МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество

АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ

кафедра Электрические станции, сети и системы

«Допущен к защите»
Заведующий кафедрой _____
Умбеткулов Е.К. к.т.н. доцент
(Ф.И.О., ученая степень, звание)
_____ «_____»_____ **20____ г.**
(подпись)

ДИПЛОМНЫЙ ПРОЕКТ

На тему: Ограничение перенапряжения в электрических сетях

Специальность 5В071800 – „Электроэнергетика"

Выполнил (а) Зикиров Г.Б. ГР ЭЭ-13(В)
(Фамилия и инициалы) группа

Научный руководитель Ормалова Ж.К., к.т.н., профессор
(Фамилия и инициалы, ученая степень, звание)

Консультанты:

по экономической части:
Жакупов А.А. К.Э.Н., профессор
(Фамилия и инициалы, ученая степень, звание)
_____ «25» 05 20 16 г.
(подпись)

по безопасности жизнедеятельности:
Байзакова С.М. старший преподаватель
(Фамилия и инициалы, ученая степень, звание)
_____ «19» 05 20 16 г.
(подпись)

Нормоконтролер: Тергеусизова Марьям Абдигаликовна, доцент
(Фамилия и инициалы, ученая степень, звание)
_____ «_____»_____ 20___ г.
(подпись)

Рецензент: Ахметдинова Ж.С. Вед. инженер АО „АЛЭС"
(Фамилия и инициалы, ученая степень, звание)
_____ «_____»_____ 20___ г.
(подпись)

Алматы 2016 г.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество

АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ

Факультет Электроэнергетический
Специальность 5В071800 – «Электроэнергетика»
Кафедра Электрические станции, сети и системы

ЗАДАНИЕ

на выполнение дипломного проекта

Студент Зикиров Гадиз
(фамилия, имя, отчество)

Тема проекта Ограничение перенапряжения в электрических сетях

утверждена приказом ректора № ___ от «___» _____ 20___ г.
Срок сдачи законченной работы «___» _____ 20___ г.
Исходные данные к проекту требуемые параметры результатов проектирования (исследования) и исходные данные объекта
Обзор литературных и нормативных источников по существующей проблеме.
Постановка цели работы и задач исследования
Основные мероприятия по защите ВЛ от перенапряжений
Разработка основных разделов и сбор графического материала
Выполнение необходимых расчетов

Перечень подлежащих разработке дипломного проекта вопросов или краткое содержание дипломного проекта:
Перенапряжения в электрических сетях
Защита оборудования с помощью коммутационных защитных средств
Защита подстанции от набегающей волны
Расчет и проектирование грозозащиты подстанции $U_н$ = 110кВ
Охрана труда и безопасность жизнедеятельности
Экономическая оценка эффективности инвестиции в строительство подстанции

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

Рекомендуемая основная литература

РД 153-34.3-35.125-99 Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений / Под научной редакцией М.И. Тиходеева. – 2-е изд. – СПб: ПЭИПК Минтопэнерго РФ, 1999. – 555 с.

Бургсдорф В.В. Ларионов В.И., Пиотровский Ю.Е. Техника высоких напряжений / Под ред. В.И. Ларионова. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 464 с.

Бургсдорф В.В., Кадомская К.И., Костенко М.В., Михайлов Ю.А. Перенапряжения в электрических системах и защита от них. Учебник для вузов. – СПб: Энергоатомиздат Санкт-Петербургское отделение, 1995. – 320 с. – ISBN 5-283-04423-8.

Консультанты по проекту с указанием относящихся к ним разделов

Раздел	Консультант	Сроки	Подпись
БЖД	Гайзатова С.М.	19.05.2016г.	
Экономическая часть	Макунов Н.А.	25.05.2016г.	

ГРАФИК
подготовки дипломного проекта

№ п/п	Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления руководителю	Примечание
1	Определение тематики дипломной работы.	19.10.2016	
2	Обзор литературных и нормативных источников по существующей проблеме.	16.11.2015	
3	Постановка цели работы и задач исследования	30.11.2015.	
4	Разработка основных разделов и сбор графического матер.	7.12.2015.	
5	Перенапряжения в электрических сетях (Раздел 1).	7.01.2016.	
6	Защита оборудования с помощью коммутационных защитных средств (Раздел 2)	10.02.2016	
7	Защита подстанции от набегающих волн (Раздел 3).	23.03.2016.	
8	Расчет и проектирование грозозащиты подстанции $U_н$ - 110кВ (Раздел 4).	11.04.2016	
9	Охрана труда и безопасность жизнедеятельности Экономическая часть	18.04.2016	
10	Оформление пояснительной записки	2.06.2016	
11	Оформление графической части	16.05.2016	
12	Сдача работы в учебную часть	30.05.2016	

Дата выдачи задания «____»_____20___ г.

