

$$d_{\text{тр_тр}} := 0 \quad \text{расстояние между системой "трос-трос" (равно 0, т.к. 1 трос).}$$

$$h_{\text{ср}} := 36 \quad \text{средняя высота подвеса провода (м).}$$

Общее число ударов молнии на 100 км длины линии:

$$N := 0.2 \cdot p_0 \cdot \left(\frac{d_{\text{тр_тр}}}{2} + 5 \cdot h_{\text{ср}} - \frac{2 \cdot h_{\text{ср}}^2}{30} \right)$$

$$N = 28.08 \quad N := 28$$

Число ударов в опру:

$$N_{\text{оп}} := 4 \cdot N \cdot \frac{h_{\text{тр}}}{L_{\text{прол}}}$$

$$N_{\text{оп}} = 8.064 \quad N_{\text{оп}} := 8$$

Удельное число грозовых отключений от обратных перекрытий линейной изоляции при ударе молнии опоры:

$$n_{\text{оп}} := N_{\text{оп}} \cdot P_{\text{опоры}} \cdot \eta \cdot (1 - P_{\text{АПВ}})$$

$$n_{\text{оп}} = 0.0000605$$

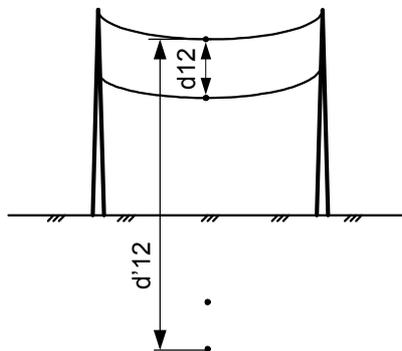
2. Удар молнии в трос в середине пролета.

$$E_{\text{ср}} := 21 \quad \text{средняя напряженность поля (отр. полярность), (кВ/см).}$$

$$h_{\text{тр}} := 3600 \quad \text{высота подвеса троса, (см).}$$

$$r := 0.6 \quad \text{радиус, (см).}$$

$$\beta := 1.16 \cdot \frac{\ln \left(\frac{15 \cdot h_{\text{тр}} \cdot E_{\text{ср}}}{U_{\text{дл.доп}}} \right)}{\ln \left(\frac{2 \cdot h_{\text{тр}}}{r} \right)} \quad \beta = 1.098$$



$$h_{\Gamma} := 7 \quad \text{наименьшее допустимое расстояние от провода до земли в середине пролета, (м).}$$

$$h_{\text{пр}} := 32 \quad \text{высота подвеса провода, (м).}$$

$$h_{\text{тр}} := 36 \quad \text{высота подвеса троса, (м).}$$

$$r := 0.006 \quad \text{радиус, (м).}$$

стрела провеса, (м):

$$f_{\text{тр}} := h_{\text{тр}} - h_{\Gamma} - (36 - 32) - 2$$

$$f_{\text{тр}} = 23$$

средняя высота подвеса троса, (м).

$$h_{\text{ср.тр}} := h_{\text{тр}} - \frac{2}{3} \cdot f_{\text{тр}}$$

$$h_{\text{ср.тр}} = 20.667$$

$$d'_{12} := 2 \cdot 20.667$$

$$d_{12} := 4$$

$$z_{11} := 60 \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot h_{\text{ср.тр}}}{r} \right)$$

$$z_{11} = 530.26$$

$$z_{12} := 60 \cdot \ln \left(\frac{d'_{12}}{d_{12}} \right) \quad z_{12} = 140.123$$

волновое сопротивление троса, рассчитанное по геометрическим параметрам линии:

$$z_{\text{тр.Г}} := \frac{z_{11} + z_{12}}{2} \quad z_{\text{тр.Г}} = 335.192$$

волновое сопротивление коронирующей линии:

$$z_{\text{тр.к}} := z_{\text{тр.Г}} \cdot \beta \quad z_{\text{тр.к}} = 367.961$$

расстояние между тросом и верхним проводом, (м):

$$\Delta h := h_{\text{тр}} - h_{\text{пр}} \quad \Delta h = 4$$

$v := 3 \cdot 10^8$ м/сек скорость распространения волны, (м/мксек).

$E_{\text{расч.ср}} := 750$ кВ/м средняя напряженность поля, кВ/м.

$$k_{\Gamma} := \frac{z_{12}}{z_{11}} \quad k_{\Gamma} = 0.264$$

$$K_k := k_{\Gamma} \cdot \frac{z_{\text{тр.Г}}}{z_{\text{тр.к}}} \quad K_k = 0.241$$

Критическая крутизна фронта тока молнии, при котором происходит перекрытие изоляции:

$$a_{\text{кр}} := \frac{2 \cdot E_{\text{расч.ср}} \cdot \Delta h \cdot v}{z_{\text{тр.к}} \cdot (1 - K_k) \cdot L_{\text{прол}}} \quad a_{\text{кр}} = 12.885$$

Вероятность перекрытия изоляции при ударе молнии в трос в середине пролета:

$$P_{\text{тр}} := e^{-0.08 \cdot a_{\text{кр}}} \quad P_{\text{тр}} = 0.35671$$

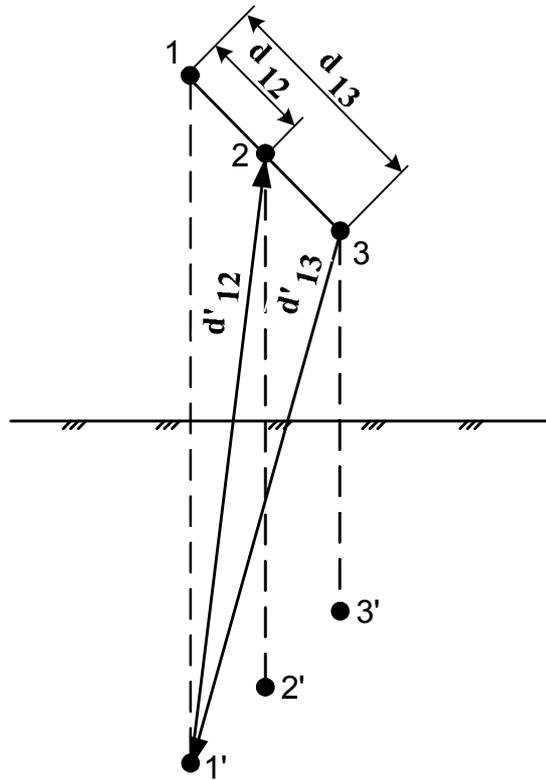
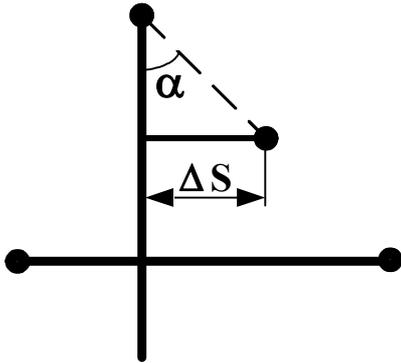
Число ударов молнии в трос:

$$N_{\text{тр}} := N \cdot \left(1 - \frac{4 \cdot h_{\text{тр}}}{L_{\text{прол}}} \right) \quad N_{\text{тр}} = 19.936$$

Ожидаемое удельное число грозových отключений ВЛ из-за ударов молнии в трос в середине пролета:

$$n_{\text{тр}} := N_{\text{тр}} \cdot P_{\text{тр}} \cdot \eta \quad n_{\text{тр}} = 7.111$$

3. Удар молнии в провод при прорыве сквозь тросовую защиту.



$$d_{12} := \sqrt{4^2 + 3.5^2}$$

$$d_{13} := \sqrt{10.5^2 + 6.1^2}$$

$$d'_{12} := \sqrt{72^2 + 4.65^2}$$

$$d'_{13} := \sqrt{72^2 + 7.25^2}$$

$$d_{12} = 5.315$$

$$d_{13} = 12.143$$

$$d'_{12} = 72.15$$

$$d'_{13} = 72.364$$

$h_{\Gamma} := 7$ наименьшее допустимое расстояние от провода до земли в середине пролета, (м).

$h_{\text{пр}} := 25.5$ высота подвеса нижнего провода, (м).

$h_{\text{тр}} := 36$ высота подвеса троса, (м).

$r := 0.006$ радиус, (м).

стрела провеса, (м):

$$f_{\text{пр}} := h_{\text{пр}} - h_{\Gamma}$$

$$f_{\text{пр}} = 18.5$$

средняя высота подвеса троса, (м):

$$h_{\text{ср.пр}} := h_{\text{пр}} - \frac{2}{3} \cdot f_{\text{пр}}$$

$$h_{\text{ср.пр}} = 13.167$$

$$z_{11} := 60 \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot h_{\text{ср.пр}}}{r} \right)$$

$$z_{11} = 503.21$$

$$z_{12} := 60 \cdot \ln \left(\frac{d'_{12}}{d_{12}} \right) \quad z_{12} = 156.492$$

$$z_{13} := 60 \cdot \ln \left(\frac{d'_{13}}{d_{13}} \right) \quad z_{13} = 107.096$$

волновое сопротивление провода, рассчитанное по геометрическим параметрам линии:

$$z_{\text{пр.г}} := \frac{z_{11} + z_{12} + z_{13}}{3} \quad z_{\text{пр.г}} = 255.599$$

волновое сопротивление коронирующей линии:

$$z_{\text{пр.к}} := z_{\text{пр.г}} \cdot \beta \quad z_{\text{пр.к}} = 280.588$$

$U'_{50\%} := 625$ разрядное напряжение для импульса "+" полярности, (кВ).

$$U_{50\%} := U'_{50\%} \cdot \left[0.92 - 0.012 \cdot L_{\text{разр}} \left[(0.74 - 0.06 \cdot L_{\text{разр}}) \cdot (L_{\text{разр}}^{-3}) \right] \right] \quad U_{50\%} = 569.989$$

$$I_{\text{кр}} := \frac{2 \cdot U_{50\%}}{z_{\text{пр.к}}} \quad I_{\text{кр}} = 4.063 \quad \text{кА}$$

$$P_{\text{пр}} := e^{-0.04 \cdot I_{\text{кр}}} \quad P_{\text{пр}} = 0.85$$

угол тросовой защиты:

$$\alpha := \text{atan} \left(\frac{3.5}{4} \right) \quad \frac{\alpha}{\text{deg}} = 41.186 \quad \alpha := 41.186$$

$\Delta S := 3.5$ горизонтальное смещение провода относительно троса, (м).

$$D := 1 + U_{\text{дл.доп}} \cdot \frac{h_{\text{тр}}}{\Delta h} \cdot \left(\frac{U_{\text{дл.доп}}^{2 \cdot 117}}{\Delta h \cdot \Delta S \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot h_{\text{пр}}}{r} \right)} \right) \quad D = 1.33 \times 10^8$$

Вероятность прорыва молнии на провод при положительных углах(а) защиты троса:

$$p_{\alpha} := e^{\frac{1}{D} \cdot \left(\frac{0.55}{\Delta h} \cdot \sqrt{\alpha \cdot h_{\text{тр}} \cdot \Delta S} - \frac{9}{D} \right)} \quad p_{\alpha} = 1$$

$$N_{\text{пр}} := N \cdot p_{\alpha} \quad N_{\text{пр}} = 28$$

$$n := N_{\text{пр}} \cdot P_{\text{пр}} \cdot \eta \quad n = 23.8$$

по горизонтали

$$n_{\Gamma} := \frac{A + 3}{l_{\text{ПП}}}$$

$$n_{\Gamma} = 6.156$$

$$n_{\Gamma} := 6$$

по вертикали

$$n_{\text{В}} := \frac{B + 3}{l_{\text{ПП}}}$$

$$n_{\text{В}} = 5.028$$

$$n_{\text{В}} := 5$$

определяем длину сторон ячейки:

$$L_{\Gamma} := \frac{A + 3}{n_{\Gamma}}$$

$$L_{\Gamma} = 18.467 \quad \text{м}$$

$$L_{\text{В}} := \frac{B + 3}{n_{\text{В}}}$$

$$L_{\text{В}} = 18.1 \quad \text{м}$$

каждая ячейка размером 18,46 x 18,1

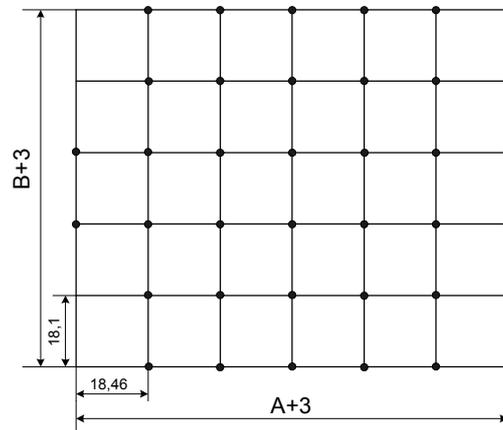


Рисунок 3 - Сетка заземления и расстановка вертикальных электродов

длина полос в рассматриваемой модели:

$$L := (18.46 \cdot 6 \cdot 6) + (18.1 \cdot 5 \cdot 7)$$

$$L = 1298.06 \quad (\text{м})$$

количество вертикальных электродов:

$$n_{\text{В}} := \frac{4 \cdot \sqrt{S}}{12}$$

$$n_{\text{В}} = 33.379$$

$$n_{\text{В}} := 34$$

длина вертикальных электродов:

$$L_{\text{В}} := 5 \quad (\text{м})$$

отношение $\frac{L_{\text{В}}}{\sqrt{S}} = 0.05$

коэффициент $A := 0.4$

вычисляем стационарное сопротивление заземлителя

$$R_1 := \rho_1 \cdot \left(\frac{A}{\sqrt{S}} + \frac{1}{L + n_B \cdot L_B} \right) \quad R_1 = 0.094 \quad (\text{Ом})$$

$$R_2 := \rho_2 \cdot \left(\frac{A}{\sqrt{S}} + \frac{1}{L + n_B \cdot L_B} \right) \quad R_2 = 0.049 \quad (\text{Ом})$$

Находим импульсный коэффициент для обоих слоев

$$\alpha_{и1} := \sqrt{\frac{1500\sqrt{S}}{(\rho_1 + 320) \cdot (I_{\text{МОЛН}} + 45)}} \quad \alpha_{и1} = 2.102$$

$$\alpha_{и2} := \sqrt{\frac{1500\sqrt{S}}{(\rho_2 + 320) \cdot (I_{\text{МОЛН}} + 45)}} \quad \alpha_{и2} = 2.132$$

Расчитываем импульсное сопротивление заземлителя, (Ом)

$$R_{и1} := R_1 \cdot \alpha_{и1} \quad R_{и1} = 0.197$$

$$R_{и2} := R_2 \cdot \alpha_{и2} \quad R_{и2} = 0.10$$

$$R_{об} := R_{и1} + R_{и2} \quad R_{об} = 0.301$$

Расчет молниезащиты подстанции

Исходные данные:

высота шинных молниеотводов над уровнем земли	$h_{ш} := 21$	(м)
высота линейных молниеотводов над уровнем земли	$h_{л} := 28$	(м)
высота линейного портала над уровнем земли	$h_{лп} := 16.5$	(м)
высота шинного портала над уровнем земли	$h_{шп} := 11$	(м)
расстояние между шинными молниеотводами	$L_{шш} := 30.8$	(м)
расстояние между линейными молниеотводами	$L_{лл} := 30.8$	(м)
номинальное напряжение ОРУ - 220 кВ		

Двойной стержневой молниеотвод 1-2

эффективная высота молниеотвода	$h_{эфш} := 0.85 \cdot h_{ш}$	$h_{эфш} = 17.85$	(м)
радиус зоны защиты на уровне земли	$r_{0ш} := (1.1 - 0.002 \cdot h_{ш}) \cdot h_{ш}$	$r_{0ш} = 22.218$	(м)
минимальная высота внутренней зоны	$h_{схш} := h_{эфш} - (0.17 + 3 \cdot 10^{-4} \cdot h_{ш}) \cdot (L_{шш} - h_{ш})$	$h_{схш} = 16.122$	(м)
половина ширины внутренней зоны на уровне земли	$r_{с0ш} := r_{0ш}$	$r_{с0ш} = 22.218$	(м)

проверяем на защищенность шинные порталы

$$\text{радиус зоны защиты на высоте защищаемого объекта} \quad r_{\text{хшп}} := r_{0\text{ш}} \cdot \left(1 - \frac{h_{\text{шп}}}{h_{\text{эфш}}} \right) \quad r_{\text{хшп}} = 8.526 \quad (\text{м})$$

$$\text{половина ширины внутренней зоны на высоте защищаемого объекта} \quad r_{\text{схшп}} := r_{\text{с0ш}} \cdot \left(\frac{h_{\text{схш}} - h_{\text{шп}}}{h_{\text{схш}}} \right) \quad r_{\text{схшп}} = 7.059 \quad (\text{м})$$

$$\text{радиус внутренней зоны} \quad r_{\text{хшп1}} := r_{\text{с0ш}} \cdot \left(1 - \frac{h_{\text{шп}}}{h_{\text{эфш}}} \right) \quad r_{\text{хшп1}} = 8.526 \quad (\text{м})$$

Двойной стержневой молниеотвод 3-4

$$\text{эффективная высота молниеотвода} \quad h_{\text{эфл}} := 0.85 \cdot h_{\text{л}} \quad h_{\text{эфл}} = 23.8 \quad (\text{м})$$

$$\text{радиус зоны защиты на уровне земли} \quad r_{0\text{л}} := (1.1 - 0.002 \cdot h_{\text{л}}) \cdot h_{\text{л}} \quad r_{0\text{л}} = 29.232 \quad (\text{м})$$

$$\text{минимальная высота внутренней зоны} \quad h_{\text{схл}} := h_{\text{эфл}} - (0.17 + 3 \cdot 10^{-4} \cdot h_{\text{л}}) \cdot (L_{\text{лл}} - h_{\text{л}}) \quad h_{\text{схл}} = 23.3 \quad (\text{м})$$

$$\text{половина ширины внутренней зоны на уровне земли} \quad r_{\text{с0л}} := r_{0\text{л}} \quad r_{\text{с0л}} = 29.232 \quad (\text{м})$$

проверяем на защищенность линейные порталы

$$\text{радиус зоны защиты на высоте защищаемого объекта линейного портала} \quad r_{\text{хлп1}} := r_{0\text{л}} \cdot \left(1 - \frac{h_{\text{лп}}}{h_{\text{эфл}}} \right) \quad r_{\text{хлп1}} = 8.966 \quad (\text{м})$$

$$\text{радиус зоны защиты на высоте защищаемого объекта шинного портала} \quad r_{\text{хлп2}} := r_{0\text{л}} \cdot \left(1 - \frac{h_{\text{шп}}}{h_{\text{эфл}}} \right) \quad r_{\text{хлп2}} = 15.721 \quad (\text{м})$$

$$\text{половина ширины внутренней зоны на высоте защищаемого объекта} \quad r_{\text{схлп}} := r_{\text{с0л}} \cdot \left(\frac{h_{\text{схл}} - h_{\text{лп}}}{h_{\text{схл}}} \right) \quad r_{\text{схлп}} = 8.532 \quad (\text{м})$$

Двойной стержневой молниеотвод 1-3 (Разные высоты)

высоты молниеотводов равны высоте линейного молниеотвода

$$\text{расстояние между шинным и линейным молниеотводами} \quad L_{\text{шл}} := 18 \quad (\text{м})$$

$$\text{эффективная высота молниеотвода} \quad h_{\text{эфл}} := 0.85 \cdot h_{\text{л}} \quad h_{\text{эфл}} = 23.8 \quad (\text{м})$$

$$\text{радиус зоны защиты на уровне земли} \quad r_{0\text{л}} := (1.1 - 0.002 \cdot h_{\text{л}}) \cdot h_{\text{л}} \quad r_{0\text{л}} = 29.232 \quad (\text{м})$$

$$\text{минимальная высота внутренней зоны} \quad h_{\text{схл}} := h_{\text{эфл}} - (0.17 + 3 \cdot 10^{-4} \cdot h_{\text{л}}) \cdot (L_{\text{шл}} - h_{\text{л}})$$

$$h_{\text{схл}} = 25.584 \quad (\text{м})$$

$$\text{половина ширины внутренней зоны на высоте защищаемого объекта шинного портала} \quad r_{\text{схшп1}} := r_{\text{с0л}} \cdot \left(\frac{h_{\text{схл}} - h_{\text{шп}}}{h_{\text{схл}}} \right) \quad r_{\text{схшп1}} = 16.664 \quad (\text{м})$$

высоты молниеотводов равны высоте шинного молниеотвода

$$\text{эффективная высота молниеотвода} \quad h_{\text{эфш}} := 0.85 \cdot h_{\text{ш}} \quad h_{\text{эфш}} = 17.85 \quad (\text{м})$$

$$\text{радиус зоны защиты на уровне земли} \quad r_{0\text{ш}} := (1.1 - 0.002 \cdot h_{\text{ш}}) \cdot h_{\text{ш}} \quad r_{0\text{ш}} = 22.218 \quad (\text{м})$$

$$\text{минимальная высота внутренней зоны} \quad h_{\text{схш}} := h_{\text{эфш}} - (0.17 + 3 \cdot 10^{-4} \cdot h_{\text{ш}}) \cdot (L_{\text{шл}} - h_{\text{ш}})$$

		$h_{\text{СХШ}} = 18.379$	(м)
половина ширины внутренней зоны на высоте защищаемого объекта шинного портала	$r_{\text{СХШП2}} := r_{\text{С0Ш}} \cdot \left(\frac{h_{\text{СХШ}} - h_{\text{ШП}}}{h_{\text{СХШ}}} \right)$	$r_{\text{СХШП2}} = 8.92$	(м)
средняя минимальная высота внутренней зоны	$h_{\text{СХСР}} := \frac{h_{\text{СХЛ}} + h_{\text{СХШ}}}{2}$	$h_{\text{СХСР}} = 21.981$	(м)
средняя половина ширины внутренней зоны на уровне высоты шинного портала	$r_{\text{СХШП}} := \frac{r_{\text{СХШП1}} + r_{\text{СХШП2}}}{2}$	$r_{\text{СХШП}} = 12.792$	(м)

Двойной стержневой молниеотвод 2-3 (Разные высоты)

высоты молниеотводов равны высоте линейного молниеотвода

расстояние между шинным и линейным молниеотводами $L_{\text{ШЛ}} := 35.67$ (м)

эффективная высота молниеотвода $h_{\text{ЭФЛ}} := 0.85 \cdot h_{\text{Л}}$ $h_{\text{ЭФЛ}} = 23.8$ (м)

радиус зоны защиты на уровне земли $r_{\text{0Л}} := (1.1 - 0.002 \cdot h_{\text{Л}}) \cdot h_{\text{Л}}$ $r_{\text{0Л}} = 29.232$ (м)

минимальная высота внутренней зоны $h_{\text{СХЛ}} := h_{\text{ЭФЛ}} - (0.17 + 3 \cdot 10^{-4} \cdot h_{\text{Л}}) \cdot (L_{\text{ШЛ}} - h_{\text{Л}})$ $h_{\text{СХЛ}} = 22.432$ (м)