Заведующий кафедрой _____ _____
(подпись) (Фамилия и инициалы)

Руководитель _____ Ахсанова Ж.К.
(подпись) (Фамилия и инициалы)

Задание принял к исполнению
студент _____ Зекиров Г.Б
(подпись) (Фамилия и инициалы)

Андатпа

Электр энергиясын қорек көзінен тұтынушыларға жіберу үшін токөткізгіш бөліктердің жерге және өзара қатысты сенімді оқшауламасы қажет.

Жұмыс кернеуінің ұзақ әсер етуі, сонымен қатар қолайсыз ауа райы шарттары мен механикалық әсерлерге сәйкес асқын кернеулердің әсері оқшауламаның жабылуына немесе бұзылуына әкелуі мүмкін.

Бұл жұмыста 110 кВ электр беріліс желілерін атмосфералық асқын кернеуден қорғау сұрақтары, 110 кВ тарату құрылғыларының найзағайлы асқын кернеуден қорғаныс принциптері қарастырылған, $U_н = 110$ кВ желінің ажырауы және жабылу сандарына есептеу жүргізілген, сонымен қатар $U_н = 110$ кВ ҚС найзағайдан қорғанысын жобалау және есептеу жүргізілген.

Аннотация

Для передачи электрической энергии от источника к потребителю требуется надежная изоляция токоведущих частей относительно земли и между собой.

Длительное воздействие рабочего напряжения, а также многократное воздействие перенапряжений в сочетании с неблагоприятными атмосферными условиями и механическими воздействиями могут привести к пробою или перекрытию изоляции.

В данной работе рассмотрены вопросы защиты линий электропередачи 110 кВ от атмосферных перенапряжений, принципы защиты РУ 110 кВ от грозовых перенапряжений, произведены расчеты числа перекрытий и отключений линий $U_н = 110$ кВ, а также расчет и проектирование грозозащиты подстанции $U_н = 110$ кВ.

Annotation

For the transmission of electrical energy from the source to the consumer requires reliable isolation of live parts to earth and to each other.

Prolonged exposure to the operating voltage , and repeated exposure to surge, combined with adverse weather conditions and mechanical influences can lead to breakdown or ceiling insulation , as well as to the gradual aging of insulation and its premature failure.

In this paper we consider the protection of 110 kV power transmission line from atmospheric surges , the principles of protection of 110 kV overhead lines from lightning surges , calculations are made of slabs and cuts kV lines , as well as calculation and design of lightning protection substation kV.

Содержание

Введение 7
1 Перенапряжения в электрических сетях 9
1.1 Классификация перенапряжений 9
1.2 Защита от перенапряжений в электрических сетях 12
1.3 Воздействие грозовых перенапряжений на изоляцию воздушных линий и электрооборудование открытых распределительных устройств 14
2 Защита оборудования с помощью коммутационных защитных средств 24
2.1 Принцип действия и характеристики защитных аппаратов 24
2.2 Общая характеристика ОПН и их конструктивные особенности 26
3 Защита подстанции от набегающих волн 33
3.1 Механизм формирования набегающих волн 33
3.2 Волновые процессы при набегании электромагнитной волны на узел неоднородности 42
3.3 Исследование возникновения и развития грозовых перенапряжений 43
4 Расчет и проектирование грозозащиты подстанции $U_н = 110$ кВ **56**
4.1 Расчет напряжения на изоляции силового трансформатора при заданной волне перенапряжения **56**
4.2 Расчет напряжений в узловых точках подстанции методом бегущих волн **57**
4.3 Расчет кривой опасных параметров (КОП) **64**
4.4 Эффективность грозозащиты подстанции от волн перенапряжений, набегающих с линии **65**
4.5 Расчет среднегодового числа грозовых отключений воздушной линии **69**
5 Охрана труда и безопасность жизнедеятельности **74**
5.1 Воздействие электрического тока на организм человека **74**
6 Экономическая оценка эффективности инвестиции в строительство подстанции **80**
6.1 Экономическая и финансовая эффективность в строительство ЛЭП и подстанции **80**
Заключение **84**
Список литературы **85**

Введение

Современная объединенная энергосистема включает в себя электрические станции и подстанции, генерирующие и преобразующие электрическую энергию и электрические сети, передающие электроэнергию и распределяющие ее между потребителями. Для передачи электрической энергии от источника к потребителю требуется надежная изоляция токоведущих частей относительно земли и между собой. Различные элементы электрических сетей (генераторы, трансформаторы, коммутирующие и измерительные аппараты, воздушные и кабельные линии) и условия работы их изоляции обуславливают разнообразие используемых в них изоляционных конструкций.