половина ширины внутренней зоны на высоте защищаемого объекта шинного портала $r_{\text{СХШП1}} := r_{\text{С0Л}} \cdot \left(\frac{h_{\text{СХЛ}} - h_{\text{ШП}}}{h_{\text{СХЛ}}} \right)$ $r_{\text{СХШП1}} = 14.897$ (м)

высоты молниеотводов равны высоте шинного молниеотвода

эффективная высота молниеотвода $h_{\text{ЭФШ}} := 0.85 \cdot h_{\text{Ш}}$ $h_{\text{ЭФШ}} = 17.85$ (м)

радиус зоны защиты на уровне земли $r_{\text{0Ш}} := (1.1 - 0.002 \cdot h_{\text{Ш}}) \cdot h_{\text{Ш}}$ $r_{\text{0Ш}} = 22.218$ (м)

минимальная высота внутренней зоны $h_{\text{СХШ}} := h_{\text{ЭФШ}} - (0.17 + 3 \cdot 10^{-4} \cdot h_{\text{Ш}}) \cdot (L_{\text{ШЛ}} - h_{\text{Ш}})$ $h_{\text{СХШ}} = 15.264$ (м)

половина ширины внутренней зоны на высоте защищаемого объекта шинного портала $r_{\text{СХШП2}} := r_{\text{С0Ш}} \cdot \left(\frac{h_{\text{СХШ}} - h_{\text{ШП}}}{h_{\text{СХШ}}} \right)$ $r_{\text{СХШП2}} = 6.206$ (м)

средняя минимальная высота внутренней зоны $h_{\text{СХСР}} := \frac{h_{\text{СХЛ}} + h_{\text{СХШ}}}{2}$ $h_{\text{СХСР}} = 18.848$ (м)

средняя половина ширины внутренней зоны на уровне высоты шинного портала $r_{\text{СХШП}} := \frac{r_{\text{СХШП1}} + r_{\text{СХШП2}}}{2}$ $r_{\text{СХШП}} = 10.552$ (м)

Двойной стержневой молниеотвод 3-5

расстояние между линейными молниеотводами

$L_{\text{ЛЛ}} := 40.6$ (м)

эффективная высота молниеотвода $h_{\text{ЭФЛ}} := 0.85 \cdot h_{\text{Л}}$ $h_{\text{ЭФЛ}} = 23.8$ (м)

радиус зоны защиты на уровне земли $r_{\text{0Л}} := (1.1 - 0.002 \cdot h_{\text{Л}}) \cdot h_{\text{Л}}$ $r_{\text{0Л}} = 29.232$ (м)

минимальная высота внутренней зоны $h_{\text{СХЛ}} := h_{\text{ЭФЛ}} - (0.17 + 3 \cdot 10^{-4} \cdot h_{\text{Л}}) \cdot (L_{\text{ЛЛ}} - h_{\text{Л}})$ $h_{\text{СХЛ}} = 21.552$ (м)

половина ширины внутренней зоны на уровне земли $r_{\text{С0Л}} := r_{\text{0Л}}$ $r_{\text{С0Л}} = 29.232$ (м)

проверяем на защищенность шинные порталы

радиус зоны защиты на высоте защищаемого объекта шинного портала $r_{хшп} := r_{0л} \cdot \left(1 - \frac{h_{шп}}{h_{эфл}} \right)$ $r_{хшп} = 15.721$ (м)

половина ширины внутренней зоны на высоте защищаемого объекта шинного портала $r_{схшп} := r_{с0л} \cdot \left(\frac{h_{схл} - h_{шп}}{h_{схл}} \right)$ $r_{схшп} = 14.312$ (м)

Двойной стержневой молниеотвод 4-5

расстояние между линейными молниеотводами $L_{лл} := 50.96$ (м)

эффективная высота молниеотвода $h_{эфл} := 0.85 \cdot h_{л}$ $h_{эфл} = 23.8$ (м)

радиус зоны защиты на уровне земли $r_{0л} := (1.1 - 0.002 \cdot h_{л}) \cdot h_{л}$ $r_{0л} = 29.232$ (м)

минимальная высота внутренней зоны $h_{схл} := h_{эфл} - (0.17 + 3 \cdot 10^{-4} \cdot h_{л}) \cdot (L_{лл} - h_{л})$ $h_{схл} = 19.704$ (м)

половина ширины внутренней зоны на уровне земли $r_{с0л} := r_{0л}$ $r_{с0л} = 29.232$ (м)

проверяем на защищенность шинные порталы

радиус зоны защиты на высоте защищаемого объекта шинного портала $r_{хшп} := r_{0л} \cdot \left(1 - \frac{h_{шп}}{h_{эфл}} \right)$ $r_{хшп} = 15.721$ (м)

половина ширины внутренней зоны на высоте защищаемого объекта шинного портала $r_{схшп} := r_{с0л} \cdot \left(\frac{h_{схл} - h_{шп}}{h_{схл}} \right)$ $r_{схшп} = 12.913$ (м)

Двойной стержневой молниеотвод 6-7

расстояние между шинными молниеотводами $L_{шш} := 15.4$ (м)

расстояние между линейными молниеотводами $L_{лл} := 15.4$ (м)

эффективная высота молниеотвода $h_{эфш} := 0.85 \cdot h_{ш}$ $h_{эфш} = 17.85$ (м)

радиус зоны защиты на уровне земли $r_{0ш} := (1.1 - 0.002 \cdot h_{ш}) \cdot h_{ш}$ $r_{0ш} = 22.218$ (м)

минимальная высота внутренней зоны $h_{схш} := h_{эфш} - (0.17 + 3 \cdot 10^{-4} \cdot h_{ш}) \cdot (L_{шш} - h_{ш})$

$h_{схш} = 18.837$ (м)

половина ширины внутренней зоны на уровне земли $r_{с0ш} := r_{0ш}$ $r_{с0ш} = 22.218$ (м)

проверяем на защищенность шинные порталы

радиус зоны защиты на высоте защищаемого объекта $r_{хшп} := r_{0ш} \cdot \left(1 - \frac{h_{шп}}{h_{эфш}} \right)$ $r_{хшп} = 8.526$ (м)

половина ширины внутренней зоны на высоте защищаемого объекта $r_{схшп} := r_{с0ш} \cdot \left(\frac{h_{схш} - h_{шп}}{h_{схш}} \right)$ $r_{схшп} = 9.244$ (м)

радиус внутренней зоны $r_{хшп1} := r_{с0ш} \cdot \left(1 - \frac{h_{шп}}{h_{эфш}} \right)$ $r_{хшп1} = 8.526$ (м)

Двойной стержневой молниеотвод 8-9

эффективная высота молниеотвода	$h_{\text{эфл}} := 0.85 \cdot h_{\text{л}}$	$h_{\text{эфл}} = 23.8$ (м)
радиус зоны защиты на уровне земли	$r_{0\text{л}} := (1.1 - 0.002 \cdot h_{\text{л}}) \cdot h_{\text{л}}$	$r_{0\text{л}} = 29.232$ (м)
минимальная высота внутренней зоны	$h_{\text{схл}} := h_{\text{эфл}} - (0.17 + 3 \cdot 10^{-4} \cdot h_{\text{л}}) \cdot (L_{\text{лл}} - h_{\text{л}})$	$h_{\text{схл}} = 26.048$ (м)
половина ширины внутренней зоны на уровне земли	$r_{\text{с0л}} := r_{0\text{л}}$	$r_{\text{с0л}} = 29.232$ (м)

проверяем на защищенность линейные порталы

радиус зоны защиты на высоте защищаемого объекта линейного портала	$r_{\text{хлп1}} := r_{0\text{л}} \cdot \left(1 - \frac{h_{\text{лп}}}{h_{\text{эфл}}}\right)$	$r_{\text{хлп1}} = 8.966$ (м)
радиус зоны защиты на высоте защищаемого объекта шинного портала	$r_{\text{хлп2}} := r_{0\text{л}} \cdot \left(1 - \frac{h_{\text{шп}}}{h_{\text{эфл}}}\right)$	$r_{\text{хлп2}} = 15.721$ (м)
половина ширины внутренней зоны на высоте защищаемого объекта	$r_{\text{схлп}} := r_{\text{с0л}} \cdot \left(\frac{h_{\text{схл}} - h_{\text{лп}}}{h_{\text{схл}}}\right)$	$r_{\text{схлп}} = 10.715$ (м)

Двойной стержневой молниеотвод 8-11

расстояние между линейными молниеотводами	$L_{\text{лл}} := 43.32$ (м)
эффективная высота молниеотвода	$h_{\text{эфл}} := 0.85 \cdot h_{\text{л}} \quad h_{\text{эфл}} = 23.8$ (м)
радиус зоны защиты на уровне земли	$r_{0\text{л}} := (1.1 - 0.002 \cdot h_{\text{л}}) \cdot h_{\text{л}} \quad r_{0\text{л}} = 29.232$ (м)
минимальная высота внутренней зоны	$h_{\text{схл}} := h_{\text{эфл}} - (0.17 + 3 \cdot 10^{-4} \cdot h_{\text{л}}) \cdot (L_{\text{лл}} - h_{\text{л}}) \quad h_{\text{схл}} = 21.067$ (м)
половина ширины внутренней зоны на уровне земли	$r_{\text{с0л}} := r_{0\text{л}} \quad r_{\text{с0л}} = 29.232$ (м)

проверяем на защищенность шинные порталы

радиус зоны защиты на высоте защищаемого объекта шинного портала	$r_{\text{хшп}} := r_{0\text{л}} \cdot \left(1 - \frac{h_{\text{шп}}}{h_{\text{эфл}}}\right)$	$r_{\text{хшп}} = 15.721$ (м)
половина ширины внутренней зоны на высоте защищаемого объекта шинного портала	$r_{\text{схшп}} := r_{\text{с0л}} \cdot \left(\frac{h_{\text{схл}} - h_{\text{шп}}}{h_{\text{схл}}}\right)$	$r_{\text{схшп}} = 13.969$ (м)

Грозоупорность ОРУ

1. Определяем число случаев перекрытия изоляции при прорывах прямых ударов молнии и обратных перекрытий.

$r_{\text{э}} := 0.006$	радиус фазы
$h_{\text{ср}} := 11$	высота подвеса ошиновки
волновое сопротивление ошиновки, (Ом)	
$z_{\text{ош}} := 60 \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot h_{\text{ср}}}{r_{\text{э}}}\right)$	$z_{\text{ош}} = 492.422$
$U_{50\%} := 620$	разрядное напряжение для импульса отрицательной полярности, (кВ).

$$I_{кр} := \frac{2 \cdot U_{50\%}}{Z_{ОШ}} \quad I_{кр} = 2.518 \quad \text{кА}$$

доля опасных перенапряжений, возникающих при непосредственном грозовом разряде в ошиновку ОРУ минуя молниеотводы:

$$P_{пр} := e^{-0.04 \cdot I_{кр}} \quad P_{пр} = 0.904$$

$I_{гирл} := 0.0255$ высота подвеса гирлянды на опоре, (км).

$R_{и} := 10$ импульсное сопротивление заземлителя, (Ом).

$$I_{оп} := \frac{U_{50\%} - 50 \cdot I_{гирл}}{R_{и}} \quad I_{оп} = 61.873$$

вероятность обратного перекрытия при ударах молнии в гирлянду изоляторов:

$$P_{оп} := e^{-0.04 \cdot I_{оп}} \quad P_{оп} = 0.084$$

$P_{\alpha} := 0.005$ вероятность грозового поражения ошиновки ОРУ минуя молниеотводы (для класса номинального напряжения до 750 кВ).

$\eta_{пр} := 0.9$ вероятность перехода импульсного перенапряжения изоляции в силовую дугу при разрядах молнии в ПС минуя молниеотводы.

$\eta_{оп} := 0.9$ вероятность перехода импульсного перенапряжения изоляции в силовую дугу при обратных перекрытиях.

$h_c := 22.5$ максимальная высота сооружения на ПС, (м).

эквивалентная ширина, с которой сооружение собирает боковые разряды, (м):

$$R_{\text{ЭКВ}} := 5 \cdot h_c - \frac{2 \cdot h_c^2}{30} \quad R_{\text{ЭКВ}} = 78.75$$

$a_T := 107.8$ длина территории ПС, (м).

$b_T := 87.5$ ширина территории ПС, (м).

$N_{\text{Гроз_ч}} := 30$ число грозовых часов в году.

плотность разрядов молнии на 1 км² поверхности:

$$P_0 := 0.05 \cdot N_{\text{Гроз_ч}} \quad P_0 = 1.5$$

тогда число случаев перекрытия изоляции

$$N_{\text{пу}} := P_0 \cdot (a_T + 2 \cdot R_{\text{ЭКВ}}) \cdot (b_T + 2 \cdot R_{\text{ЭКВ}}) \cdot (\eta_{пр} \cdot P_{\alpha} \cdot P_{пр} + \eta_{оп} \cdot P_{оп}) \cdot 10^{-6}$$

$$N_{\text{пу}} = 0.007783$$

2. Определим среднюю повторяемость в годах опасных перенапряжений на ПС из-за грозовых разрядов в ОРУ (в годах):

$$T_{\text{пу}} := \frac{1}{N_{\text{пу}}} \quad T_{\text{пу}} = 128.492$$

Система молниезащиты ПС должна обеспечить в зависимости от класса ее номинального напряжения $T_{\text{пу}}$ не ниже 1000 для 220 кВ.

3. Определим число опасных грозовых перенапряжений от набегающих волн на ПС в целом, т.е. перенапряжений, превышающих допустимые значения за год.

допустимое сопротивление внутр. изоляции СТ, реактора, лин. выключателя, (кВ):

$$U_{\text{доп}} := 2.2 \cdot 220 \qquad U_{\text{доп}} = 484$$

$$Z_{\text{пр_кор}} := 367.961 \quad \text{волновое сопротивление коронирующей линии}$$

величина критического тока набегающей волны на РУ при ударе молнии в провод для внутр. изоляции элетроустановки:

$$I_{\text{пр_эу}} := \frac{2 \cdot U_{\text{доп}}}{Z_{\text{пр_кор}}} \qquad I_{\text{пр_эу}} = 2.631$$

доля опасных для изоляции ПС импульсов при прорыве молнии на провода, возникших в пределах опасной зоны:

$$\psi_{\text{пр}} := e^{-0.04 \cdot I_{\text{пр_эу}}} \qquad \psi_{\text{пр}} = 0.9$$

$$R_{\text{и}} := 10 \quad \text{импульсное сопротивление заземлителя.}$$

$$\delta := 0.3 \quad \text{для одного тросса.}$$

$$h_{\text{оп}} := 36 \quad \text{высота опоры, (м).}$$

величина критического тока для внутр. изоляции ПС при обратных перекрытиях лмн. изоляции:

$$I_{\text{оп_эу}} := \frac{U_{\text{доп}}}{R_{\text{и}} + \delta \cdot h_{\text{оп}}} \qquad I_{\text{оп_эу}} = 23.269$$

доля опасных для изоляции ПС импульсов при обратных перекрытиях изоляции, возникших в пределах опасной зоны:

$$\psi_{\text{оп}} := e^{-0.04 \cdot I_{\text{оп_эу}}} \qquad \psi_{\text{оп}} = 0.394$$

$$N_{\text{оп}} := 8 \quad \text{число ударов в опору.}$$

$$N := 25 \quad \text{общее число ударов молнии на 100 км длины линии.}$$

доля грозových ударов в опору:

$$\delta_{\text{оп}} := \frac{N_{\text{оп}}}{N} \qquad \delta_{\text{оп}} = 0.32$$

$$k_{\text{э}} := 0.6 \quad \text{коэффициент взаимного перекрытия линии вне городской черты (просека).}$$

$$n_{\text{вл}} := 2 \quad \text{число отходящих линий.}$$

$$l_{\text{опас_зана}} := 2 \quad \text{длина опасной зоны, (км)}$$

тогда число опасных грозových перенапряжений

$$N_{\text{нв}} := N \cdot N_{\text{гроз_ч}} \cdot l_{\text{опас_зана}} \cdot n_{\text{вл}} \cdot (1 - k_{\text{э}}) \cdot (p_{\alpha} \cdot \psi_{\text{пр}} + \delta_{\text{оп}} \cdot p_{\text{оп}} \cdot \psi_{\text{оп}}) \cdot 10^{-4}$$

$$N_{\text{нв}} = 0.00181$$

$$N_{\text{нв}} = 0.00181$$

4. Определим среднюю повторяемость опасных перенапряжений на ПС (в годах):

$$T_{\text{нв}} := \frac{1}{N_{\text{нв}}} \qquad T_{\text{нв}} = 551.159$$

Рекомендуемые показатели надежности грозозащиты ПС в зависимости от класса номинального напряжения оценивается следующим значением: $T_{\text{нв}} = 400 - 600$ для 220 кВ.

Практическое занятие № 3

Защита подстанций, электрических станций, ВЛ от прямых ударов молнии.

Цель занятия: научиться расставлять молниеотводы на планах НЕ станций и подстанций и определять их зоны молниезащиты, а также определять зоны молниезащиты ВЛ.

В процессе проведения практического занятия на примерах планов типовых РУ изучается как правильно расставлять молниеотводы, затем анализируются планы реальных подстанций с расстановкой молниеотводов, выполненной проектными организациями. На примере одного из планов РУ показывается как рассчитать зоны молниезащиты. Предлагается студентам выполнить аналогичный расчет самостоятельно и рассмотреть расчет зон молниезащиты ВЛ.

В начале практического занятия рекомендуется отметить, что защита от прямых ударов молнии выполняется в комплексе с заземлением и защитой от набегания волн перенапряжений, поэтому целесообразно рассматривать ее как элемент комплексной задачи. Пример решения такой задачи показан в п. 5.2 в примере выполнения расчетно-графической работы.

Практическое занятие № 4.

Определение импульсного сопротивления заземления РУ, молниеотводов, опор.

Цель занятия: научиться конструктивно выполнять заземления НЕ станций и подстанций и определять их импульсные сопротивления, аналогично для молниеотводов и опор.

В процессе проведения занятия вначале анализируются планы РУ с заземлениями, рассматриваются условные прокладки заземлений. Затем показывается на плане РУ как выполнить сетку заземления и дается порядок расчета стационарного и импульсного сопротивлений заземления.

Следующая задача – выполнение заземление молниеотвода или опоры по выбору преподавателя. Она решается совместно с аудиторией, при этом подчеркиваются отличие конструктивного плана от предыдущего заземления.

Пример решения таких задач подробно рассмотрен в п. 5.2 при выполнении РГР.

Практическое занятие № 5.

ОПН, их характеристики и выбор. Выбор места расположения ОПН на схеме и на плане РУ.

Цель занятия: изучить характеристики ОПН, освоить методику выбора ОПН, а также – методику их размещения вначале на схеме РУ, затем на плане РУ. Научиться выбирать типы и количество ОПН и расставлять их на плане и на схеме.

На занятии с помощью медиапроектора показываются характеристики ОПН, обсуждается с аудиторией какие из них целесообразно использовать при выборе ОПН. Затем приводится пример предварительного и окончательного выбора ОПН.

На схемах РУ подстанций с помощью медиапроектора демонстрируется установка ОПН, рассматриваются условия подключения ОПН к электроустановкам. Затем на примере РУ показывается как правильно рассчитать требуемое расстояние между ОПН и защищаемым аппаратом и показывается как расставлять ОПН на плане.

Примеры подключения ОПН к схеме РУ и их расстановки на плане показаны в п. 6.2 при выполнении РГР.

Практическое занятие № 6.

Определение длины защищенного подхода к ПС, электростанции.

Цель занятия: освоить методику выбора длины защищенного подхода к ПС, электростанции.

При проведении практического занятия необходимо установить связь между расположением ОПН на плане РУ и длиной защищаемого подхода. При

заданном расположении оборудования на ПС и конструктивном исполнении ВЛ показать как определяется длина защищенного подхода линии. При решении такой задачи целесообразно использовать результаты предыдущих занятий. Рассчитанная длина защищенного подхода сравнивается с рекомендованной для ВЛ рассмотренного класса напряжения [1]. Пример решения задачи такого типа показан в п. 6.2 в примере выполнения РГР.

Практическое занятие № 7.

Оценка надежности грозозащиты подстанции.

Цель занятия: научиться определять надежность грозозащиты подстанции и анализировать полученные результаты.

Вначале рассматривается случай отключения подстанции от прямых ударов молнии и определяется средняя повторяемость (в годах) опасных перенапряжений на ПС из-за грозовых разрядов непосредственно в РУ.

Затем исследуется случай отключения подстанции от набегающих волн перенапряжений и для него определяется средняя повторяемость (в годах) опасных перенапряжений от набегающих волн.

Найденные значения сравниваются с нормируемыми и делается вывод о надежности принятой грозозащиты. Это решение комплексной задачи. Такой пример также приведен в п. 6.2 РГР.

Практическое занятие № 8.

Обзор задач по всем темам.

В данном практическом занятии подводится итог в получении практических навыков по решению задач молниезащиты электроустановок, по оценке надежности грозозащиты ВЛ и подстанций. Систематизируются сведения по рассмотренным выше объектам изучения. Предлагается для реальной ПС и ВЛ рассмотреть ход выполнения комплексной оценки работы в грозовой сезон.

4. Лабораторные занятия

Согласно учебного плана предусмотрено проведение следующих семи лабораторных работ (ЛР):

ЛР № 1. Изучение конструкции и методов измерения сопротивлений элементов защитных аппаратов (на примере ОПН и РВ).

ЛР № 2. Измерение тока проводимости защитных аппаратов. Измерение пробивного напряжения вентильных разрядников.

ЛР № 3. Испытание средств защиты, используемых в электроустановках.

ЛР № 4. Испытания повышенным напряжением промышленной частоты высоковольтных электрических аппаратов.

ЛР № 5. Методы профилактических испытаний изоляции силового трансформатора. Измерения сопротивления постоянному току обмоток трансформатора.

ЛР № 6. Испытание силовых кабелей выпрямленным током.

ЛР № 7. Исследование волновых процессов при перенапряжениях. Перенапряжения при работе длиной линии на холостом ходу.

Все лабораторные работы и методические указания к ним подробно описаны в /26/, являющемся неотъемлемой частью УМКД данной дисциплины.

5. Самостоятельная работа студентов

5.1. График самостоятельной работы студентов

Номер и наименование темы	Номер лекции (Л), ПЗ	Содержание самостоятельной работы	Номер литературы	Объем в часах	Формы контроля СРС	Сроки контроля (номер учебной недели)
1	2	3	4	5	6	7
1. Введение	Л 1	Аварийность в электрических сетях. Характеристика электрических сетей.	11, 1,6	1	Блиц-опрос на лекции	2
2. Молния – как источник перенапряжений	Л 2	Интенсивность грозовой деятельности. Законы распределения токов молнии	1,15,27	1	Блиц-опрос на лекции	2
	ЛР 1	Подготовка к лабораторной работе	26	1	Защита лабораторной работы	3
	ПЗ 1	Подготовка к практическому занятию. Выполнение домашнего задания	1,15	1	Защита домашнего задания	4
3. Волновые процессы в ЛЭП	Л 3	эквивалентные схемы при волновых процессах. Вывод формул, описывающих закономерности распространения ЭМВ	1,15,17	1	Блиц-опрос на лекции	3
	Л 4	Индуктированные перенапряжения	1,15	1	Блиц-опрос на лекции	4
	ЛР 2	Подготовка к лабораторной работе	26	1	Защита лабораторной работы	5
	ПЗ 2	Подготовка к практическому занятию. Выполнение домашнего задания	1,27	1	Защита домашнего задания	6
4. Грозоупорность ВЛ	Л 5	Разрядные характеристики линейной изоляции	1,15,17	1	Блиц-опрос на лекции	4
	Л 6	Эксплуатационные показатели грозоупорности ВЛ	1,15,17	1	Блиц-опрос на лекции	5
5. Молниезащита станций и подстанций, ВЛ от прямых ударов молнии	Л 7	Конструктивные исполнения молниеотводов. Сетчатые молниеотводы	1,7	1	Блиц-опрос на лекции	6
	Л 8	Электрофизические характеристики грунта. Определения эквивалентного сопротивления неоднородного грунта	1,14	0,5	Блиц-опрос на лекции	6
	ЛР 3	Подготовка к лабораторной работе	26	1	Защита лабораторной работы	7
	ПЗ 3	Подготовка к практическому занятию. Выполнение домашнего задания	1,15	1	Защита домашнего задания	8
6. Защитные аппараты и их устройства	Л 9	История развития защитных аппаратов. Конструктивное исполнение	6,1,15	0,5	Блиц-опрос на лекции	7
	Л10	Определение ожидаемого срока службы ОПН	27	1	Блиц-опрос на лекции	8
7. Молниезащита ВЛ от перенапряжений	Л 11	Выбор средств защиты по критерию коммутационного ресурса линейных выключателей	27	1	Блиц-опрос на лекции	8
	ЛР 4	Подготовка к лабораторной работе	26	1	Защита лабораторной работы	9
	ПЗ 4	Подготовка к практическому занятию. Выполнение домашнего задания	1,15,22	1	Защита домашнего задания	10

1	2	3	4	5	6	7
8. Молниезащита станций и подстанций, электрических машин ВН от набегающих волн перенапряжений	Л 12	Параметры импульсов грозовых напряжений, набегающих на подстанцию	27	0,5	Блиц-опрос на лекции	9
	Л 13	Допустимые напряжения на защищаемый изоляции электрооборудования	26	0,5	Блиц-опрос на лекции	10
	Л 14	Эффективность защиты электрооборудования ПС	1,26	1	Блиц-опрос на лекции	10
	ЛР 5	Подготовка к лабораторной работе	27	1	Защита лабораторной работы	11
	ПЗ 5	Подготовка к практическому занятию. Выполнение домашнего задания	1,26	1	Защита домашнего задания	12
	Л 15	Координация изоляции защищаемого оборудования с защитными аппаратами	1,15,26	1	Блиц-опрос на лекции	11
9. Характеристика внутренних перенапряжений	Л 16	Статистические характеристики коммутационных перенапряжений	1,15,26	1	Блиц-опрос на лекции	12
10. Коммутационные перенапряжения и их ограничения	Л 17	Перенапряжения при коммутации ВЛ в блоке с силовым трансформатора	1,15	1	Блиц-опрос на лекции	12
	ЛР 6	Подготовка к лабораторной работе	26	1	Защита лабораторной работы	13
	ПЗ 6	Подготовка к практическому занятию. Выполнение домашнего задания	1,15	1	Защита домашнего задания	14
	Л 18	Дуговые перенапряжения	1,15,27	1	Блиц-опрос на лекции	13
	Л 19	Характеристика защит от коммутационных перенапряжений	1,15,27	1	Блиц-опрос на лекции	14
11. Квazистационарные перенапряжения	Л 20	Перенапряжения при неполнофазных режимах	1,17,27	1	Блиц-опрос на лекции	14
	ЛР 7	Подготовка к лабораторной работе	26	1	Защита лабораторной работы	15
	ПЗ 7	Подготовка к практическому занятию. Выполнение домашнего задания	1,15	1	Защита домашнего задания	15
	Л 21	Интергармоники в электропередачах. Характеристика защит от перенапряжений	1,15,27	1	Блиц-опрос на лекции	15
12. Методы профилактического контроля изоляции	Л 22	Методы бесконтактного контроля изоляции	1,15,27	1	Блиц-опрос на лекции	15
	Л 23	Схема установки для контроля изоляции повышенным напряжением	1,15,27	1	Блиц-опрос на лекции	15
	ПЗ 8	Подготовка к практическому занятию.	1,15,27	1	Выполнение самостоятельной работы	Экзамен

5.2. Методические указания по выполнению домашних заданий и контрольных работ.

Прежде чем приступить к выполнению СРС, домашних заданий необходимо изучить соответствующие теме теоретический материал и методы решения аналогичных задач, рассмотреть на практических занятиях или в литературе, рекомендуемой в таблице п 6.1. настоящего УМКД.

Методические указания к выполнению расчетно-графической работы.

РАСЧЕТНОЕ ЗАДАНИЕ

Защита открытого распределительного устройства (ОРУ) подстанции от прямых ударов молнии. Расчет контура заземления ОРУ

Исходные данные (табл. 1): номинальное напряжение ОРУ ($U_{ном}$); число ячеек ОРУ ($n_я$); число воздушных линий электропередачи в схеме ОРУ ($n_{вл}$); число ($n_{тр}$) и тип грозозащитных тросов на линиях; длина пролета линии ($l_п$); измеренное при средней влажности почвы удельное сопротивление грунта в районе расположения ОРУ ($\rho_{изм}$); число грозových часов за год в районе расположения подстанции ($n_ч$).

Задание на расчет

1. Используя исходные данные, а также данные табл.2, начертить план и боковой разрез ОРУ, определить его основные размеры.
2. На территории ОРУ расставить молниеотводы для защиты электрооборудования от прямых ударов молнии. Определить необходимое число молниеотводов и рассчитать их высоту. На плане и боковом разрезе ОРУ показать границы зоны защиты молниеотводов.
3. С учетом сопротивления заземления естественных заземлителей (системы трос-опора воздушных линий) определить допустимую величину стационарного сопротивления заземления контура заземления ОРУ.
4. Определить параметры контура заземления (длину и число вертикальных электродов, шаг сетки), обеспечивающие допустимую величину его стационарного сопротивления заземления.
5. Подсчитать импульсное сопротивление заземления контура во время грозового сезона.
6. Определить число повреждений в год изоляции электрооборудования ОРУ от прямых ударов молнии в молниеотводы. Оценить, находится ли в допустимых пределах показатель надежности (число лет безаварийной работы электрооборудования) молниезащиты ОРУ. Указать, какие мероприятия могут улучшить этот показатель.

Варианты расчетного задания

Таблица 1.

Вариант	$U_{НОМ}$, кВ	$n_{я}$	$n_{вл}$	$n_{тр}$	Тип троса	$l_{п}$, м	$\rho_{изм}$, Ом*м	$n_{ч}$, ч/ГОД
1.	110	14	7	1	C-50	200	150	45
2.	150	12	6	1	C-70	250	150	45
3.	220	10	4	2	C-85	300	150	45
4.	330	8	4	2	C-50	350	130	45
5.	110	7	4	1	C-85	220	130	40
6.	150	6	4	1	C-70	250	130	40
7.	220	12	7	2	C-50	220	160	40
8.	330	14	6	2	C-70	300	160	30
9.	110	10	5	1	C-85	200	160	30
10.	150	8	4	1	C-50	250	120	30
11.	220	6	4	2	C-70	300	120	50
12.	330	10	6	2	C-85	350	120	50
13.	110	7	4	1	C-50	200	140	50
14.	150	12	6	1	C-70	200	140	35
15.	220	8	4	2	C-50	250	140	35
16.	330	6	4	2	C-85	350	150	35
17.	110	10	5	1	C-70	180	150	50
18.	150	12	6	1	C-50	200	150	45
19.	220	14	7	2	C-70	250	160	40
20.	330	8	4	2	C-85	300	160	35
21.	110	6	4	1	C-50	200	160	30
22.	150	10	6	1	C-70	200	140	50
23.	220	7	4	2	C-50	220	140	35
24.	330	14	8	2	C-85	300	140	45
25.	110	8	4	1	C-70	180	130	40

Исходные данные

Данные примера

Номинальное напряжение: $U_{\text{НОМ}}$, кВ	220
Число ячеек: $n_{\text{я}}$	12
Число воздушных линий: $n_{\text{ВЛ}}$	5
Число грозозащитных тросов: $n_{\text{тр}}$	2
Тип грозозащитных тросов на линиях	С-70
Длина пролета линии: $l_{\text{п}}$, м	300
Удельное сопротивление грунта: $\rho_{\text{изм}}$, Ом·м	150
Число грозových часов за год: $n_{\text{ч}}$, ч/год	45

Указания к выполнению задания

По данным примера определяем:

размеры ячейки: ширина – 15,4 м,

длина – 70,5 м;

размеры ОРУ: ширина – $15,4 \cdot 12 = 184,8$ м,

длина – 70,5 м.

2. Выбрать место установки и высоту молниеотводов – они должны обеспечивать зону защиты на высоте шинных порталов по всей территории ОРУ, также должны быть защищены линейные порталы. Эффективность определенных указанным ниже способом зон защиты молниеотводов подтверждена длительным опытом эксплуатации и оценивается как 0,995.

Объекты высотой h_x , находящиеся внутри образуемого молниеотводами прямоугольника, защищены в том случае, если диагональ прямоугольника D удовлетворяет условию:

$$D \leq 8(h - h_x)p, \quad (1)$$

где h_x – высота защищаемого объекта, а внешняя часть зоны защиты определяется так же, как и зона защиты системы двух молниеотводов (рис. 4). В рассматриваемом примере молниеотводы целесообразно расположить на линейных порталах (рис.5).

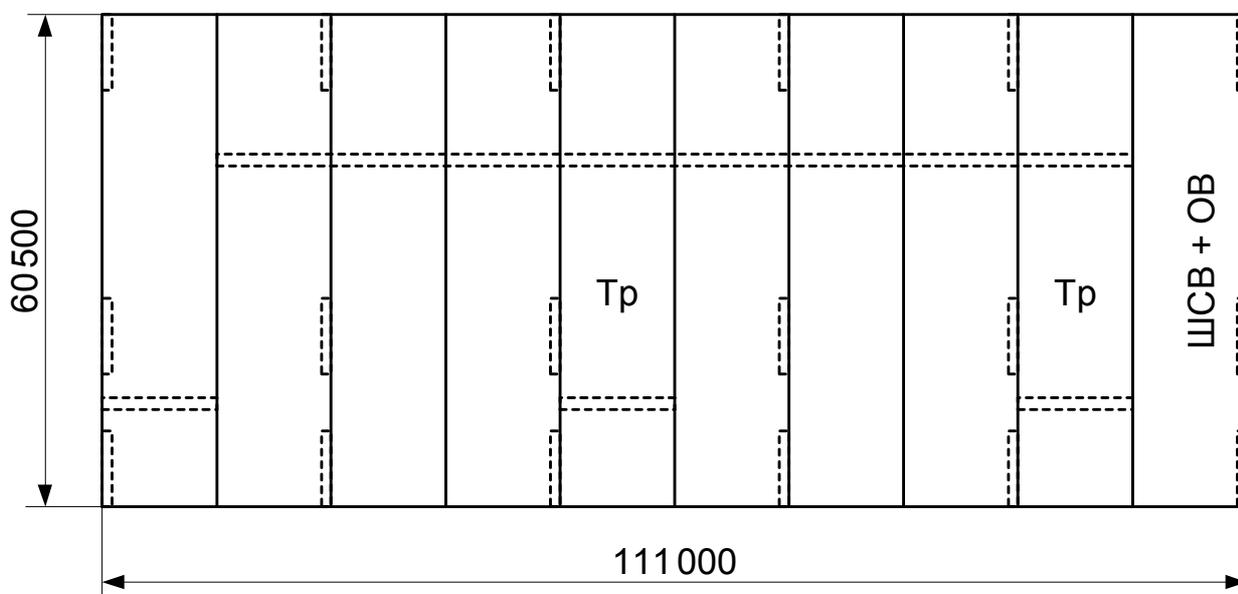


Рис.1 План открытого РУ220 кВ.

Таблица 2.

Размеры типового ОРУ выполненного по схеме: с двумя основными и третьей обходной системами шин

Размеры, м	Номинальное напряжение, кВ				
	110	150	220	330	500
А	8,0	11,5	11,75	18,0	29,0
Б	9,0	9,5	12,0	19,6	26,8
В	12,5	15,0	18,25	20,4	29,0
Г	10,5	16,0	20,5	31,5	45,0
Д	9,0	11,1	15,4	22,0	31,0
Е	2,5	3,0	4,0	8,0	11,0
Ж	2,0	2,55	3,7	4,0	5,5
З	7,5	8,0	11,0	11,0	14,5
И	11,0	13,0	16,5	16,5	23,6
к	3,0	4,25	4,0	4,5	6,0

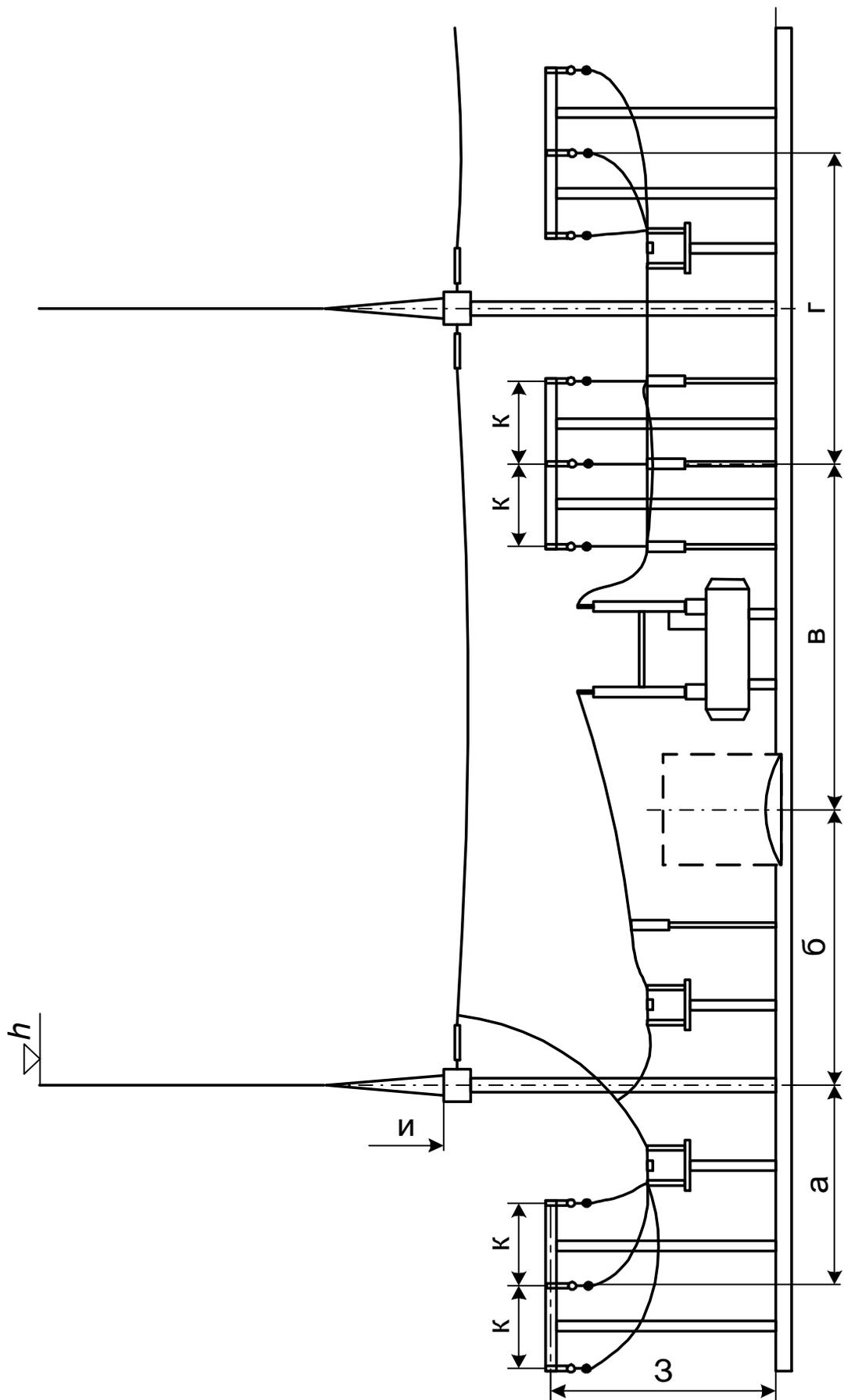


Рис.2. Поперечный разрез ячейки ОРУ 220 кВ по присоединению блока.

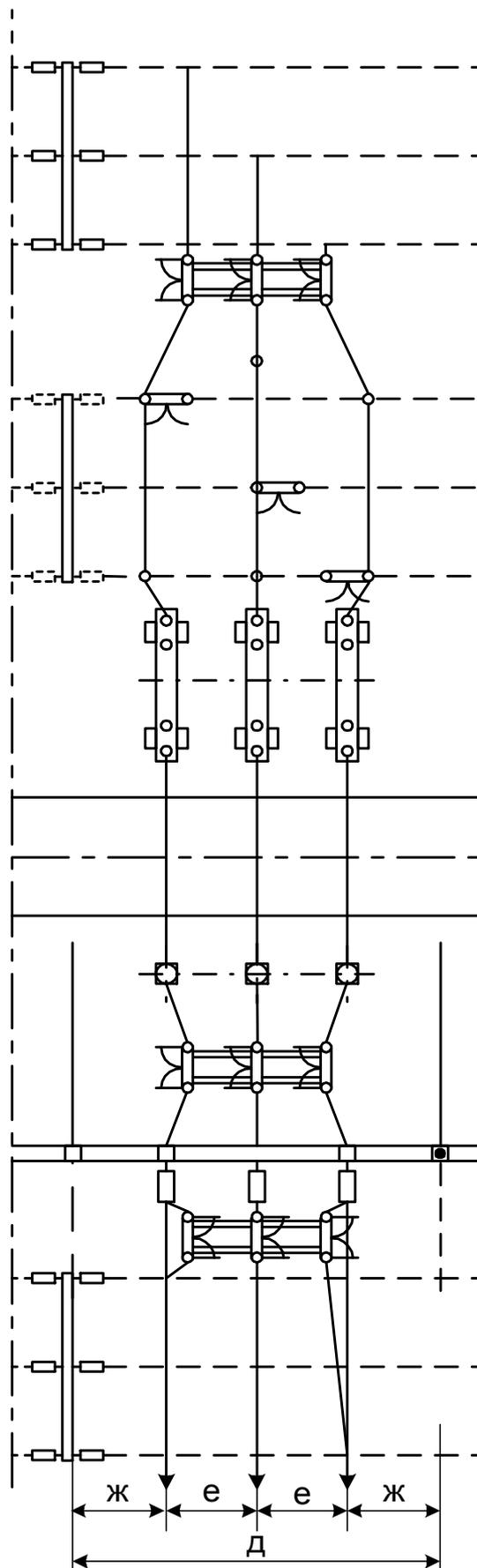


Рис.3. Схема заполнения ячейки ОРУ 220 кВ по отходящей линии.

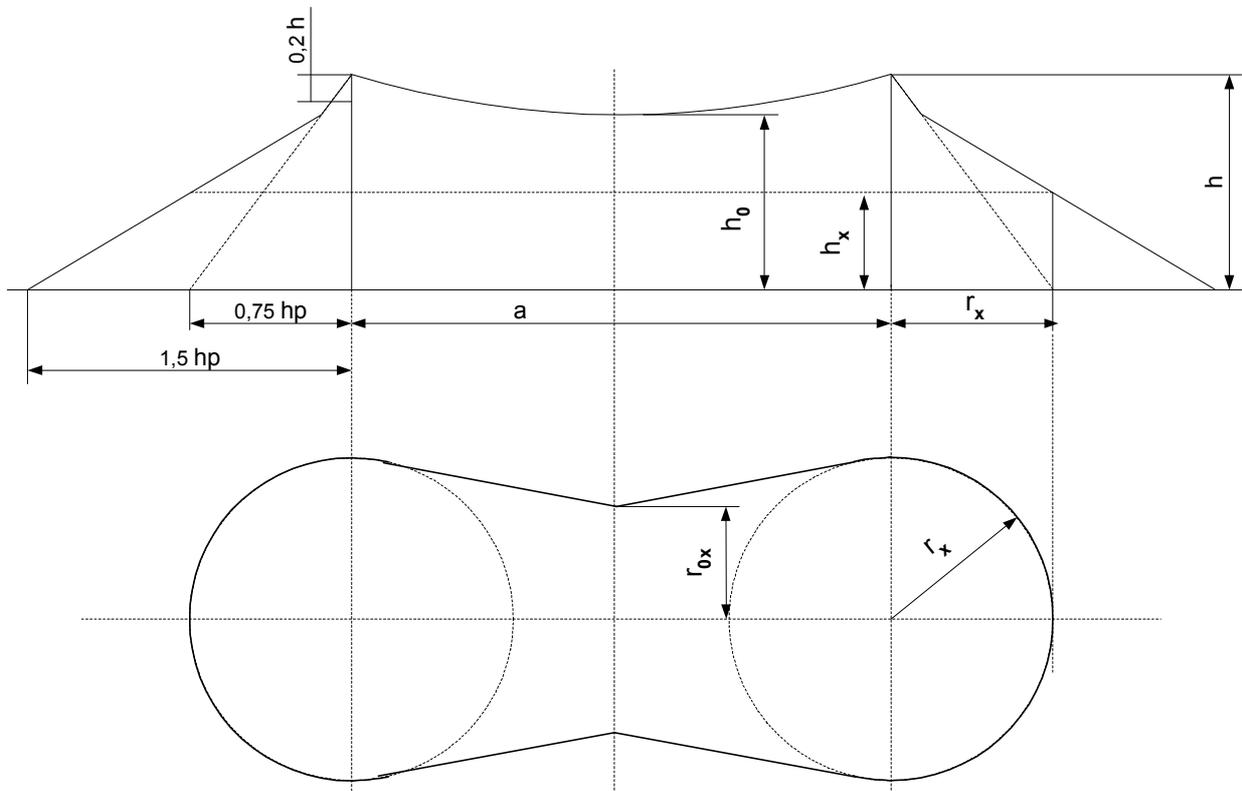


Рис. 4. Построение зоны защиты двух стержневых молниеотводов.

$$r_x = 1,6 p h \frac{h - h_x}{h + h_x} = 1,6 p \frac{h - h_x}{1 + h_x/h}, \quad (2)$$

$$h_0 = h - \frac{a}{7p}, \quad (3)$$

$$r_{0x} = 1,6 p \frac{h_0 - h_x}{1 + h_x/h_0}. \quad (4)$$

Для молниеотводов высотой 30 – 100 м вводится поправочный коэффициент p , учитывающий снижение защитного действия:

$$p = \sqrt{\frac{30}{h}}, \quad (5)$$

где h – высота молниеотвода, м. При $h \leq 30$ м $p = 1$.

Минимально необходимую высоту молниеотводов ОРУ можно определить из следующих условий:

Исходя из формулы (1), при $h_x = 16,5$ м (высота линейных порталов) и $p = 1$, высота молниеотводов составляет:

$$h = \frac{D}{8} + h_x = 73,7/8 + 16,5 = 25,7 \text{ м},$$

$$D = \sqrt{(n \cdot d)^2 + (b + e + z/2)^2} = \sqrt{(4 \cdot 15,4)^2 + (40,5)^2} = 73,7 \text{ м},$$

где n – количество ячеек между молниеотводами.

Исходя из формул (3,4), при $h_x = 11$ м (высота шинных порталов) и $p = 1$, высота молниеотводов составляет:

$$h_{0,2} = \frac{(h_x + 0,625r_{0x}) \pm \sqrt{(h_x + 0,625r_{0x})^2 + 2,5r_{0x}h_x}}{2}$$

$$h_{0_1} = 17.1 \text{ м}, \quad h_{0_2} = -2.4 \text{ м},$$

$$h = h_0 + \frac{a}{7p} = 17 + \frac{4 \cdot 15.4}{7 \cdot 1} = 25,8 \text{ м}$$

Из расчетов видно, что минимальная высота молниеотводов, обеспечивающая в рассматриваемом примере надежную защиту от ПУМ, должна составлять 25,8 м, но для удобства расчетов и увеличения надежности защиты примем высоту $h = 26$ м.

Зона защиты одиночного молниеотвода определяются на уровне:

шинных порталов $r_x = 1,6p \frac{h - h_x}{1 + h_x/h} = 1,6 \cdot 1 \cdot \frac{26 - 11}{1 + 11/26} = 17.1 \text{ м}$, линейных

порталов $r_x = 1,6p \frac{h - h_x}{1 + h_x/h} = 1,6 \cdot 1 \cdot \frac{28 - 13}{1 + 13/28} = 16,39 \text{ м}$.

Рассчитаем зону защиты молниеотводов 1-2; 2-3; 4-5; 5-6:

расстояние между молниеотводами: $a = 4 \cdot 15.4 = 61.6 \text{ м}$.

$$h_0 = h - \frac{a}{7p} = 26 - \frac{61.6}{7 \cdot 1} = 17.2 \text{ м},$$

на уровне шинных порталов: $h_x = 11 \text{ м}$,

$$r_{0x} = 1,6p \frac{h_0 - h_x}{1 + h_x/h_0} = 1,6 \cdot 1 \cdot \frac{17.2 - 11}{1 + 11/17.2} = 6 \text{ м},$$

на уровне линейных порталов: $h_x = 16,5 \text{ м}$,

$$r_{0x} = 1,6p \frac{h_0 - h_x}{1 + h_x/h_0} = 1,6 \cdot 1 \cdot \frac{17.2 - 16.5}{1 + 16.5/17.2} = 0,6 \text{ м},$$

Рассчитаем зону защиты молниеотводов 1-4; 2-5; 3-6:

расстояние между молниеотводами: $a = b + c + z/2 = 40.5 \text{ м}$.

$$h_0 = h - \frac{a}{7p} = 26 - \frac{40,5}{7 \cdot 1} = 20.2 \text{ м},$$

на уровне шинных порталов: $h_x = 11 \text{ м}$,

$$r_{0,x} = 1,6p \frac{h_0 - h_x}{1 + h_x/h_0} = 1,6 \cdot 1 \cdot \frac{20,2 - 11}{1 + 11/20,2} = 9,5 \text{ м,}$$

на уровне линейных порталов: $h_x = 16,5$ м,

$$r_{0,x} = 1,6p \frac{h_0 - h_x}{1 + h_x/h_0} = 1,6 \cdot 1 \cdot \frac{20,2 - 16,5}{1 + 16,5/20,2} = 3,2 \text{ м.}$$

3. Осуществить расчет сопротивления заземляющего устройства и сопротивления заземления естественных заземлителей. Согласно требованию ПУЭ сопротивление заземлителя опоры, при удельном сопротивлении грунта $100 < \rho_1 < 500$ Ом·м, в любое время года должно быть $R_{оп} \leq 15$ Ом.

Расчетное значение удельного сопротивления для слоя сезонных изменений:

$$\rho_{расч} = \rho_{изм} \cdot K_c, \quad (6)$$

где K_c - сезонный коэффициент.

В табл.3 приведены значения K_c для средней полосы России (II климатическая зона) при толщине слоя сезонных изменений $H_c = 2$ м в условиях зимы (для расчета рабочих и защитных заземлителей) и в условиях грозового сезона “лето” (для расчета заземлений грозозащиты).

Таблица 3.

Значения сезонного коэффициента K_c

Заземление	Влажность почвы перед измерением		
	повышенная	средняя	пониженная
Рабочее и защитное	5	2,7	1,9
Грозозащиты	2,6	1,4	–

Таким образом, для рассматриваемого примера расчетное значение удельного сопротивления – летом

$$\rho_{расч} = \rho_{изм} \cdot K_c = 150 \cdot 1,4 = 210 \text{ Ом·м,}$$

зимой

$$\rho_{расч} = \rho_{изм} \cdot K_c = 150 \cdot 2,7 = 405 \text{ Ом·м.}$$

В целях улучшения растекания тока, заземлители закладываются в грунт на глубину 0,5 – 1 м и более (для вертикальных заземлителей это глубина закладки верхней кромки), т.к. на глубине грунт в меньшей степени подвержен высыханию в жаркие летние месяцы года.

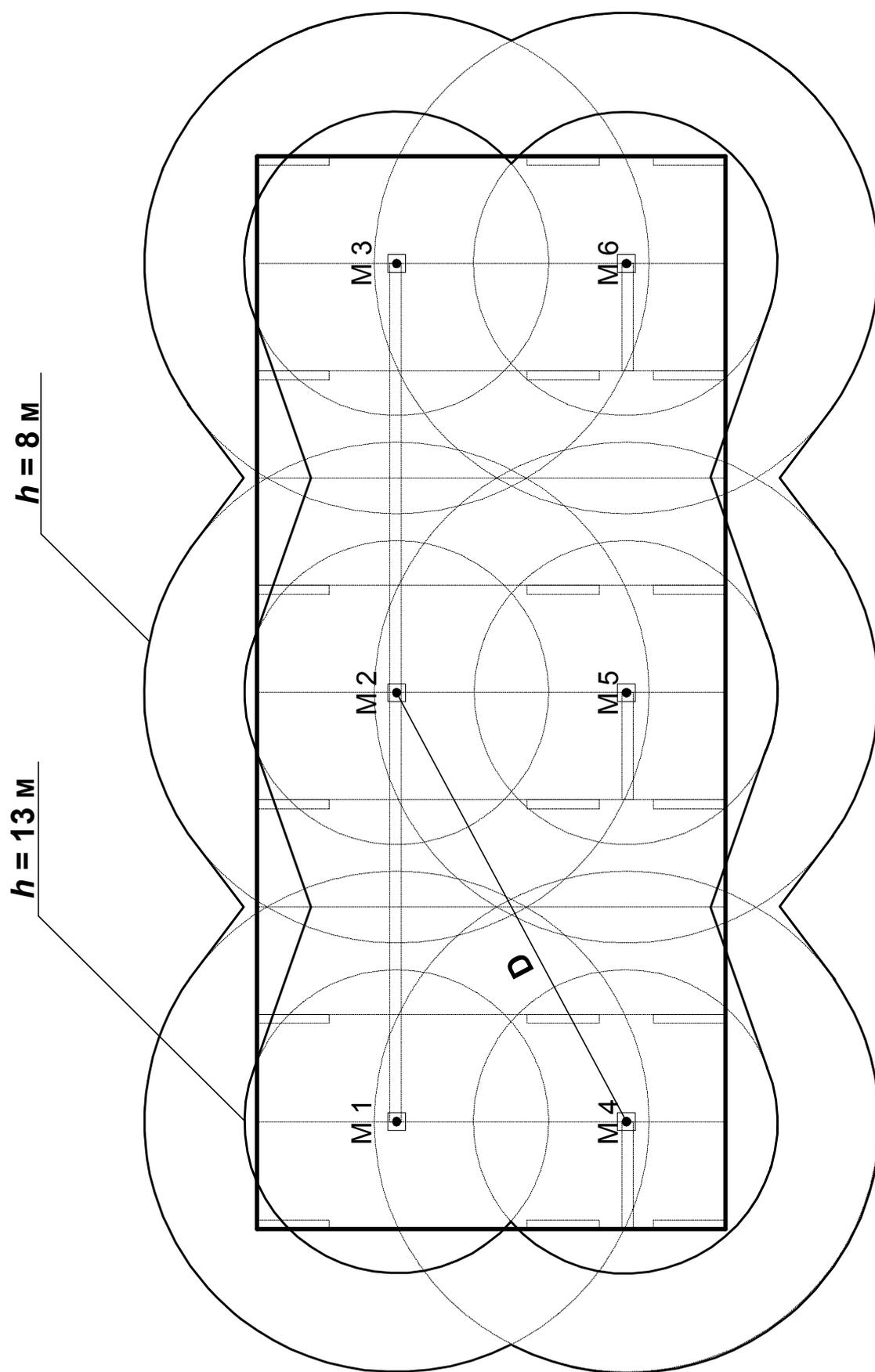


Рис.5 Зона защиты ОРУ 220 кВ на высоте $h_x = 11$ и $16,5 \text{ м}$.

Следует выбрать заземлитель опоры в виде 2-х горизонтальных лучей и 3-х вертикальных электродов длиной 5 м и диаметром 20 мм (см. рис. 6).

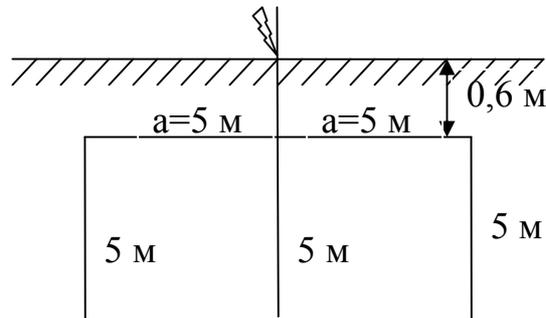


Рис. 6. Сечение n-лучевого заземлителя опоры с вертикальными электродами

Сопротивление n-лучевого заземлителя с вертикальными электродами рассчитывается по формуле

$$R_{\text{оп}} = A \cdot \Delta \mathcal{B} \cdot \frac{\rho_3}{l_{\text{л}}}, \quad (7)$$

где A – коэффициент подобия зависящий от числа лучей и диаметра к длине,

$\Delta \mathcal{B}$ – коэффициент зависящий от отношений $\frac{a}{l_{\text{в}}}$ и $\frac{l_{\text{в}}}{n_{\text{л}} \cdot l_{\text{л}}}$, которые

выбираются из [2, стр. 66]:

$$\frac{a}{l_{\text{в}}} = \frac{5}{5} = 1; \quad \frac{d_{\text{л}}}{l_{\text{л}}} = \frac{20 \cdot 10^{-3}}{5} = 4 \cdot 10^{-3}; \quad n_{\text{л}} = 2 \Rightarrow A = 0,75 \text{ (рис.3-13),}$$

$$\frac{l_{\text{в}}}{n_{\text{л}} \cdot l_{\text{л}}} = \frac{5}{2 \cdot 5} = 0,5; \quad \frac{a}{l_{\text{в}}} = \frac{5}{5} = 1 \Rightarrow \Delta \mathcal{B} = 0,42 \text{ (рис.3-16).}$$

Расчет сопротивления заземлителей в двухслойном грунте ведется по соответствующим расчетным эквивалентным сопротивлениям ρ_3 , при которых R имеет ту же величину, что и не в однородном грунте. При этом ρ зависит от соотношения ρ_1 и ρ_2 , глубины границы их раздела, а также глубины распространения электрического поля заземлителя, которое определяется размерами и формой заземлителя:

$$\frac{\rho_3}{\rho_2} = f\left(\frac{H_c - h}{l_{\text{в}}}, \frac{\rho_1}{\rho_2}\right) \text{ [2, рис. 3-14];} \quad \frac{H_c - h}{l_{\text{в}}} = \frac{2 - 0,6}{5} = 0,28;$$

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = 1,4 \Rightarrow \frac{\rho_3}{\rho_2} = 1,1 \Rightarrow \rho_3 = 1,1 \cdot \rho_{\text{изм}} = 1,1 \cdot 150 = 165 \text{ Ом}\cdot\text{м (лето)},$$

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = 2,7 \Rightarrow \frac{\rho_3}{\rho_2} = 1,2 \Rightarrow \rho_3 = 1,2 \cdot \rho_{\text{изм}} = 1,2 \cdot 150 = 180 \text{ Ом}\cdot\text{м (зима)}.$$

Тогда для лета $R_{\text{оп}} = 0,75 \cdot 0,42 \cdot \frac{165}{5} = 10,4 < R_{\text{оп доп}} = 15 \text{ Ом},$

для зимы - $R_{\text{оп}} = 0,75 \cdot 0,42 \cdot \frac{180}{5} = 11,34 < R_{\text{оп доп}} = 15 \text{ Ом}.$

Расчет сопротивления петли «трос – опора» осуществляется по формуле

$$R_{\text{тр-оп}} = \sqrt{\frac{1}{n_{\text{тр}}} \cdot R_{\text{оп}} \cdot l_{\text{пр}} \cdot R_{\text{тр уд}}}, \quad (8)$$

где $R_{\text{оп}}$ – сопротивление заземления опоры,

$l_{\text{пр}} = 0,25 \text{ км}$ – длина пролета линии,

$R_{\text{тр уд}} = 1,9 \text{ Ом/км}$ – удельное сопротивление троса С – 70 (табл. 4),

$n_{\text{тр}} = 2$ – число грозозащитных тросов на линиях.

Соответственно

для лета $R_{\text{тр-оп}} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot 1,9 \cdot 0,15 \cdot 10,4} = 1,2 \text{ Ом},$

для зимы $R_{\text{тр-оп}} = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot 1,9 \cdot 0,15 \cdot 11,34} = 1 \text{ Ом}.$

Сопротивление естественных заземлителей:

$$R_{\text{ест}} = \frac{R_{\text{тр-оп}}}{n_{\text{вл}}}, \quad (9)$$

для лета: $R_{\text{ест}} = \frac{R_{\text{тр-оп}}}{n_{\text{вл}}} = \frac{1,2}{4} = 0,3 < 0,5 \text{ Ом},$

для зимы: $R_{\text{ест}} = \frac{R_{\text{тр-оп}}}{n_{\text{вл}}} = \frac{1}{4} = 0,25 < 0,5 \text{ Ом}.$

Таблица 4. Удельные сопротивления тросов

Тип троса	С – 50	С – 70	С – 85
$R_{\text{тр уд}}, \text{ Ом/км}$	3,7	2,4	1,9

4. Выполнить расчет заземляющего устройства и сопротивления заземления искусственных заземлителей. При достаточной густоте сетки, что характерно для современных подстанций, R практически не зависит от диаметра и глубины укладки электродов и подсчитывается по эмпирической формуле

$$R_{\text{иск}} = \rho_3 \left(\frac{A}{\sqrt{S}} + \frac{1}{L + n \cdot l_B} \right). \quad (11)$$

Длину вертикальных электродов рекомендуется брать в пределах 3–10 м. Устанавливаются они по периметру контура заземления в узлах сетки. Шаг сетки контура заземления рекомендуется принимать в пределах 5 – 10 м.

Горизонтальные электроды прокладываются на глубине 0,7 м. по периметру ОРУ и между ячейками,

Длина горизонтальных электродов $L = 2 \cdot 184 + 11 \cdot 70.5 = 1143$ м,

$\sqrt{S} = \sqrt{70.5 \cdot 184} = 114$ где S – площадь, занимаемая ОРУ,

$$\rho_3 = K_c \cdot \rho_{\text{изм}} = 1,4 \cdot 150 = 210 \text{ Ом} \cdot \text{м},$$

$$\frac{l_B}{\sqrt{S}} = 0 \Rightarrow A = 0,44 \text{ [Л-2]}, \text{ где } l_B \text{ – длина вертикальных электродов, в}$$

этом случае

$$R_{\text{иск}} = \rho_3 \left(\frac{A}{\sqrt{S}} + \frac{1}{L + n \cdot l_B} \right) = 210 \cdot \left(\frac{0,44}{114} + \frac{1}{1143} \right) = 0.81 \text{ Ом}.$$

Стационарное сопротивление заземления подстанции

$$R_{\text{стац}} = \frac{R_{\text{ест}} \cdot R_{\text{иск}}}{R_{\text{ест}} + R_{\text{иск}}} = \frac{0,3 \cdot 0.81}{0,3 + 0.81} = 0,23 < 0,5 \text{ Ом}.$$

5. Определить импульсное сопротивление заземляющего контура во время грозового сезона $Z_{\text{и}} = \alpha_{\text{и}} \cdot R_{\text{иск}}$, (12)

где $\alpha_{\text{и}}$ – импульсный коэффициент, который рассчитывается по формуле:

$$\alpha_{\text{и}} = \sqrt{\frac{1500 \cdot \sqrt{S}}{(\rho_3 + 320) \cdot (I_M + 45)}} = \sqrt{\frac{1500 \cdot 114}{(210 + 320) \cdot (15 + 45)}} = 2.2, \quad (13)$$

где $I_M = 15$ кА – среднестатистическое значение тока молнии для РТ.

$$Z_{\text{и}} = \alpha_{\text{и}} \cdot R_{\text{иск}} = 2.2 \cdot 0.81 = 1.8 \text{ Ом}.$$

6. Определение грозоупорности подстанции производится по ожидаемому числу лет безаварийной работы M . В настоящее время в качестве критерия эффективности защиты подстанции от грозовых перенапряжений

принимается значение M , на порядок превосходящее расчетный срок эксплуатации оборудования подстанции (у трансформатора ~ 25 лет) и измеряющееся сотнями лет -

$$M = \frac{1}{\beta_1 + \beta_2 + \beta_3}, \quad (14)$$

где β_1 – коэффициент, учитывающий вероятность прорыва молнии в зону защиты молниеотводов $P_{\text{прор}} = 0,005$ (зона защиты молниеотводов рассчитывается с надежностью 0,995).

β_3 – коэффициент, учитывающий вероятность отключения подстанции из-за набегающих с ЛЭП волн грозовых перенапряжений, $\beta_3 = 0$ т.к. считается, что установленные на подстанции защитные аппараты (ОПН, РВ, РТ) обеспечивают 100% защиту от набегающих с ЛЭП волн грозовых перенапряжений.

β_2 – коэффициент, учитывающий вероятность отключения подстанции из-за перекрытия с молниеотвода на ошиновку при протекании тока молнии через молниеотвод при прямом ударе молнии в молниеотвод.

$$\beta_2 = N_{\text{уд}} \cdot P_{\text{откл}}, \quad (15)$$

где $P_{\text{откл}}$ – вероятность отключения подстанции.

В свою очередь вероятность отключения подстанции определяется как

$$P_{\text{откл}} = P_{\text{пер}} \cdot P_{\text{к.з.}} \quad (16)$$

где $P_{\text{к.з.}}$ – вероятность того, что возникшее перекрытие перейдет в устойчивое короткое замыкание $P_{\text{к.з.}} = 0,7$,

$P_{\text{пер}}$ – вероятность перекрытия, определяется как вероятность появления критического тока молнии со значением:

$$I_{\text{м}} = \frac{U_{50\%}}{Z_{\text{и}} \cdot \delta \cdot h_{\text{п}}}, \quad (17)$$

где $\delta = 0,3$ – для линии с одним тросом,
 $\delta = 0,15$ – для линии с двумя тросами,
 $h_{\text{п}}$ – высота линейного портала,

$U_{50\%}$ – 50% импульсное разрядное напряжение для гирлянды изоляторов определяется, исходя из числа изоляторов в гирлянде.

В соответствии с примером степень загрязненности атмосферы – I, тогда эффективная удельная длина пути утечки для РУ 150 кВ:

$$\lambda_{эф} = 1,5 \text{ см/кВ}, \quad [\text{Л-1, табл.6-2.}]$$

В этом случае следует выбрать изолятор ПС 6 – А имеющий следующие параметры [Л-1, табл.6-1]:

$H = 130$ мм – строительная высота изолятора,

$D = 255$ мм – диаметр тарелки изолятора,

$L_y = 255$ мм – геометрическая длина пути утечки,

$K = 1$ – поправочный коэффициент.

Число изоляторов в гирлянде определяется по формуле

$$n = \frac{K \cdot \lambda_{эф} \cdot U_{наиб. раб.}}{L_y} + 1 = \frac{1 \cdot 1,5 \cdot 235}{25,5} = 13,8 \text{ ,} \quad (18)$$

В этом случае число изоляторов в гирлянде выбирается равным 14 шт.

Длина гирлянды составляет: $l_r = H \cdot n = 0,13 \cdot 14 = 1,82$ м,

по рис. 6-8 [Л-1] определяем $U_{50\%} = 1100$ кВ.

Критический ток молнии в этом случае определяется как

$$I_M = \frac{U_{50\%}}{Z_{и} \cdot \delta \cdot h_{и}} = \frac{1100}{1,8 \cdot 0,15 \cdot 16,5} = 247 \text{ кА}. \quad (19)$$

Вероятность появления такого тока молнии определяется как вероятность импульсного перекрытия линейной изоляции

$$P(I_M) = e^{\frac{-I_M}{26}} = e^{\frac{-8247}{26}} = 0,00007, \quad (20)$$

$$P_{откл} = P_{пер} \cdot P_{к.з.} = 0,00007 \cdot 0,7 = 0,00005.$$

Число ударов молнии в молниеотводы ОРУ в год, при средней грозовой деятельности 30 ч/год:

$$N_{уд} = [(A + 7h) \cdot (B + 7h)] \cdot 6,7 \cdot n_{ч} \cdot 10^{-8}, \quad (21)$$

где A и B – длина и ширина подстанции,

h – наибольшая высота молниеотвода,

$$N_{\text{уд}} = [(184 + 7 \cdot 26)(70,5 + 7 \cdot 26)] \cdot 6,7 \cdot 45 \cdot 10^{-8} = 0,29 \text{ уд/год.}$$

При этих значениях

$$\beta_2 = N_{\text{уд}} \cdot P_{\text{откл}} = 0,29 \cdot 0,00005 = 0,000014 ,$$

$$\beta_1 = N_{\text{уд}} \cdot P_{\text{прор}} = 0,29 \cdot 0,005 = 0,0014 .$$

Ожидаемое число лет безаварийной работы:

$$M = \frac{1}{\beta_1 + \beta_2 + \beta_3} = \frac{1}{0,0014 + 0,000014 + 0} = 707 \text{ года.}$$

Вывод: Из расчетов видно, что выбранное количество и месторасположение молниеотводов, является необходимым и достаточным условием надежной защиты ОРУ от ПУМ. Расчеты также показали, что ожидаемое число лет безаварийной работы – 707 года является хорошим показателем грозоупорности подстанции.

Л и т е р а т у р а

Основная

1. Ларионов В. П. Основы молниезащиты. – М.: Знак, 1999.
2. Ларионов В.П. Аронов М.А. Молниезащита в электроэнергетике. – М.: Знак, 1999.
3. Правила устройства электроустановок / Минэнерго СССР. – 6-е изд., перераб. и доп., с изменен. – М.: Главгосэнергонадзор России, 1998.
4. Электротехнический справочник, т. 3, кн. 1, под общ. ред. профессоров МЭИ: И.Н. Орлова (гл. ред.) и др. – 7-е изд., испр. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1988.

Дополнительная

5. Техника высоких напряжений. / Под общей редакцией Д. В. Разевига. – Изд. 2-е. – М.: Энергия, 1976.
6. Рябкова Е. Я., Заземление в установках высокого напряжения. – М.: Энергия, 1978.
7. Двоскин Л. И., Схемы и конструкции распределительных устройств. – М.: Энергия, 1974.
8. Долгинов А. И., Техника высоких напряжений в энергетике. – М.: Энергия, 1968.
9. Околович М. Н. Проектирование электрических станций. – М.: Энергоиздат, 1982.

Расчетное задание

Защита открытого распределительного устройства (ОРУ) подстанции от прямых ударов молнии. Расчет контура заземления ОРУ

Исходные данные (табл. 1): номинальное напряжение ОРУ ($U_{\text{ном}}$); число ячеек ОРУ ($n_{\text{я}}$); число воздушных линий электропередачи в схеме ОРУ ($n_{\text{вл}}$); сечение ВЛ (S); состав грунта первого/второго слоя (R); толщина первого слоя грунта (h_1); климатическая зона (N); ток молнии (I_m); ток короткого замыкания ($I_{\text{кз}}$); время срабатывания защиты ($t_{\text{с.з.}}$).

Задание на расчет

1. Оценить грозоупорность ВЛ на защищенном подходе.
2. Используя исходные данные, начертить план и боковой разрез ОРУ, определить его основные размеры.
3. Определить параметры контура заземления (длину и число вертикальных электродов, шаг сетки), обеспечивающие допустимую величину его стационарного сопротивления заземления.
4. С учетом сопротивления заземления естественных заземлителей (системы трос-опора воздушных линий) определить допустимую величину стационарного сопротивления заземления контура заземления ОРУ.
5. Подсчитать импульсное сопротивление заземления контура во время грозового сезона.
6. На территории ОРУ расставить молниеотводы для защиты электрооборудования от прямых ударов молнии. Определить необходимое число молниеотводов и выбрать их высоту. На плане и боковом разрезе ОРУ показать границы зоны защиты молниеотводов.
7. Оценить грозоупорность ОРУ.

Варианты расчетного задания

Таблица 1.

№	$U_{\text{НОМ}},$ кВ	$n_{\text{я}}$	$n_{\text{вл}}$	N	$S_{\text{,2}}$ мм ²	$h_{\text{л}},$ м	$I_{\text{кз}},$ кА	$I_{\text{моль}},$ кА	$t_{\text{с.з.}},$ с.	R
1	110	7	4	1	95	0,35	10	45	0,1	1
2	110	9	6	2	95	0,4	12	45	0,15	1
3	220	5	3	3	240	0,45	14	45	0,2	1
4	220	6	3	1	2*240	0,5	16	45	0,25	1
5	110	3	2	2	120	0,55	18	40	0,3	1
6	110	2	2	3	185	0,6	20	40	0,12	2
7	220	7	4	1	300	0,65	10	40	0,17	2
8	330	3	3	2	2*300	0,7	12	40	0,22	2
9	110	3	2	3	95	0,75	14	50	0,27	2
10	220	5	2	1	240	0,8	16	50	0,33	2
11	220	6	3	2	300	0,85	18	50	0,1	3
12	330	2	2	3	2*300	0,9	20	50	0,15	3
13	110	2	2	1	120	0,95	10	55	0,2	3
14	110	9	6	2	150	0,35	12	55	0,25	3
15	220	5	3	3	240	0,4	14	55	0,3	3
16	330	4	2	1	2*240	0,45	16	55	0,12	4
17	330	4	2	2	2*300	0,5	18	55	0,17	4
18	220	5	3	3	240	0,55	20	60	0,22	4
19	220	6	4	1	300	0,6	10	60	0,27	4
20	330	3	2	2	2*240	0,65	12	60	0,33	4

Грунт: 1 – пески водоносные/скальный грунт; 2 – пески с примесью глины (3%) не водоносные/глина; 3 – почва/супеси водоносные; 4 – глина/супеси не водоносные.

Варианты схем:

- 1- 4, 7, 14, 15 – две системы сборных шин с обходной;
- 5, 9 – мостик;
- 6, 13 – двоянный блок линия трансформатор;
- 8, 12, 20 – схема три вторых;
- 10, 18, 11, 19 – одна система сборных шин с обходной;
- 16, 17 – четырехугольник.

$t := 7 \cdot 10^{-6}$ время перекрытия изоляции, (сек).

$k_{\text{констр}} := 2.2$ коэф. учитывающий разницу в конструкции изоляторов (т.к. чистая атмосфера).

$k_E := 1$ коэф. учитывающий снижение градиента разрядного напряжения с увеличением длины гирлянды.

$$U_{50\%} := 340 \cdot k_{\text{констр}} \cdot k_E \cdot L_{\text{разр}} \cdot \left(1 + \frac{15}{t + 9.5}\right) \quad U_{50\%} = 1959.917 \text{ В}$$

$R_{\text{и}} := 0.5$ ипульсное сопротивление заземлителя, (Ом).

$\delta := 0.3$ для одного троса.

$h_{\text{опоры}} := 25$ высота опоры (стальная, одноцепная, башенного типа), (м).

Крутизна тока молнии:

$$I_{\text{кр}} := \frac{U_{50\%}}{R_{\text{и}} + \delta \cdot h_{\text{опоры}}} \quad I_{\text{кр}} = 244.99$$

Вероятность перекрытия лин. изоляции:

$$P_{\text{опоры}} := e^{-0.04 \cdot I_{\text{кр}}} \quad P_{\text{опоры}} = 0.00006$$

$P_{\text{АПВ}} := 0.75$ вероятность успешной работы АПВ (т.к. $U=110$ кВ).

$h_{\text{тр}} := 25$ высота подвеса троса (м).

$L_{\text{прол}} := 300$ длина пролета (м).

$N_{\text{гроз.деят}} := 30$ число грозových часов.

Плотность разрядов молнии на землю:

$$p_0 := 0.05 \cdot N_{\text{гроз.деят}} \quad p_0 = 1.5$$

$d_{\text{тр_тр}} := 0$ расстояние между системой "трос-трос" (равно 0, т.к. 1 трос).

$h_{\text{ср}} := 25$ средняя высота подвеса провода (м).

Общее число ударов олии на 100 км длины линии:

$$N := 0.2 \cdot p_0 \cdot \left(\frac{d_{\text{тр_тр}}}{2} + 5 \cdot h_{\text{ср}} - \frac{2 \cdot h_{\text{ср}}^2}{30} \right) \quad N = 25$$

Число ударов в опру:

$$N_{\text{оп}} := 4 \cdot N \cdot \frac{h_{\text{тр}}}{L_{\text{прол}}} \quad N_{\text{оп}} = 8.333$$

Удельное число грозových отключений от обратных перекрытий линейной изоляции при ударе молнии опоры:

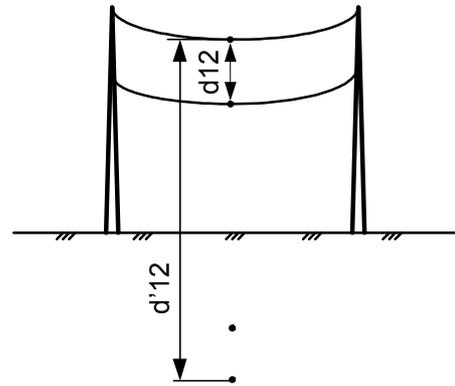
$$n_{\text{оп}} := N_{\text{оп}} \cdot P_{\text{опоры}} \cdot \eta \cdot (1 - P_{\text{АПВ}}) \quad n_{\text{оп}} = 0.00012$$

2. Удар молнии в трос в середине пролета.

$E_{\text{ср}} := 21$ средняя напряженность поля (отр. полярность), (кВ/см).

$h_{\text{тр}} := 2500$ высота подвеса троса, (см).

$r := 0.6$ радиус, (см).



$$\beta := 1.16 \cdot \sqrt{\frac{\ln\left(\frac{15 \cdot h_{\text{тр}} \cdot E_{\text{ср}}}{U_{\text{дл.доп}}}\right)}{\ln\left(\frac{2 \cdot h_{\text{тр}}}{r}\right)}}$$

$$\beta = 1.141$$

$h_{\Gamma} := 6$ наименьшее допустимое расстояние от провода до земли в середине пролета, (м).

$h_{\text{пр}} := 23$ высота подвеса провода, (м).

$h_{\text{тр}} := 25$ высота подвеса троса, (м).

$r := 0.006$ радиус, (м).

стрела провеса, (м):

$$f_{\text{тр}} := h_{\text{тр}} - h_{\Gamma} - (23 - 19) - 2$$

$$f_{\text{тр}} = 13$$

средняя высота подвеса троса, (м).

$$h_{\text{ср.тр}} := h_{\text{тр}} - \frac{2}{3} \cdot f_{\text{тр}}$$

$$h_{\text{ср.тр}} = 16.333$$

$$d'_{12} := 2 \cdot 16.333$$

$$d_{12} := 2$$

$$z_{11} := 60 \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot h_{\text{ср.тр}}}{r}\right)$$

$$z_{11} = 516.141$$

$$z_{12} := 60 \cdot \ln\left(\frac{d'_{12}}{d_{12}}\right)$$

$$z_{12} = 167.591$$

волновое сопротивление троса, рассчитанное по геометрическим параметрам линии:

$$z_{\text{тр.г}} := \frac{z_{11} + z_{12}}{2}$$

$$z_{\text{тр.г}} = 341.866$$

волновое сопротивление коронирующей линии:

$$z_{\text{тр.к}} := z_{\text{тр.г}} \cdot \beta$$

$$z_{\text{тр.к}} = 390.195$$

расстояние между тросом и верхним проводом, (м):

$$\Delta h := h_{\text{тр}} - h_{\text{пр}}$$

$$\Delta h = 2$$

$$v := 3 \cdot 10^8 \quad \text{скорость распространения волны, (м/мксек).}$$

$$E_{\text{расч.ср}} := 750 \quad \text{средняя напряженность поля, кВ/м.}$$

$$k_{\Gamma} := \frac{z_{12}}{z_{11}}$$

$$k_{\Gamma} = 0.325$$

$$K_k := k_{\Gamma} \cdot \frac{z_{\text{тр.г}}}{z_{\text{тр.к}}}$$

$$K_k = 0.284$$

Критическая крутизна фронта тока молнии, при котором происходит перекрытие изоляции:

$$a_{\text{кр}} := \frac{2 \cdot E_{\text{расч.ср}} \cdot \Delta h \cdot v}{z_{\text{тр.к}} \cdot (1 - K_k) \cdot L_{\text{прол}}}$$

$$a_{\text{кр}} = 10.745$$

Вероятность перекрытия изоляции при ударе молнии в трос в середине пролета:

$$P_{\text{тр}} := e^{-0.08 \cdot a_{\text{кр}}}$$

$$P_{\text{тр}} = 0.42332$$

Число ударов молнии в трос:

$$N_{\text{тр}} := N \cdot \left(1 - \frac{4 \cdot h_{\text{тр}}}{L_{\text{прол}}} \right)$$

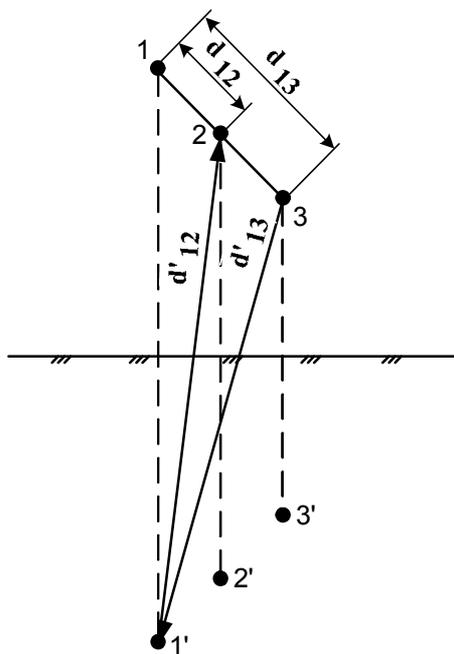
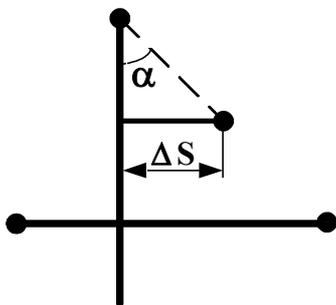
$$N_{\text{тр}} = 16.667$$

Ожидаемое удельное число грозовых отключений ВЛ из-за ударов молнии в трос в середине пролета:

$$n_{\text{тр}} := N_{\text{тр}} \cdot P_{\text{тр}} \cdot \eta$$

$$n_{\text{тр}} = 7.055$$

3. Удар молнии в провод при прорыве сквозь тросовую защиту.



$$d_{12} := \sqrt{2^2 + 2.1^2} \quad d_{12} = 2.9$$

$$d_{13} := \sqrt{6^2 + 4.2^2} \quad d_{13} = 7.324$$

$$d'_{12} := \sqrt{25^2 - 2.9^2} \quad d'_{12} = 24.831$$

$$d'_{13} := \sqrt{25^2 - 7.3^2} \quad d'_{13} = 23.91$$

$h_r := 6$ наименьшее допустимое расстояние от провода до земли в середине пролета, (м).

$h_{np} := 19$ высота подвеса нижнего провода, (м).

$h_{rp} := 25$ высота подвеса троса, (м).

$r := 0.006$ радиус, (м).

стрела провеса, (м):

$$f_{np} := h_{np} - h_r \quad f_{np} = 13$$

средняя высота подвеса троса, (м):

$$h_{ср.пp} := h_{np} - \frac{2}{3} \cdot f_{np} \quad h_{ср.пp} = 10.333$$

$$z_{11} := 60 \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot h_{ср.пp}}{r} \right) \quad z_{11} = 488.671$$

$$z_{12} := 60 \cdot \ln \left(\frac{d'_{12}}{d_{12}} \right) \quad z_{12} = 128.843$$

$$z_{13} := 60 \cdot \ln \left(\frac{d'_{13}}{d_{13}} \right) \quad z_{13} = 70.99$$

волновое сопротивление провода, рассчитанное по геометрическим параметрам линии:

$$z_{np.r} := \frac{z_{11} + z_{12} + z_{13}}{3} \quad z_{np.r} = 229.502$$

волновое сопротивление коронирующей линии:

$$z_{np.k} := z_{np.r} \cdot \beta \quad z_{np.k} = 261.946$$

$U'_{50\%} := 625$ разрядное напряжение для импульса "+" полярности, (кВ).

$$U_{50\%} := U'_{50\%} \cdot \left[0.92 - 0.012 \cdot L_{разp} \left[\left(0.74 - 0.06 \cdot L_{разp} \right) \cdot \left(L_{разp}^{-3} \right) \right] \right] \quad U_{50\%} = 567.659$$

$$P_{np} := \frac{2 \cdot U_{50\%}}{z_{np.k}} \quad P_{np} = 4.334$$

угол тросовой защиты:

$$\alpha := \text{atan} \left(\frac{2.1}{2} \right) \quad \alpha := 52$$

$\Delta S := 2.1$ горизонтальное смещение провода относительно троса, (м).

$$D := 1 + U_{\text{дл.доп}} \cdot \frac{h_{\text{тр}}}{\Delta h} \cdot \left(\frac{U_{\text{дл.доп}}^{2 \cdot 117}}{\Delta h \cdot \Delta S \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot h_{\text{пр}}}{r}\right)} \right) \quad D = 7.957 \times 10^7$$

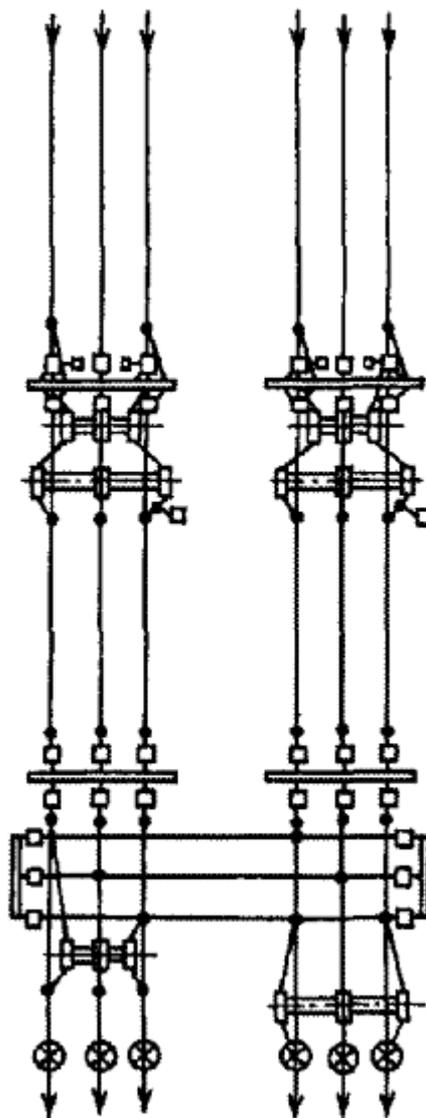
Вероятность прорыва молнии на провод при положительных углах (α) защиты троса:

$$P_{\alpha} := e^{-\frac{1}{D} \cdot \left(\frac{0.55}{\Delta h} \cdot \sqrt{\alpha \cdot h_{\text{тр}} \cdot \Delta S} - \frac{9}{D} \right)} \quad P_{\alpha} = 1$$

$$N_{\text{пр}} := N \cdot P_{\alpha} \quad N_{\text{пр}} = 25$$

$$n := N_{\text{пр}} \cdot P_{\text{пр}} \cdot \eta \quad n = 108.354$$

План ОРУ



Расчет заземления

Верхний слой грунта: **пески водоносные**

удельное сопротивление верхнего слоя грунта, (Ом*м) $\rho_1 := 20$

Второй слой грунта: **скальный грунт**

удельное сопротивление второго слоя грунта, (Ом*м)

Толщина верхнего слоя грунта, (м) $h_1 := 0.95$

Климатическая зона $N := 1$

Ток однофазного короткого замыкания, (кА) $I_{кз} := 10$

Время отключения, (с) $t_{сз} := 0.2$

Вспомогательный коэффициент для стали $\beta := 21$

Ток молнии, (кА) $I_M := 55$

1. Расчет удельного сопротивления грунта

коэффициент сезонности для первой климатической зоны $\psi := 5$

удельное сопротивление верхнего слоя грунта, (Ом*м) $\rho_1 := 20$

удельное сопротивление второго слоя грунта, (Ом*м)

$$\rho_2 := \frac{\rho_1}{\psi} \quad \rho_2 = 4$$

2. Расчитываем контур сетки заземлителя, если п/ст имеет размеры.

$A := 32.5$ длина ПС, (м).

$B := 22$ ширина ПС, (м).

площадь ПС с учетом выноса сетки заземления на 1,5 м за пределы ПС, (м²)

$$S := (A + 1.5 \cdot 2)(B + 1.5 \cdot 2) \quad S = 887.5$$

3. Принимаем диаметр горизонтальных прутков в сетке по условиям мех. прочности.

$d_{пр_гор} := 10$ мм $I_{кз} := 10000$ А

$F_{мехпроч} := 78.5$ мм²

Определяем сечение прутка по термической стойкости, (мм²)

$$F_{тс} := \sqrt{\frac{(I_{кз})^2 \cdot t_{сз}}{400 \cdot \beta}} \quad F_{тс} = 48.795$$

4. Определяем сечение прутка по коррозионной стойкости.

$$a_k := 0.0026 \quad c_k := 0.0104$$
$$b_k := 0.00915 \quad \alpha_k := 0.0224 \quad \text{средние значения коэффициентов, зависящие от грунта.}$$

$$T := 240 \quad \text{время использования заземления, (месяцы).}$$

$$S_{cp} := a_k \cdot \ln(T)^3 + b_k \cdot (\ln(T))^2 + c_k \cdot (\ln(T)) + \alpha_k \quad S_{cp} = 0.782$$

$$F_{кор} := 3.14 \cdot S_{cp} \cdot (d_{пр_гор} + S_{cp}) \quad F_{кор} = 26.485 \text{ мм}^2$$

$$F_{min} := F_{кор} + F_{тс} \quad F_{min} = 75.28 \text{ мм}^2 \quad F_{мехпроч} := 78.5 \text{ мм}^2$$

т.к. $F_{мехпроч}$ больше F_{min} , то условие выполняется.

$$H := 2.2 \quad \text{для первой климатической зоны толщина слоя сезонных изменений грунта, (м).}$$

$$t_{верт} := 0.8 \quad \text{глубина заложения верхнего конца вертикального прутка, (м).}$$

$$d_{верт} := 12 \quad \text{диаметр вертикального прутка, (мм).}$$

$$l_{верт} := 5 \quad \text{длина вертикального прутка, (м).}$$

6. Расчитываем общую длину горизонтальных полос (м).

$$a_{гор} := 6 \quad \text{расстояние между полосами сетки, (м).}$$

$$L_{гор} := \frac{2 \cdot S}{a_{гор}} \quad L_{гор} = 295.833$$

Уточняется длина горизонтальных полос квадратичной модели, (м):

$$l_{гор} := \sqrt{S} \quad l_{гор} = 29.791$$

Определяем число ячеек:

$$m := \frac{L_{гор}}{2 \cdot \sqrt{S}} - 1 \quad m = 3.965 \quad m := 4$$

Определяем длину стороны ячейки:

$$L_{ячейки} := \frac{\sqrt{S}}{m} \quad L_{ячейки} = 7.448$$

Длина горизонтальных полос в расчетной модели:

$$L := 2 \cdot \sqrt{S} \cdot (m + 1) \quad L = 297.909$$

Определяем количество вертикальных электродов:

$$n'_B := \frac{4 \cdot \sqrt{S}}{6} \quad n'_B = 19.861$$

$$\text{принимаем количество вертикальных электродов} \quad n_B := 20$$

Определяем стационарное сопротивление заземлителя для обоих слоев грунта, (Ом):

$$\frac{l_{верт}}{\sqrt{S}} = 0.168 \quad \text{следовательно} \quad A' := 0.335$$

$$R_{1s} := \rho_1 \cdot \left(\frac{A'}{\sqrt{S}} + \frac{1}{L + n_B \cdot l_{\text{верт}}} \right) \quad R_{1s} = 0.275$$

$$R_{2s} := \rho_2 \cdot \left(\frac{A'}{\sqrt{S}} + \frac{1}{L + n_B \cdot l_{\text{верт}}} \right) \quad R_{2s} = 0.055$$

Находим импульсный коэффициент для обоих слоев

$$\alpha_{и1} := \sqrt{\frac{1500\sqrt{S}}{(\rho_1 + 320) \cdot (I_M + 45)}} \quad \alpha_{и1} = 1.146$$

$$\alpha_{и2} := \sqrt{\frac{1500\sqrt{S}}{(\rho_2 + 320) \cdot (I_M + 45)}} \quad \alpha_{и2} = 1.174$$

Расчитываем импульсное сопротивление заземлителя, (Ом)

$$R_{и1} := R_{1s} \cdot \alpha_{и1} \quad R_{и1} = 0.315$$

$$R_{и2} := R_{2s} \cdot \alpha_{и2} \quad R_{и2} = 0.06$$

$$R_{об} := R_{и1} + R_{и2} \quad R_{об} = 0.38$$

Защита от прямых ударов молнии

1. Защита на уровне земли и первого защищаемого объекта

$h := 25$ высота молниеотвода, (м)

Расстояние между молниеотводами 1 и 2, (м)

$L_{M12} := 30.5$

$h_{1i} := 11$ высота защищаемого объекта, (м).

эффективная высота молниеотвода, (м):

$h_{эф} := 0.85 \cdot h \quad h_{эф} = 21.3$

половина ширины внутренней зоны, (м):

$r_0 := (1.1 - 0.002 \cdot h) \cdot h \quad r_0 = 26.3$

радиус внешней зоны при условии, (м): $h < L_M \leq 2 \cdot h$

$r_{co} := r_0 \quad r_{co} = 26.3$

наименьшая высота внутренней зоны защиты на уровне земли в середине между равновеликими молниеотводами для зоны А (U=<750 кВ), (м):

$$h_{1c.g.} := h_{\text{эф}} - (0.17 + 0.0003 \cdot h) \cdot (L_{M12} - h) \quad h_{1c.g.} = 20.3$$

половина ширины внутренней зоны защиты на уровне земли в середине между равновеликими молниеотводами для зоны А (U=<750 кВ), (м):

$$r_{1cx} := r_{co} \cdot \frac{h_{1c.g.} - h_{1i}}{h_{1c.g.}} \quad r_{1cx} = 12.0$$

радиус внутренней зоны:

$$r_{1x} := r_o \cdot \left(1 - \frac{h_{1i}}{h_{\text{эф}}} \right) \quad r_{1x} = 12.7$$

2. Защита на уровне второго защищаемого объекта

$h := 25$ высота молниеотвода, (м.)

Расстояние между молниеотводами 1 и 2, (м):

$$L_{M12} := 30.5$$

$h_{2i} := 7.5$ высота защищаемого объекта, (м).

эффективная высота молниеотвода, (м):

$$h_{\text{эф}} := 0.85 \cdot h \quad h_{\text{эф}} = 21.3$$

половина ширины внутренней зоны, (м):

$$r_o := (1.1 - 0.002 \cdot h) \cdot h \quad r_o = 26.3$$

радиус внешней зоны при условии, (м): $h < L \leq 2 \cdot h$

$$r_{co} := r_o \quad r_{co} = 26.3$$

наименьшая высота внутренней зоны защиты на уровне земли в середине между равновеликими молниеотводами для зоны А (U=<750 кВ), (м):

$$h_{2c.g.} := h_{\text{эф}} - (0.17 + 0.0003 \cdot h) \cdot (L_{M12} - h) \quad h_{2c.g.} = 20.3$$

половина ширины внутренней зоны защиты на уровне земли в середине между равновеликими молниеотводами для зоны А (U=<750 кВ), (м):

$$r_{2cx} := r_{co} \cdot \frac{h_{2c.g.} - h_{2i}}{h_{2c.g.}} \quad r_{2cx} = 16.5$$

радиус внутренней зоны:

$$r_{2x} := r_o \cdot \left(1 - \frac{h_{2i}}{h_{\text{эф}}} \right) \quad r_{2x} = 17.0$$

Грозоупорность ОРУ

1. Определяем число случаев перекрытия изоляции при прорывах прямых ударов молнии и обратных перекрытиях.

$z_{\text{ош}}$:= 425 волновое сопротивление ошиновки, (Ом).

$U_{50\%}$:= 620 разрядное напряжение для импульса отрицательной полярности, (кВ).

$$I_{\text{кр}} := \frac{2 \cdot U_{50\%}}{z_{\text{ош}}} \quad I_{\text{кр}} = 2.918 \quad \text{кА}$$

доля опасных перенапряжений, возникающих при непосредственном грозовом разряде в ошиновку ОРУ минуя молниеотводы:

$$P_{\text{пр}} := e^{-0.04 \cdot I_{\text{кр}}} \quad P_{\text{пр}} = 0.89$$

$l_{\text{гирл}}$:= 0.019 высота подвеса гирлянды на опоре, (км).

$R_{\text{н}}$:= 10 импульсное сопротивление заземлителя, (Ом).

$$I_{\text{оп}} := \frac{U_{50\%} - 50 \cdot l_{\text{гирл}}}{R_{\text{н}}} \quad I_{\text{оп}} = 61.905$$

вероятность обратного перекрытия при ударах молнии в гирлянду изоляторов:

$$P_{\text{оп}} := e^{-0.04 \cdot I_{\text{оп}}} \quad P_{\text{оп}} = 0.084$$

P_{α} := 0.005 вероятность грозового поражения ошиновки ОРУ минуя молниеотводы (для класса номинального напряжения до 750 кВ).

$\eta_{\text{пр}}$:= 0.9 вероятность перехода импульсного перенапряжения изоляции в силовую дугу при разрядах молнии в ПС минуя молниеотводы.

$\eta_{\text{оп}}$:= 0.9 вероятность перехода импульсного перенапряжения изоляции в силовую дугу при обратных перекрытиях.

$h_{\text{с}}$:= 19 максимальная высота сооружения на ПС, (м).

эквивалентная ширина, с которой сооружение собирает боковые разряды, (м):

$$R_{\text{экв}} := 5 \cdot h_{\text{с}} - \frac{2 \cdot h_{\text{с}}^2}{30} \quad R_{\text{экв}} = 70.933$$

a_{T} := 32.5 длина территории ПС, (м).

b_{T} := 22 ширина территории ПС, (м).

$N_{\text{гроз_ч}}$:= 30 число грозовых часов в году для первой климатической зоны.

плотность разрядов молнии на 1 км² поверхности:

$$P_0 := 0.05 \cdot N_{\text{гроз_ч}} \quad P_0 = 1.5$$

тогда число случаев перекрытия изоляции...

$$N_{\text{пу}} := P_0 \cdot (a_{\text{T}} + 2 \cdot R_{\text{экв}}) \cdot (b_{\text{T}} + 2 \cdot R_{\text{экв}}) \cdot (\eta_{\text{пр}} \cdot P_{\alpha} \cdot P_{\text{пр}} + \eta_{\text{оп}} \cdot P_{\text{оп}}) \cdot 10^{-6}$$

$$N_{\text{пу}} = 0.001117$$

2. Определим среднюю повторяемость в годах опасных перенапряжений на ПС из-за грозовых разрядов в ОРУ (в годах):

$$T_{пу} := \frac{1}{N_{пу}} \quad T_{пу} = 895.255$$

Система молниезащиты ПС должна обеспечить в зависимости от класса ее номинального напряжения $T_{пу}$ не ниже 700 для 110 кВ.

3. Определим число опасных грозовых перенапряжений от набегающих волн на ПС в целом, т.е. перенапряжений, превышающих допустимые значения за год.

допустимое сопротивление внутр. изоляции СТ, реактора, лин. выключателя, (кВ):

$$U_{доп} := 2.2 \cdot 110 \quad U_{доп} = 242$$

$Z_{пр_кор}$:= 261.949 волновое сопротивление коронирующей линии.

величина критического тока набегающей волны на РУ при ударе молнии в провод для внутр. изоляции электроустановки:

$$I_{пр_эу} := \frac{2 \cdot U_{доп}}{Z_{пр_кор}} \quad I_{пр_эу} = 1.848$$

доля опасных для изоляции ПС импульсов при прорыве молнии на провода, возникших в пределах опасной зоны:

$$\psi_{пр} := e^{-0.04 \cdot I_{пр_эу}} \quad \psi_{пр} = 0.929$$

$R_{и}$:= 10 импульсное сопротивление заземлителя.

δ := 0.3 для одного тросса.

$h_{оп}$:= 25 высота опоры, (м).

величина критического тока для внутр. изоляции ПС при обратных перекрытиях лмн. изоляции:

$$I_{оп_эу} := \frac{U_{доп}}{R_{и} + \delta \cdot h_{оп}} \quad I_{оп_эу} = 13.829$$

доля опасных для изоляции ПС импульсов при обратных перекрытиях изоляции, возникших в пределах опасной зоны:

$$\psi_{оп} := e^{-0.04 \cdot I_{оп_эу}} \quad \psi_{оп} = 0.575$$

$N_{оп}$:= 8 число ударов в опору.

N := 25 общее число ударов молнии на 100 км длины линии.

доля грозовых ударов в опору:

$$\delta_{оп} := \frac{N_{оп}}{N} \quad \delta_{оп} = 0.32$$

$k_э$:= 0.6 коэффициент взаимного перекрытия линии вне городской черты (просека).

$n_{вл}$:= 2 число отходящих линий.

$l_{опас_зана}$:= 2 длина опасной зоны, (км)

тогда число опасных грозových перенапряжений...

$$N_{\text{НВ}} := N \cdot N_{\text{гроз_ч}} \cdot I_{\text{опас_зана}} \cdot n_{\text{ВЛ}} \cdot (1 - k_{\text{э}}) \cdot (p_{\alpha} \cdot \psi_{\text{пр}} + \delta_{\text{оп}} \cdot p_{\text{оп}} \cdot \psi_{\text{оп}}) \cdot 10^{-4}$$

$$N_{\text{НВ}} = 0.00241$$

4. Определим среднюю повторяемость опасных перенапряжений на ПС (в годах):

$$T_{\text{НВ}} := \frac{1}{N_{\text{НВ}}} \qquad T_{\text{НВ}} = 414.285$$

Рекомендуемые показатели надежности грозозащиты ПС в зависимости от класса номинального напряжения оцениваются следующим значением: $T_{\text{НВ}}=300 - 400$ для 110 кВ.

Пример выполнения контрольной работы студентов заочной и сокращенной заочной формы обучения.

Задача 1.

Определить тип и число изоляторов в поддерживающей гирлянде изоляторов промежуточной опоры. Выбрать полимерный изолятор и сравнить электрические характеристики его и гирлянды изоляторов. Определить 50% разрядное напряжение гирлянды изоляторов при грозových периодах. Для гирлянды и полимерного изолятора определить длину пути утечки, сравнить по электрической прочности.

Данные: номинальное напряжение – 35 кВ; тип почв по засолённости – слабозасоленные; степень загрязненности атмосферы –IV; средняя высота трассы ВЛ над уровнем моря – 1,1 км.

Решение

Предварительно принимаем изолятор ПС–40А со следующими характеристиками: строительная высота $H=11,0$ см; длина пути утечки $L_{y1}=19$ см; коэффициент эффективности изолятора $K=1$; мокроразрядная напряжённость $E_{\text{мр}}=2,6$ кВ/см.

Определяем количество изоляторов в гирлянде по наибольшему рабочему напряжению:
$$n \geq \frac{K \cdot \lambda_{\text{эф}} \cdot U_{\text{нб раб.}}}{L_{y1}},$$

где $\lambda_{эф}$ – удельная эффективная длина пути утечки, зависит от напряжения ВЛ и от степени загрязнённости атмосферы, при $U_{ном}=35$ кВ и IV степени загрязнения $\lambda_{эф}=2,6$. Для ВЛ, проходящих на высоте от 1000 до 2000 м, $\lambda_{эф}$ увеличивается на 5%, следовательно: $\lambda_{эф}=1,05 \cdot 2,6=2,73$ см/кВ.

Наибольшее рабочее напряжение: $U_{нб\ раб.}=40,5$ кВ.

$$n \geq \frac{1 \cdot 2,73 \cdot 40,5}{19} = 5,42, \text{ принимаем } n=5.$$

Проверяем количество изоляторов по условию работы гирлянды под дождём при воздействии внутренних перенапряжений:

$$n \geq \frac{K_p \cdot U_{нб\ раб.\ \phi} \cdot K_3}{E_{мр} \cdot H \cdot k},$$

где K_p — расчётная кратность внутренних перенапряжений, для 35 кВ равная 3,5; $U_{нб\ раб.\ \phi}$ — наибольшее рабочее фазное напряжение ; $E_{мр}$ — мокроразрядная напряжённость электрического поля; K_3 — коэффициент запаса, учитывающий погрешность всех других параметров, $K_3=1,25$; k — поправочный коэффициент, учитывающий снижение мокроразрядного напряжения с повышением высоты прокладки трассы:

$$k = \sqrt{\left(1 - \frac{H_{ВЛ}}{44,3}\right)^{5,25}} = \sqrt{\left(1 - \frac{1}{44,3}\right)^{5,25}} = 0,91;$$

$$n = 5 = \frac{3,5 \cdot 40,5}{\sqrt{3} \cdot 2,6 \cdot 11 \cdot 0,91} \cdot 1,25 = 4,63.$$

Определим 50% разрядное напряжение гирлянды изоляторов при грозовых периодах, графически, используя руководящие указания. Находим длину разрядного пути по гирлянде изоляторов: $l_{разр} = n_{из} \cdot H_{из} = 0,11 \cdot 5 = 0,55$ м.

Тогда по графику получаем $U_{50\%} = 510$ кВ.

Выбираем линейный подвесной полимерный изолятор ЛК70/35 со следующими характеристиками: строительная высота $H=646$ см; длина пути утечки $L_y=880$ см.

Число полимерных изоляторов: $n_{пол} \geq \frac{1 \cdot 2,73 \cdot 40,5}{880} = 0,23$. Принимаем $n_{пол.}=1$.

Задача 2.

Рассчитать грозоупорность ВЛ.

Данные: $U_n=110$ кВ; опора – ПБ-110-1; провод АС-120.

Решение.

Выбираем изоляторы: 11 изоляторов ПС-40А. Тогда $l_{\text{разр}}=1,21$ м.

По РД определяем 50% разрядное напряжение, зависящее от $l_{\text{разр}}$:

$$U_{50\%}=650 \text{ кВ.}$$

Опора ПБ-110-2 – промежуточная двухцепная, стрела провеса троса:

$$f_{\text{тр}}=h_{\text{тр}}-h_{\text{г}}-h_{\text{тр-пр}}=25,3-6-5,5=13,8 \text{ м.}$$

Стрела провеса провода: $f_{\text{пр}}=h_{\text{пр}}-h_{\text{г}}=22,6-3,5-6=13,1$ м.

Средняя высота подвеса провода:

$$h_{\text{ср(пр)}}=h_{\text{пр}}-\frac{2}{3}f_{\text{пр}}=22,6-3,5-\frac{2}{3}\cdot 13,1=10,36 \text{ м.}$$

Средняя высота подвеса троса: $h_{\text{ср(тр)}}=h_{\text{тр}}-\frac{2}{3}f_{\text{тр}}=25,3-\frac{2}{3}\cdot 13,8=16,1$ м.

Число грозových часов в Амурской области: $N_{\text{г,ч}}=50$ ч. Тогда плотность разряда молнии в 1 км^2 : $p_0=0,05\cdot N_{\text{г,ч}}=0,05\cdot 50=2,5 / \text{км}^2$.

Определяем общее число ударов молнии на 100 км ВЛ:

$$N=0,2\cdot p_0\left(\frac{h_{\text{тр-тр}}}{2}+5h_{\text{ср.пр}}-2\cdot\frac{h_{\text{ср.тр}}^2}{30}\right)=0,2\cdot 2,5\cdot\left(\frac{0}{2}+5\cdot 10,36-2\cdot\frac{16,1^2}{30}\right)=17,25.$$

Определяем число ударов молнии в опору:

$$N_{\text{оп}}=4\cdot N\cdot\frac{h_{\text{тр}}}{l_{\text{прол}}}=4\cdot 17,25\cdot\frac{25,3}{244}=7,15.$$

Вероятность перекрытия линейной изоляции при ударе молнии в опору:

$$p_{\text{оп}}=e^{-0,04\cdot I_{\text{кр}}},$$

$$I_{\text{кр}}=\frac{U_{50\%}}{R_{\text{и}}+\delta\cdot h_{\text{оп}}}=\frac{650}{10+0,3\cdot 25,3}=36,9 \text{ кА}; \quad p_{\text{оп}}=e^{-0,04\cdot 36,9}=0,22.$$

Вероятность перехода искрового разряда в дугу:

$$\eta = (0,92 \cdot \frac{U_{\text{нб.раб}}}{I_{\text{разр}}} - 6) \cdot 10^{-2} = (0,92 \frac{125}{1,21} - 6) \cdot 10^{-2} = 0,89.$$

Удельное число грозových отключений при ударе молнии в опору:

$$n_{\text{оп}} = N_{\text{оп}} \cdot p_{\text{оп}} \cdot \eta = 7,15 \cdot 0,22 \cdot 0,89 = 1,3.$$

Определяем число ударов молнии в трос:

$$N_{\text{тр}} = N \cdot (1 - 4 \cdot \frac{h_{\text{тр}}}{l_{\text{прол}}}) = 17,25 \cdot (1 - 4 \cdot \frac{25,3}{244}) = 10,1.$$

Волновое сопротивление провода для опор ПБ-110-2: $Z_{\Gamma} = 490 \text{ Ом}$.

Эквивалентный радиус: $r_{\text{пр}} = \frac{D_{\text{пр}}}{2} = \frac{14}{2} = 7 \text{ мм}$.

Волновое сопротивление коронирующей линии 220 кВ: $Z_{\kappa} = \beta \cdot Z_{\Gamma}$.

$$\beta = 1,16 \cdot \sqrt{\frac{\ln \frac{1,5 h_{\text{cp}} E_{\text{cp}}^-}{U_{50\%}}}{\ln \frac{2 h_{\text{cp}}}{r_{\text{пр}}}}} = 1,16 \cdot \sqrt{\frac{\ln \frac{1,5 \cdot 1036 \cdot 21}{650}}{\ln \frac{2 \cdot 1036}{0,7}}} = 0,812;$$

$$Z_{\kappa} = \beta \cdot Z_{\Gamma} = 0,812 \cdot 490 = 398 \text{ Ом}.$$

Геометрический коэффициент связи: $K_{\Gamma} = \frac{\ln \frac{h'_{\text{тр-пр}}}{h_{\text{тр-пр}}}}{\ln \frac{2 h_{\text{тр}}}{r_{\text{тр}}}} = \frac{\ln \frac{47,9}{3,36}}{\ln \frac{2 \cdot 16,1}{0,005}} = 0,3.$

Электромагнитный коэффициент связи: $K_{\kappa} = \frac{K_{\Gamma}}{\beta} = \frac{0,3}{0,812} = 0,36.$

Скорость распространения волны: $v = c \cdot \beta = 3 \cdot 10^8 \cdot 1 = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$.

Превышение троса над проводом: $\Delta h = 25,3 - 22,6 = 2,7 \text{ м}$.

Критическая крутизна фронта тока молнии, при которой возможен

пробой: $\alpha_{\text{кр}} = \frac{2 E_{\text{cp}}^{\text{max}} \cdot \Delta h \cdot v}{Z_{\kappa} \cdot (1 - k_{\kappa}) \cdot l_{\text{прол}}} = \frac{2 \cdot 750 \cdot 2,7 \cdot 3 \cdot 10^8}{398 \cdot (1 - 0,36) \cdot 244} = 2 \cdot 10^7 \text{ кА/мкс}$.

Вероятность пробоя воздушного промежутка трос-провод:

$$p_{\text{тр}} = e^{-0,08 \cdot \alpha_{\text{кр}}} = e^{-0,08 \cdot 20000000} = 0;$$

Число грозových отключений при ударе молнии в трос в середине пролёта:

$$n_{тр} = N_{тр} \cdot p_{тр} \cdot \eta = 10,1 \cdot 0,89 = 0.$$

Вероятность прорыва молнии на провода при положительных углах защиты троса: $p_{\alpha} = 0,005$.

Число ударов молнии в провод при прорыве сквозь тросовую защиту:

$$N_{пр} = N \cdot p_{\alpha} = 17,25 \cdot 0,005 = 0,086.$$

Критическое значение тока молнии, при котором произойдёт перекрытие изоляции провода при ударе молнии в провод:

$$I_{кр} = \frac{2U_{50\%}}{Z_{пр.к}}; \quad Z_{пр.к} = 60 \ln \frac{2h_{ср}}{r_{пр}} = 60 \ln \frac{2 \cdot 10,36}{0,007} = 479 \text{ Ом}; \quad I_{кр} = \frac{2 \cdot 650}{479} = 2,7 \text{ кА};$$

Вероятность перекрытия изоляционного промежутка линейной изоляции провода: $p_{пр} = e^{-0,04 \cdot I_{кр}} = e^{-0,04 \cdot 2,7} = 0,89$.

Число грозовых отключений при ударе молнии в провод при прорыве сквозь тросовую защиту: $n_{пр} = N_{пр} \cdot p_{пр} \cdot \eta = 0,086 \cdot 0,89 \cdot 0,89 = 0,068$.

Удельное число грозовых отключений линии:

$$n_{вл} = n_{оп} + n_{тр} + n_{пр} = 1,3 + 0 + 0,068 = 1,36.$$

Задача 3.

Определить толщину первого и второго слоя градированной бумажно-масляной изоляции однофазного кабеля с сечением токоведущей жилы $S = 240 \text{ мм}^2$. Напряжение кабеля $U_{ном} = 110 \text{ кВ}$.

Для изоляции использованы два типа бумаги с диэлектрическими проницаемостями $\epsilon_1 = 5,4$ и $\epsilon_2 = 3,5$. Допустимая максимальная напряжённость электрического поля $E_{доп} = 12 \text{ кВ/мм}$.

Построить кривую распределения напряжённости по толщине изоляции.

Решение

Внутренний радиус первого слоя изоляции

$$r_1 = \sqrt{\frac{S}{\pi}} = \sqrt{\frac{240}{3,14}} = 8,74 \text{ мм}.$$

Определяем внешний радиус первого слоя из условия равенства максимальных напряжённостей в каждом слое:

$$r_2 = \frac{\varepsilon_1 \cdot r_1}{\varepsilon_2} = \frac{5,4 \cdot 8,74}{3,5} = 13,48 \text{ мм.}$$

Определяем внешний радиус второго слоя:

$$r_3 = r_2 \cdot e^{\frac{U - \left(\frac{\varepsilon_2 \cdot \varepsilon_2 \cdot E_{\text{доп}} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}}{\varepsilon_1} \right)}{E_{\text{доп}} \cdot \varepsilon_2}}$$

$$r_3 = 13,48 \cdot e^{\frac{110 - \frac{13,48 \cdot 3,5}{5,4} \cdot 12 \cdot \ln \frac{13,48}{8,74}}{13,48 \cdot 12}} = 20,09 \text{ мм.}$$

Толщина первого и второго слоя: $d_1=4,74$ мм; $d_2=6,61$ мм.

Ёмкости слоёв:

$$C_1 = \frac{2\pi \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_0}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$$

$$C_1 = \frac{2\pi \cdot 5,4 \cdot 8,9 \cdot 10^{-14}}{\ln \frac{13,48}{8,74}} = 6,966 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/см.}$$

$$C_2 = \frac{2\pi \cdot \varepsilon_2 \cdot \varepsilon_0}{\ln \frac{r_3}{r_2}}$$

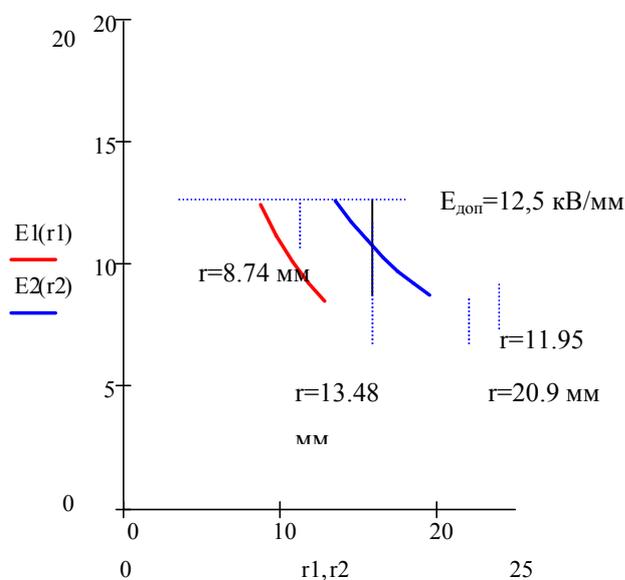
$$C_2 = \frac{2\pi \cdot 3,5 \cdot 8,9 \cdot 10^{-14}}{\ln \frac{20,09}{13,48}} = 4,9 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/см.}$$

Значения напряжённости в любой точке каждого слоя определяются по выражениям:

$$E_{1x} = \frac{U}{r_x \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}} \cdot \frac{C_2}{C_1 + C_2} = \frac{110}{r_x \cdot \ln \frac{13,48}{8,74}} \cdot \frac{4,9 \cdot 10^{-12}}{6,966 \cdot 10^{-12} + 4,9 \cdot 10^{-12}} = \frac{104,8}{r_x};$$

$$E_{2x} = \frac{U}{r_x \cdot \ln \frac{r_3}{r_2}} \cdot \frac{C_1}{C_1 + C_2} = \frac{110}{r_x \cdot \ln \frac{20,09}{13,48}} \cdot \frac{6,966 \cdot 10^{-12}}{6,965 \cdot 10^{-12} + 4,9 \cdot 10^{-12}} = \frac{169,9}{r_x}.$$

По этим выражениям значения строим кривую распределения напряжённости по толщине изоляции E_x



Задача 4.

1. Определить напряжение на шинах подстанции и ВЛ при набегании электромагнитных волн по ВЛ1 и скорость ее распространения:

- на шины подстанции;
- при прохождении ЭМВ через индуктивность, L ;
- при прохождении ЭМВ мимо емкости, C .

2. Найти индуктивное напряжение на проводах при ударе молнии в трос.

Исходные данные: номинальное напряжение $U_n=35\text{кВ}$; тип опоры П-35-2; марка и сечение провода АС-70; кол-во ВЛ, $n=3$; $U_{\text{пад}}/U_{\text{доп}}=800/60$; $l_{\text{зп}}=1,5\text{ км}$; $C=0,2\text{ мкФ}$; $L=1,4\text{ мГн}$; $dU_{\text{пр.мах}}/dt=1,3\text{ кВ/мкс}$.

Решение.

1. Волновое сопротивление линии до шины:

$$Z_1 = 60 \ln \frac{2 \cdot h}{r_{\text{пр}}},$$

где h - средняя высота подвеса провода над землей, $h=21\text{ м}$;

$r_{\text{пр}}$ - радиус провода, $r_{\text{пр}}=5,35\text{ см}$.

$$Z_1 = 60 \ln \frac{2 \cdot 21}{0,0053} = 538,6 \text{ Ом.}$$

Волновое сопротивление линии после шины:

$$Z_2 = \frac{Z_1}{n-1} = \frac{538,6}{3-1} = 269,3 \text{ Ом.}$$

а) определим напряжение на шинах подстанции при набегании ЭМВ на шины п/ст:

$$U_{omp} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \cdot U_{nad} = \frac{269,3 - 538,6}{269,3 + 538,6} \cdot 800 = -311,2 \text{ В.}$$

Напряжение на ВЛ:

$$U_{ВЛ} = U_{np} = U_{nad} + U_{omp} = 800 - 311,2 = 488,7 \text{ В.}$$

б) определим напряжение преломления и отражения при набегании ЭМВ при включенной индуктивности:

$$T_L = \frac{L \cdot 10^{-3}}{Z_2 + Z_1} = \frac{1,4 \cdot 10^{-3}}{269,3 + 538,6} = 1,7 \cdot 10^{-6}.$$

$$U_{np} = \frac{2 \cdot Z_2}{Z_2 + Z_1} \cdot U_{nad} \left(1 - e^{\frac{-t}{T_L}} \right) = \frac{2 \cdot 269,3}{269,3 + 538,6} \cdot 800 \cdot \left(1 - e^{\frac{-2}{1,7 \cdot 10^{-6}}} \right) = 533,3 \text{ В.}$$

$$U_{omp} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \cdot U_{nad} + \frac{2 \cdot Z_2}{Z_2 + Z_1} \cdot U_{nad} \cdot e^{\frac{-t}{T_L}} = \frac{269,3 - 538,6}{269,3 + 538,6} \cdot 800 + \frac{2 \cdot 269,3}{269,3 + 538,6} \cdot 800 \cdot e^{\frac{-2}{1,7 \cdot 10^{-6}}} = -252,5$$

в) определим напряжение преломления и отражения при набегании ЭМВ при включенной емкости:

$$T_C = \frac{C \cdot Z_1 \cdot Z_2}{Z_2 + Z_1} = \frac{0,2 \cdot 269,3 \cdot 538,6}{269,3 + 538,6} = 35,9.$$

$$U_{np} = \frac{2 \cdot Z_2}{Z_2 + Z_1} \cdot U_{nad} \left(1 - e^{\frac{-t}{T_C}} \right) = \frac{2 \cdot 269,3}{269,3 + 538,6} \cdot 800 \cdot \left(1 - e^{\frac{-2}{35,9}} \right) = 28,9 \text{ кВ.}$$

$$U_{omp} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \cdot U_{nad} - \frac{2 \cdot Z_2}{Z_2 + Z_1} \cdot U_{nad} \cdot e^{\frac{-t}{T_C}} = \frac{269,3 - 538,6}{269,3 + 538,6} \cdot 800 + \frac{2 \cdot 269,3}{269,3 + 538,6} \cdot 800 \cdot e^{\frac{-2}{35,9}} = 251,7$$

2. Найдем индуктивное напряжение на проводах при ударе молнии в трос.

Для этого найдем электромагнитный коэффициент связи:

$$K = \frac{K_\Gamma}{\beta},$$

где коэффициент, учитывающий деформацию электромагнитной волны:
 $\beta = 0,83$.

K_{Γ} – геометрический коэффициент связи:

$$K_{\Gamma} = \frac{\ln \frac{d_{12}' \cdot d_{13}'}{d_{12} \cdot d_{13}}}{\ln \frac{2h_{\text{тр}} \cdot d_{23}'}{r_{\text{тр}} \cdot d_{23}}}$$

d_{13} – расстояние между тросом и проводом, $d_{13}=5,3\text{м}$;

d_{12} – расстояние между тросом и проводом, $d_{12}=2,2\text{м}$;

d_{12}' – расстояние между тросом и зеркальным изображением 2-го провода,

$$d_{12}'=41,04;$$

d_{13}' – расстояние между тросом и зеркальным изображением 3-го провода,

$$d_{13}'=38,1;$$

d_{23}' – расстояние между проводами (зеркальное изображение), $d_{23}'=3,3$;

d_{23} – расстояние между проводами, $d_{23}=3,3\text{м}$;

$h_{\text{тр}}$ – средняя высота подвеса троса, $h_{\text{тр}}=21,0\text{м}$;

$r_{\text{тр}}$ – радиус троса, $r_{\text{тр}}=0,0053\text{м}$.

$$K_{\Gamma} = \frac{\ln \frac{41,04 \cdot 38,1}{5,3 \cdot 2,2}}{\ln \frac{2 \cdot 21 \cdot 3,3}{0,0053 \cdot 3,3}} = 0,546.$$

Электромагнитный коэффициент связи:

$$K = \frac{K_{\Gamma}}{\beta} = \frac{0,546}{0,83} = 0,65.$$

Индуктированное напряжение на проводе:

$$U_{\text{инд}} = K \cdot U_0 = 0,65 \cdot 800 = 526 \text{ В}.$$

Сделаем вывод о влиянии индуктивности и емкости на волновой процесс. Сглаживание фронта ЭМВ благоприятно сказывается на условиях работы межвитковой изоляции обмоток Эл. Машин и трансформаторов при набегании на них ЭМВ. Чем меньше крутизна фронта волны, тем ниже будут разности потенциалов между витками при прохождении вдоль обмотки фронта волны. Емкости и индуктивности используются в схемах грозозащиты для сглаживания фронта набегających волн и защиты межвитковой изоляции.

6. Перечень программных продуктов, используемых студентами при изучении данной дисциплины

При изучении данной дисциплины целесообразно пользоваться следующими программными продуктами: MathCad; Visio; Perehod; Wave; Excel.

Все выше перечисленные ПВК широко используются в практической деятельности выпускников и изучаются ранее.

7. Методические указания по применению современных информационных технологий

Состав информационных технологий, используемых при изучении данной дисциплины:

1. Презентации лекций, слайды, каталоги с техническими характеристиками оборудования – 3 компакт диска.
2. Электронные варианты электрических схем энергетических компаний Дальневосточного региона.
3. Схемы, рисунки, таблицы под медиакомплекс.
4. Лазерные пленки к проектоскопу – 16 штук.
5. Комплект индивидуальных заданий по дисциплине: домашних и выдаваемых на лекциях.
6. Промышленные программно-вычислительные комплексы «SДО-6», "RASTR", пакет автоматизации математических расчетов «MathCad», «PEREHOD», «WAVE».
7. Презентации практических занятий.
8. Электронный подбор материалов по тематике «Конструктивное исполнение воздушных и кабельных линий».

9. Электронные варианты учебников и учебных пособий в библиотеке кафедры.

10. Справочные материалы.

К информационной составляющей УМК относятся учебники, учебные пособия методические разработки. Т.е. их электронные издания (ИЭ). Информационная составляющая является электронным аналогом с:

возможностью использования наряду со статическими текстами и изображениями мультимедийных ресурсов (звука и видео);

наличием встроенных средств навигации, позволяющих пользователю переходить к основной странице издания, предыдущей, следующей странице издания, просмотреть оглавление всего издания или его раздела;

возможность оперативного внесения изменений после публикации.

Электронные издания существуют в различных представлениях. Возможно представление изданий в формате текстового процессора, например Word, публикация издания в переносимом формате, например Adobe PDF.

Следующей формой публикации ЭИ является публикация во Всемирной паутине в формате HTML с использованием других технологий, например CSS для стилевого оформления, динамического HTML – для создания динамических документов, Macromedia Flash для анимации.

ЭИ допускает многовариантное представление с различной функциональностью для работы с помощью различных пользовательских агентов. Состав версий ЭИ обеспечивает работу с ним на персональном компьютере и распечатку его на бумаге. Электронное представление ЭИ позволяет хранить его на любых электронных носителях и доставлять через сеть.

Разница проведения практических занятий при очном и дистанционном видах обучения определяется организацией взаимодействия между обучаемым и преподавателем, а также степенью взаимодействия между обучаемыми.

В очном образовании преподаватель может управлять ходом решения задач в реальном времени, направляя обучаемых, комментируя и объясняя типичные ошибки. Взаимодействие между обучаемыми позволяет быстрее находить решения, кроме того, обучаемые получают опыт совместной работы.

В заочном образовании, обучаемый получает комплект, состоящий из задачника, задания, методических указаний, примеров решения задач, справочных материалов. Участие преподавателя сводится к проверке полученных по почте решений.

Дистанционный вариант проведения практических занятий отличается от заочного возможностью оперативного общения между обучаемыми и преподавателем.

Способы общения между преподавателем и обучаемыми в заочной и сокращенной заочной формах обучения:

общение по электронной почте – этот способ является предпочтительным, позволяя его участникам читать и подготавливать сообщения в удобное для них время;

общение через web-форумы, организуемые на web-серверах учебного заведения;

общение с помощью служб мгновенных сообщений и чатов.

Способ доставки учебного контента: лично; по почте; электронные средства доставки (ftp, http, E-mail); комбинированные средства доставки.

Средства взаимодействия между преподавателем и обучаемыми вынесены из состава УМК, например электронную почту, форумы, чаты целесообразно совместно использовать под несколько ЭУМК.

8. Контроль качества образования

8.1. Методические указания профессорско-преподавательскому составу по организации межсессионного и экзаменационного контроля знаний студентов.

В процессе изучения дисциплины используются следующие виды контроля знаний студентов:

- входной контроль;
- текущий контроль;
- рубежный контроль;
- экзаменационный (итоговый) контроль;
- самоконтроль знаний.

Виды и цели контроля

Входной контроль зависит от цели обучающего курса и его специфики. Он определяет готовность студента к работе по курсу (роль допуска к обучению), выполняет диагностические функции, выявляет пробелы в знаниях, компенсируемые процессом дополнительного обучения. Обучающий курс становится адаптивным (каждый учащийся идет своим путем в зависимости от его начального уровня). Работа по тестовым заданиям настраивает студента на предметную область, вводит в терминологию, способствует актуализации знаний, становится стартовой площадкой для новой темы. Обычно входной контроль редок (вступительные экзамены, допуск к лабораторной работе), но при компьютеризации обучения его частота повышается.

Текущий контроль – диагностика знаний, умений и навыков (ЗУН) и коррекция обучения в процессе усвоения темы, позволяющая исправлять недостатки обучения и достигать необходимого уровня его усвоения.

Рубежный контроль – это проверка уровня усвоения очередного раздела курса. Студенту предлагается творческая задача, задача повышенной

сложности или задача, предусматривающая перенос усвоенных знаний на другой материал. Успешное решение задачи показывает, что учащийся овладел всей системой знаний и действий, предусмотренных целями обучения по данной теме. Рубежная проверка позволяет обучаемому запрашивать необходимый справочный или информационный материал, советы, разъяснения ошибок, наводящие вопросы. Задания должны быть адекватны этапу познавательной деятельности, элементу которого соответствует серия нескольких заданий. Рубежный контроль может быть входным для изучения последующего материала и поддержки уровня знаний при перерывах в обучении, что характерно для студентов заочной и сокращенной заочной форм. Итогом рубежного контроля являются результаты контрольных точек.

Экзаменационный (итоговый) контроль. Если проверка исходного уровня – «входной» контроль, то заключительный контроль показывает полученные результаты «на выходе». Он представляет собой серию заданий по всему материалу, которую обучаемый должен решить самостоятельно. По результатам экзаменационного контроля учащийся получает отметку.

Самоконтроль знаний – наиболее простой вид. Обычно это вопросы и задачи, на которые учащийся пытается ответить самостоятельно. При затруднении он может обратиться к учебнику и найти в нем ответы. Основная цель самоконтроля – самоутверждение, достижение уверенности в усвоении учебного материала, хотя это может и не соответствовать действительности.

Таким образом, основные цели разных видов контроля следующие: самоутверждение; готовность к изучению нового материала; проверка уровня усвоения; поддержка адаптивного обучения и уровня знаний; формирование базы оценок для определения рейтинга обучаемых. Программные средства контроля знаний должны обеспечивать все стадии его проведения: от идентификации до выдачи результатов.

Контроль (диагностика) знаний, умений, навыков (ЗУН) включает в себя выполнение некоторого множества заданий, характеризующихся трудностью и сложностью. Трудность задания определяется уровнем усвоения, на диагно-

стику которого оно направлено. Сложность характеризуется числом существенных операций в нем, в т.ч. и свернутых.

Педагогически корректное задание для контроля знаний студентов должно быть: содержательно валидным (построенным на содержании предшествующего обучения); функционально валидным (проверка того, для чего его используют); объективным; однозначным; специфичным (требующим конкретных ЗУН, а не общей эрудиции); способным разделить учащихся на знающих и незнающих.

Подбор заданий в группу основан на репрезентативности (полноте охвата дисциплины или ее раздела ограниченной выборкой); однородности (равноценности содержания и трудности наборов заданий); рандомизации (гарантии не предъявления одного и того же набор заданий).

Входной контроль выполняется в виде тестовых заданий. Формами текущего контроля являются блиц-опрос студентов на каждой лекции по пройденному материалу (5-7 минут), опрос на практических занятиях, защита индивидуальных домашних заданий, рефераты.

Рубежный контроль предусматривает выполнение контрольных работ, комплексных заданий, направленных на проверку эвристических способностей студентов, углубленного изучения материала, коллоквиум.

Итоговый контроль – это экзамен по дисциплине. Экзаменационный билет должен включать два теоретических вопроса и задачу. Предусмотрено три типа сложности задач: простой, средней и повышенной сложности. Студенту предлагается выбор задачи по сложности в зависимости от того, на какую оценку он претендует. Если студент не справляется с задачей средней или повышенной сложности, то предлагается простая задача, отсутствие решения которой приводит к неудовлетворительной оценке на экзамене.

Рекомендуется при оценке знаний студентов на экзамене учитывать его работу в семестре.

8.2. Фонды тестовых и контрольных заданий для оценки качества знаний

№ 1

Волна положительной полярности амплитудой 700кВ распространяется вдоль ВЛ с $h_{cp}=30$ м, $r_{np}=0,016$ м. На каком расстоянии ставить защиту для п/ст, чтобы длина фронта была 222кВ/м.

№ 2

Волна отрицательной полярности амплитудой 1400кВ распространяется вдоль линии с высотой подвеса проводов $h_{cp}=30$ м, радиусом провода $r_{np}=0,014$ м. Найти длину фронта волны после пробега пути в 4км.

№ 3

Определить величину емкости для сглаживания падающей волны с амплитудой 300кВ до 20кВ, если число отходящих линий от шин п/ст равно 10, а $Z_{л}=390$ Ом. Длина волны 35 мкс.

№ 4

Волна отрицательной полярности амплитудой 1200кВ распространяется вдоль линии с высотой подвеса проводов $h_{cp}=25$ м, радиусом провода $r_{np}=0,02$ м. Найти длину фронта волны после пробега пути в 5км.

№ 5

Рассчитать значения отраженной и преломленной волн, если на п/ст через $L=5.5$ МГн набегают волна амплитудой 120кВ. Волновое сопротивление линии 400 Ом, число линий 10.

№ 6

Рассчитать значения отраженной и преломленной волн, если на п/ст с 5 отходящими линиями набегают волна амплитудой 180кВ длиной 100мкс. Волновое сопротивление линии 370 Ом.

№ 7

Волна отрицательной полярности амплитудой 1500кВ распространяется вдоль линии с высотой подвеса 30м и радиусом провода 0,03м. Найти длину фронта после пробега пути в 3км.

№ 8

Волна положительной полярности амплитудой 1200кВ распространяется вдоль ВЛ с $h_{cp}=21$ м, $r_{пр}=16$ мм. Найти длину фронта волны после пробега 2,5км.

№ 9

Определить величину емкости для сглаживания падающей волны с амплитудой 150кВ до 5кВ, если число отходящих линий от шин п/ст 10, а $Z_{вл}=3800$ Ом. Длина волны 30мкс.

№ 10

Определить коэффициент преломления и отражения при падении ЭМВ на изоляцию подстанции, если $Z_{вл}=4000$ Ом, $Z_{2п/ст}=2000$ Ом.

№ 11

Волна отрицательной полярности амплитудой 1400кВ распространяется вдоль ВЛ с высотой подвеса проводов 22м и наружным диаметром провода 22мм. Число проводов в фазе 3. Найти длину фронта волны после пробега пути в 2км.

№ 12

Рассчитать значения отраженной и преломленной волн, если на шины подстанции через индуктивность $L=3$ мГн набегаает волна амплитудой 100кВ. От шин п/ст отходит 10 линий с $Z_{вл}=3500$ Ом.

№ 13

Рассчитать значение волнового сопротивления коронирующей линии, коэф. электромагнитной связи, скорости распространения ЭМВ по ВЛ с высотой подвеса проводов 20м, наружным диаметром провода 16мм. Волна имеет отрицательную полярность и амплитуду 1000кВ. ВЛ одноцепная.

№ 14

Определить величину емкости для сглаживания набегающей волны перенапряжения бесконечной длины амплитудой 500кВ и длительностью фронта 35 мкс, если $Z_{вл}=3000$ Ом, а $n_{вл}=5$. Как изменится емкость, если длина набегающей волны будет равно 79мкс. Допустимое напряжение волны будет равно 79 мкс. Допустимое напряжение при этом равно 50кВ.

№ 15

Найти отраженную и преломленную волну перенапряжения при набегании на шины п/ст через индуктивное сопротивление, равное $1,34\text{Ом}$, волны амплитудой 120кВ . Число отходящих линий от п/ст равно 6. Волновое сопротивление линии равно 350 Ом .

№ 16

Волна положительной полярности амплитудой 800кВ распространяется вдоль линии с высотой подвеса 30м и радиусом провода 16мм . Найти длину фронта волны после пробега пути $2,5\text{ км}$.

№ 17

Определить емкость для сглаживания фронта набегающей волны вдоль ВЛ на шины подстанции, если амплитуда волны равна 350кВ , длительность фронта волны 40мкс . Высота подвеса провода 18м , диаметр провода 24мм .

№ 18

Определить отраженную и преломленную волну перенапряжения при набегании на шины п/ст волны с амплитудой 700кВ . От п/ст отходит: а) одна линия, б) 5 линий, $Z_{\text{вл}}=400\text{Ом}$. Для какого случая удар молнии более опасен?

№ 19

Рассчитать значения $Z_{\text{к}}$, $K_{\text{к}}$, U , при наличии импульсной короны, если волна набегаёт по ВЛ с $h_{\text{ср}}=22\text{м}$, $r_{\text{гр}}=12\text{мм}$, имеет отрицательную полярность и $U_{\text{пад}}=900\text{кВ}$.

Задача № 1

Определить потери на корону для ВЛ-220 кВ с проводами 2хАСО-400, у которых радиус провода 1,4 см, расстояние между соседними проводами 8,6 м. Эквивалентная высота подвеса провода 12 м. Продолжительность видов погоды: дождь-850 ч; сухой снег-980 ч; изморозь-450 ч. Диаметр фазы 275 мм.

Задача № 2

Определить толщину первого и второго слоя градированной бумажно-масляной изоляции однофазного кабеля с сечением токоведущей жилы 120 мм^2 напряжением 110 кВ. Для изоляции использованы 2 типа бумаги с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_1 = 5$; $\epsilon_2 = 4,1$. Допустимая напряженность эл.поля 10 кВ/мм.

Задача № 3

Выбрать размеры пяти конденсаторных обкладок для регулирования эл.поля в области основной изоляции ввода напряжением 110 кВ, у которого длина остова составляет 1800 мм, диаметр токоведущего стержня 60 мм, ширина остова 150 мм. Протяженность самой длинной обкладки составляет $1/3$ длины остова.

Задача № 4

Допустим ли уровень радиопомех от короны на ВЛ-500 кВ с проводами 3хАСО-400 с радиусом провода 1,36 см, с расстоянием между соседними фазами 10,5 м диаметром фазы 275 мм? Рассчитать и сравнить с допустимым.

Задача № 5

Выбрать количество молниеотводов и рассчитать их зоны защиты для типовой подстанции 110/10 кВ, к которой подходит 2 ВЛ подстанция тупиковая, с неавтоматизированной ремонтной перемычкой. РУ 110 кВ выполнено открытым, 10 кВ-закрытым. Размеры здания подстанции: длина-30 м; ширина-9 м; высота-8 м.

Задача № 6

Рассчитать импульсное сопротивление заземлителя молниеотвода, приняв его четырехстержневым, если: а) ρ грунта 3500 Ом м; б) ρ грунта 800 Ом м. Сравнить с допустимым.

Задача № 7

Выбрать заземлитель и рассчитать его импульсное сопротивление для подстанции размером (80x40) м, если ρ грунта равно 500 Ом м.

Задача № 8

Рассчитать грозоупорность п/ст размером (142x74) м напряжением 220/110/10 кВ, к которой подходит 5 ВЛ с сечением проводов АС-300. Импульсное сопротивление заземлителя опор 20 Ом, на защищенном подходе длиной 2,7 км - 10 Ом. Молниеотвод выше линейного портала на 9,5 м. П/ст расположена в Амурской области.

Задача № 9

Определить число отключений ВЛ 220 кВ длиной 80 км из-за прямого удара молнии. Тип опоры П-220-3, провода принять марки АС-300. Линия проходит по территории Амурской области. Импульсное сопротивление заземлителя опоры 15 Ом. Коэффициент электромагнитной связи равен 0,3.

Задача № 10

Выбрать типы разрядников, показать их расстановку на схеме и на плане п/ст напряжением 110/10/10 кВ. Схема РУ ВН- "мостик". Разрядники напряжением 10 кВ расположить внутри помещения. Показать на примере типовой п/ст.

Задача № 11

Определить геометрический коэффициент связи для проводов ВЛ, подвешиваемых на опоре П-6-500-1. Марка проводов АС-500. Как изменится геометрический коэффициент связи, если на ВЛ возникнет импульсная корона при набеганием падающей волны амплитудой 2000 кВ?

Задача № 12

Определить длину защищенного подхода к п/ст 220/10 кВ, если расстояние между разрядником и трансформатором составляет 60 м, между разрядником и удаленным разъединителем 200 м. На п/ст установлены разрядники РВМГ-200 на каждую систему шин. Рассмотреть наиболее тяжелый случай. По ВЛ 220 кВ с проводами АС-300 набегает ЭМВ, вызванная ударом молнии в ВЛ.

Задача № 13

Выбрать заземлитель опоры для защищаемого подхода и рассчитать его импульсное сопротивление, если ρ грунта равно 700 Ом м. Рассмотреть промежуточную опору для ВЛ 220 кВ.

Задача № 14

Определить потери на корону для ВЛ-500 кВ с проводами 4хАСО-400, у которых радиус провода 1,36 см расстояние между соседними проводами фаз 10,5 м. Высота подвеса проводов 13 м. Продолжительность видов погоды: дождь-800 ч; сухой снег-830 ч; изморозь-582 ч. Диаметр фазы 22,5 м.

Задача № 15

Определить толщину первого и второго слоя градированной бумажно-масляной изоляции однофазного кабеля с сечением токоведущей жилы 185 мм² напряжением 35 кВ. Для изоляции использованы 2 типа бумаги с диэлектрическими проницаемостями: $\epsilon_1 = 4,6$; $\epsilon_2 = 3,8$. Допустимая напряженность эл.поля 9 кВ/мм.

Задача № 16

Выбрать размеры четырех конденсаторных обкладок для регулирования эл.поля в области основной изоляции ввода напряжением 220 кВ, у которого длина остова составляет 2000 мм, диаметр токоведущего стержня 70 мм, ширина остова 150 мм. Протяженность самой длинной обкладки 700 мм.

Задача № 17

Определить, допустим ли уровень радиопомех от короны на ВЛ с проводами 3хАСО-500 с радиусом 1,51 см, с расстоянием между соседними фазами 10,5 м, диаметром фазы 306 мм. Напряжением ВЛ 330 кВ.

Задача № 18

Выбрать количество молниеотводов и рассчитать их зоны защиты для защиты ОРУ-110 кВ от прямых ударов молнии. Размеры ОРУ принять равными (62х44) м . Высота линейного портала 11 м , шинного 7,5 м . Необходимые для расчёта исходные данные принять по плану типовой подстанции с РУВН , выполненному по схеме “двухсекционированная рабочая система шин с обходной” .

Задача № 19

Рассчитать сопротивления трёхстержневого заземлителя молниеотвода, выполненного из прутков диаметром 20 мм, длиной 2,5 м, полосы (40х4) мм. Расстояние между вертикальными электродами 5 м . Глубина залегания 0,8 м ; $\rho_{\text{грунта}}=300 \text{ Ом м}$. Сравнить расчётные значения сопротивления заземлителя с нормируемым в ПУЭ .

Задача № 20

Определить грозоупорность ВЛ напряжением 110 кВ с проводами АС-50 длиной 20 км, предварительно рассчитав заземлитель опоры по принятой конструкции. Исходные данные принять по справочнику .

Задача № 21

Определить показатель грозоупорности подстанции размером (100х50) м. К подстанции подходят 4 ВЛ 220 кВ. Шифр опоры П 220-2 . Длина защищённого подхода 3 км. Импульсное сопротивление заземлителя опоры 7 Ом . Подстанция расположена в районе Хабаровска . Марка проводов АС-400 .

Задача № 22

Выбрать защитные аппараты для защиты п/ст от набегающих импульсов перенапряжений. На п/ст расположены 2 силовых трансформатора 220/ 110/ 10 кВ. Схема ОРУ-220 кВ выполнена “четырёхугольником”, схема ОРУ-110 кВ выполнена с секционированной рабочей системой шин, с 4-мя отходящими ВЛ. Схема ЗРУ-10 кВ выполнена с двумя секциями шин. Показать их подключение на схеме и на плане (определив место установки).

Задача № 23

Определить геометрический и электролитический коэффициенты связи для проводов ВЛ, подвешиваемых на опоре П 220-2. Марка проводов АС-300. По ВЛ набегают электромагнитная волна отрицательной полярности с амплитудой 1800 кВ.

Задача № 24

Определить длину защищённого подхода к п/ст 110/10 кВ, если расстояние между разрядником и трансформатором 40 м, между разрядником и удалённым разъединителем 150 м. На подстанции установлены разрядники РВМГ-110. Провода ВЛ 110 кВ марки АС-185.

Задача № 25

Выбрать и рассчитать заземлитель подстанции и его импульсное сопротивление, если $\rho_{\text{грунта}}=700$ Ом м. Размеры подстанции (42x38) м. Подстанция выполнена открытой. Напряжение 35/10 кВ.

Задача № 26

Выбрать заземлитель опоры для ВЛ 110 кВ и рассчитать его импульсное сопротивление, если $\rho_{\text{грунта}}=350$ Ом м.

Задача № 27

Определить толщину первого и второго слоя градированной бумажно-масляной изоляции однофазного кабеля с сечением токоведущей жилы 150 мм^2 напряжением 220 кВ. Для изоляции использованы 2 типа бумаги с диэлектрическими проницаемостями: $\epsilon_1=4,8$, $\epsilon_2=3,8$. Допустимое значение напряжённости электрического поля 12 кВ / мм.

Задача № 28

Определить, допустим ли уровень радиопомех от короны на ВЛ с проводами 3хАСО-185 с радиусом провода 0,92 см, с расстоянием между соседними фазами 8,5 м, диаметром фазы 188 мм. Напряжение ВЛ 330 кВ .

Задача № 29

Определить потери на корону для ВЛ-500 кВ с проводами 3хАСО-500 , у которых радиус провода 1,51 см, расстояние между соседними проводами фаз 10,5 м. Эквивалентная высота подвеса проводов 13 м. Диаметр фазы 306 мм. Продолжительность видов погоды : дождя – 720 ч ; снег сухой – 1061 ч ; изморозь – 381 ч .

Задача № 30

Выбрать размеры трёх конденсаторных обкладок для регулирования электрического поля в области основной изоляции ввода напряжением 35 кВ, у которого длина остова 1200 мм, диаметр токоведущего стержня 50 мм, ширина остова 120 мм. Протяжённость самой длинной обкладки принять 400 мм .

Задача № 31

Рассчитать зону защиты двойного стержневого молниеотвода, принятого для защиты линейных порталов высотой 11 м, расположенных на расстоянии 30 м друг от друга.

Задача № 32

Рассчитать сопротивление 5-стержневого заземлителя молниеотвода, выполненного из прутков диаметром 20 мм, длиной 5 м, полосы 40х4 мм. Расстояние между вертикальными электродами 5 м . Глубина залегания 0,8 м ; $\rho_{\text{грунта}}=500 \text{ Ом м}$. Сравнить с нормируемым в ПУЭ .

Задача № 33

Определить грозоупорность ВЛ 110 кВ длиной 70 км. На линии расположены 2 троса . ВЛ проходит по территории Тамбовского района Амурской области . Тип опоры с учётом количества тросов и необходимые исходные данные принять по справочнику .

Задача № 34

Рассчитать грозоупорность подстанции размером (160x80x42) м напряжением 220/35/10 кВ, к которой подходят 4 ВЛ сечением АС-300 . Длина защищённого подхода 2 км. Импульсное сопротивление заземлителя опор 25 Ом , на защищённом подходе 10 Ом . Подстанция расположена в Амурской области .

Задача № 35

Рассчитать сопротивление заземлителя подстанции размером 80x40 м, если $\rho_{\text{грунта}}=500$ Ом м.

Задача № 36

Выбрать количество молниеотводов и рассчитать их зоны защиты для подстанции размером 65x45 м. Высота подвеса гирлянды изоляторов на линейном портале 16,5 м, на шинном – 11,5 м. Определить допустимое расстояние по воздуху от молниеотвода до оборудования ОРУ подстанции.

Задача № 37

Рассчитать зону защиты двойного тросового молниеотвода, подвешиваемого на опорах ПБ-2 (ВЛ 500 кВ). Исходные данные принять по справочнику .

Задача № 38

Определить длину защищённого подхода к п/ст 500/220/110/10 кВ, если расстояние между ОПН и автотрансформатором составляет 65 м, между ОПН и удалённым линейным разъединителем 300 м. Рассмотреть решение задачи для ВЛ 500 кВ и ВЛ 220 кВ. В случае необходимости выбрать дополнительные защитные аппараты.

Задача № 39

Выбрать типы защитных аппаратов и показать их расстановку на схеме и на плане подстанции напряжением 220/35/10 кВ. ОРУ 220 и 35 кВ принять типовыми при условии, что к п/ст подходит 4 ВЛ 220 кВ и 6 ВЛ 35 кВ. Длина защищённых подходов на ВЛ 35 кВ равна 1 км, на ВЛ 220 кВ – 2,5 км.

Задача № 40

Расставить защитные аппараты на схеме подстанции 500/220/35/10 кВ, на которой установлены 2 автотрансформатора 500/220/35 кВ и 2 трансформатора 35/10 кВ. К п/ст подходят 2 ВЛ 500 кВ, 6 ВЛ 220 кВ и 10 ВЛ 35 кВ. Схемы соответствующих РУ выбрать самостоятельно. Доказать численно правильность расстановки защитных аппаратов.

Задача № 41

Выбрать количество молниеотводов и рассчитать их зоны защиты для ОРУ п/ст от прямых ударов молнии, если высота подвеса изоляции на шинных порталах 11 м, линейных – 16,5 м. Размеры ОРУ (50x20) м. О каком уровне напряжения ОРУ идёт речь?

Задача № 42

Выбрать и рассчитать импульсное сопротивление одиночно стоящего молниеотвода высотой 30 м, если $\rho_{\text{грунта}}=580$ Ом м.

Задача № 43

Определить число отключений ВЛ 500 кВ длиной 150 км в год из-за прямого удара молнии, если $\beta=0,85$. Тип промежуточной опоры выбрать самостоятельно.

Тема РГР «Молниезащита подстанции (станции) от прямых ударов молнии и набегающих волн перенапряжений. Объекты РГР: Зейская ГЭС, Бурейская ГЭС, Райчихинская ГРЭС, подстанции Амурской энергосистемы, подстанции завода «Амурский металл».

Коллоквиумы:

Грозовые перенапряжения.

Внутренние перенапряжения.

8.3. Экзаменационный контроль.

Вопросы к экзамену

1. Общая характеристика перенапряжений.
2. Классификация перенапряжений.
3. Закономерности распространения электромагнитных волн перенапряжений
4. Многократные отражения электромагнитных волн перенапряжений и их анализ.
5. Набегание электромагнитных волн на шины подстанции.
6. Прохождение электромагнитных волн перенапряжений через индуктивность.
7. Прохождение электромагнитных волн перенапряжений мимо ёмкости
8. Волновые процессы в многопроводной системе.
9. Прохождение электромагнитных волн перенапряжений вдоль провода, расположенного вблизи другого изолированного провода (трос-провод).
10. Распространение электромагнитных волн перенапряжений по двум параллельным проводам в системе из трёх проводов(2троса-провод).
11. Распространение электромагнитных волн перенапряжений по нескольким проводам одновременно.
12. Затухание и деформация электромагнитных волн перенапряжений.
13. Влияние импульсной короны на волновой процесс перенапряжений.
14. Молния как источник грозových перенапряжений.
15. Развитие молнии.
16. Основные параметры и электрические характеристики молнии.
17. Характеристики грозовой деятельности.
18. Эксплуатационные характеристики грозоупорности линий.
19. Прямой удар молнии в воздушную линию без тросов.
20. Прямой удар молнии в воздушную линию с тросом.
21. Определение удельного числа отключений ВЛ вследствие прямого удара молнии для линий с тросами и без них.
22. Индуктированные перенапряжения на ЛЭП.
23. Средства повышения грозоупорности ВЛ.
24. Молниеотводы, их принцип действия.
25. Конструктивное исполнение молниеотводов.
26. Конструктивное исполнение тросовых молниеотводов.
27. Зона защиты стержневых молниеотводов.
28. Зона защиты тросовых молниеотводов.
29. Условия безопасного прохождения молнии по молниеотводу.
30. Заземление в электроустановках высокого напряжения.
31. Заземление молниеотводов, опор.
32. Заземление подстанций.
33. Условия прохождения тока молнии по заземлителю.
34. Общая характеристика защитных аппаратов от перенапряжений и их анализ.
35. Защитные промежутки.

36. Трубчатые разрядники.
37. Вентильные разрядники.
38. Группы вентильных разрядников и их электрические характеристики.
39. Комбинированные вентильные разрядники.
40. ОПН.
41. Защита подстанций от набегающих импульсов грозовых перенапряжений.
42. Типовые схемы молниезащиты подстанций.
43. Особенности молниезащиты подстанций различного уровня напряжения, присоединенных к ВЛ отпайками.
44. Молниезащита генераторных блоков и электрических машин.
45. Координация изоляции электрооборудования подстанции с защитными аппаратами.
46. Определение длин защищенных подходов к подстанции.
47. Грозоупорность подстанций.
48. Общая характеристика коммутационных перенапряжений.
49. Перенапряжение переходного процесса при отключении ёмкости ненагруженных линий.
50. Перенапряжение переходного процесса при включении разомкнутой линии.
51. Перенапряжение переходного процесса при АПВ.
52. Перенапряжение переходного процесса при отключении КЗ.
53. Перенапряжение переходного процесса при отключении малых индуктивных токов.
54. Общая характеристика установившихся перенапряжений в электропередачах.
55. Феррорезонансные перенапряжения в сети с изолированной нейтралью с падением провода.
56. Влияние насыщения силовых трансформаторов на повышение напряжения в системах с заземленной нейтралью.
57. Сравнительный анализ методов расчета коммутационных и установившихся перенапряжений.
58. Общая характеристика способов и средств ограничения внутренних перенапряжений.
59. Ограничение внутренних перенапряжений с помощью вентильных разрядников и выключателей двухступенчатого действия с шунтирующими сопротивлениями.
60. Основные принципы построения защит от коммутационных перенапряжений.
61. Испытательные установки и методы испытаний электрооборудования.
62. Основы неразрушающих испытаний изоляции.
63. Использование абсорбционных явлений.
64. Контроль качества изоляции по тангенсу угла диэлектрических потерь.
65. Контроль изоляции по интенсивности частичных разрядов.
66. Тепловизионный контроль.
67. Испытания изоляции повышенным напряжением.

Пример билета на экзамен

Билет №1

1. Классификация перенапряжений
2. Изоляция силовых конденсаторов.
3. Конструктивное исполнение молниеотводов.
4. Задача.

Полный комплект экзаменационных билетов хранится на кафедре.

9. Карта обеспеченности дисциплины кадрами профессорско - преподавательского состава

Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия	Контроль за качеством знаний студентов	Экзамен
Зав. каф. энергетики, проф. Савина Н.В.	ст.преп. Панькова Д.Н., асс. Бодруг Н.С.	ст.преп. Кривохижа Я.В., асс. Бодруг Н.С.	проф. Савина Н.В., ст.преп. Панькова Д.Н., асс. Бодруг Н.С.	проф. Савина Н.В.

10. Список использованных источников

1. Техника высоких напряжений: Учебник для вузов / И.М.Богатенков, Ю.Н.Бочаров, Н.И. Гумерова, Г.М.Иманов и др.; под ред. Г.С.Кучинского. – СПб.: Энергоатомиздат, 2003.– 608 с.
2. Защита сетей 6-35 кВ от перенапряжений / Ф.Х. Халилов, Г.А. Евдокунин, В.С. Поляков и др.; под ред. Ф.Х. Халилова. – СПб.: Энергоатомиздат, 2002. – 272 с.
3. Гольдштейн В.Г., Халилов Ф.Х., В.П.Бобров. Перенапряжения и защита от них в электрических сетях 35-220 кВ. – Самара.: Изд-во СамГТУ, 2001. – 259 с.
4. О.А. Аношин, П.П. Кутлер. Ограничители перенапряжений 6-35 кВ. Конструкция, расчет, рекомендации по эксплуатации. – М.: ИУЭ ГУУ, ВИПКЭнерго, ИПК Госслужбы, 2004. – 48 с.
5. Г.М. Иманов, Ф.Х. Халилов, А.И. Таджибаев. Методика выбора нелинейных ограничителей, необходимых для защиты изоляции сетей низкого, среднего, высокого и сверхвысокого напряжения трехфазного переменного тока. – СПб.: ПЭ ИПК, 2004. – 31 с.
6. Основы современной энергетики: Уч-ник для вузов ч. 2 Современная электроэнергетика / под ред. А.П. Бурмана и В.А. Строева. – М. Изд-во МЭИ, 2004. – 462 с.
7. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 57 с.
8. Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования. Вып.21. Опыт создания и эксплуатации электрических аппаратов высокого напряжения с элегазовой изоляцией. – СПб: ПЭИПК, 2003. – 217 с.
9. Электрические аппараты высокого напряжения/ под ред. Г.Н. Александрова. Изд-во СПб ГТУ, 2000. -503 с.
10. Исследования и области применения ограничителей перенапряжений / Сборник научных трудов НИИПТ. – Ленинград.: Энергоиздат, 1981. – 87 с.
11. Полевой И.Ф., Михайлов Ю.А., Халилов Ф.Х. Внутренние перенапряжения на электрооборудовании высокого и сверхвысокого напряжения. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. -152 с.
12. Бикфорд Дж.П., Мюлина Н., Рид Дж. Р. Основы теории перенапряжений в электрических сетях. – М.: Энергоиздат, 1981. – 168 с.
13. Физика грозового разряда и грозозащита линий электропередачи / М.В. Костенко, И.М. Богатенков, Ю.А. Михайлов, Ф.Х. Халилов. – Л.: Изд-во ЛПИ, 1982. - 77 с.
14. Заземления в сетях высокого напряжения и средства защиты от перенапряжений / М.В. Костенко, И.М. Богатенков, Ю.А. Михайлов, Ф.Х. Халилов. – Л.: Изд-во ЛПИ, 1983. - 74 с.
15. Базуткин В.В., Ларионов В.П., Пинталь Ю.С. и др. Техника высоких напряжений. Изоляция и перенапряжения в электрических системах. / Под ред. В.П.Ларионова. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 464 с.

16. Сви П.М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 126 с.
17. Техника высоких напряжений. / Под ред. Д.В. Разевича. – М.: Энергия, 1976. – 426 с.
18. Степанчук К.Ф., Тиняков Н.А. Техника высоких напряжений. – Минск, Высш.школа, 1982. – 367 с.
19. Техника высоких напряжений. Теоретические и практические основы применения. / М.Б. Бейер, В.Бек, К. Меллер, В. Цэнгль. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 555 с.
20. Александров Г.Н., Установки сверхвысокого напряжения и охрана окружающей среды. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 308 с.
21. Лабораторные работы по ТВН / Аронов М.А. и др. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 352 с.
22. Справочник по электротехническим установкам высокого напряжения. / Под ред. И.А. Баумштейна, М.В.Хомякова. – М.: Энергия, 1981. – 568 с.
23. Электротехнический справочник в 3 томах. Т3. Производство и распределение электрической энергии. / Под ред. проф. МЭИ.: А.И. Попов (гл. ред.). – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – 964 с.
24. Кужекин И.П. Испытательные установки и измерения на высоком напряжении. – М.: Энергия, 1980. – 136 с.
25. Сви П.М. Контроль изоляции оборудования высокого напряжения. – М.: Энергия, 1988.–126 с.
26. Лабораторный практикум по ТВН. Изоляция и перенапряжения / под ред. Н.В.Савиной. – Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2006. – (электронное пособие).
27. Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозových и внутренних перенапряжений / под ред. Н.Н.Тиходеева. – С.Пб: ПЭ ИПК Минтопэнерго РФ, 1999.– 353 с.
28. Методические указания по применению ограничителей в электрических сетях 110-750 кВ. – М.: РАО «ЕЭС России», 2000. – 68 с.
29. Р.Н. Карякин. Заземляющие устройства промышленных электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 476 с.

Периодические издания (профессиональные журналы)

1. Энергетик
2. Промышленная энергетика.
3. Электрика
4. Вестник МЭИ
5. Известия вузов «Энергетика»
6. Новости электротехники
7. Электричество
8. Электрические станции
9. Известия РАН
10. Энергетика

Информационное обеспечение дисциплины

1. Центральное Диспетчерское управление (ЦДУ) ЕЭС России
<http://www.cdu.elektra.ru/>
2. Служба релейной защиты и автоматики ЦДУ ЕЭС России
<http://www.cdu.elektra.ru/rza/>
3. Объединённое Диспетчерское Управление энергосистемами Востока (ОДУ Востока) <http://www.oduv.ru/>
4. ОАО "АМУРЭНЕРГО" <http://www.ae.amur.ru/>
5. ОАО "ДАЛЬЭНЕРГО"
<http://www.dalenergo.org/>
6. ОАО "ЗЕЙСКАЯ ГЭС" <http://www.rao-ees.ru/zges/>
7. ФОРЭМ <http://www.cdrforem.ru/>