Изоляция электрических сетей подвергается длительному (в течение всего срока эксплуатации) воздействию рабочего напряжения, изменение которого допускается в ограниченных пределах. Так, рабочее напряжение не должно превышать 115% от номинального напряжения для сетей до 220 кВ включительно; 110% для сетей 330 кВ, 105% для сетей 500 кВ и выше.

В условиях эксплуатации изоляция подвергается также многократному воздействию внутренних и грозовых перенапряжений. Наряду с этим изоляция подвергается температурным и механическим воздействиям, приводящим к ухудшению ее электрических и механических свойств.

Длительное воздействие рабочего напряжения, а также многократное воздействие перенапряжений в сочетании с неблагоприятными атмосферными условиями (колебания давления, температуры, влажности воздуха; выпадение осадков; загрязнение) и механическими воздействиями могут привести к пробою или перекрытию изоляции, а также к постепенному старению изоляции и преждевременному выходу ее из строя. Кроме того, воздействие рабочего напряжения приводит к потерям энергии в изоляции электропередачи, а также к возникновению радиопомех.

Перед работниками электроэнергетики и электропромышленности стоит задача изыскать наиболее экономичные схемы, конструкции и типы оборудования для подстанций и линий электропередачи высокого напряжения. В выполнении этой задачи важную роль играет техника защиты от перенапряжений.

Ограничение грозовых и коммутационных перенапряжений является одной из основных задач электроэнергетики, поскольку это позволяет значительно облегчить условия работы изоляции и во многих случаях сократить изоляцию, когда она определяется перенапряжениями. Перенапряжения должны быть ограничены до такого уровня, при котором они не оказывали бы внимания на изоляцию – ее размеры и качество. Это стремление и определяет актуальность работ по ограничению перенапряжений.

ОПН (нелинейные ограничители перенапряжений) на сегодняшний день являются одним из эффективных средств защиты оборудования

электрических сетей. Данные аппараты обладают достаточно высокими эксплуатационными свойствами и надежностью.

Нелинейные ограничители перенапряжений предназначены для использования в качестве основных средств зашиты электрооборудования станций и сетей среднего и высокого классов напряжения переменного тока промышленной частоты от коммутационных и грозовых перенапряжений. При их разработке были использованы последние технологические достижения. Ограничители рекомендуется применять вместо вентильных разрядников соответствующих классов напряжения при проектировании, эксплуатации, техническом перевооружении и реконструкции электроустановок.

1 Перенапряжения в электрических сетях

1.1 Классификация перенапряжений

Надежная работа электрических систем в основном определяется изоляцией и теми напряжениями, которые на эту изоляцию воздействуют. В процессе эксплуатации по различным причинам в той или иной части электрической системы может повышаться и значительно превышать напряжения нормального режима. Повышение напряжения, представляющих опасность для изоляции называются перенапряжениями.

В большинстве случаев перенапряжения имеют кратковременный характер, так как они возникают при быстрозатухающих переходных процессах или в аварийных режимах, время существования которых ограничивается действием релейной защиты и системной автоматики. Различные виды перенапряжений имеют длительность от единиц микросекунд до нескольких часов. Даже самые кратковременные перенапряжения способны привести к пробою или перекрытию изоляции и связанной с этим необходимостью последующего отключения поврежденного элемента сети, т.е. к перерывам в электроснабжении потребителей или снижением качества электроэнергии.

В зависимости от места приложения различают следующие виды перенапряжений: 1) фазные, воздействующие на изоляцию токоведущих частей по отношению к земле и имеющие наибольшее практическое значение; 2) междуфазные, возникающие на изоляции между токоведущими частями различных фаз; 3) внутриобмоточные, воздействующие на изоляцию между различными элементами обмотки (витками, катушками) одной фазы; 4) междуконтактные, приложенные между разомкнутыми контактами одноименных фаз коммутационных аппаратов (выключателей, разъединителей).

Основными характеристиками перенапряжений являются: 1) максимальное значение $U_{\max}$ или кратность $K = \frac{U_{\max}}{U_{н.р}}$ по отношению к амплитуде соответствующего наибольшего допустимого рабочего напряжения; 2) длительность воздействия; 3) форма кривой; 4) широта охвата элементов сети.

По причинам возникновения перенапряжения подразделяются на следующие (см.рисунок 1.1):

·- внешние – от разрядов молнии (грозовые перенапряжения) и от воздействия внешних источников;

·- внутренние – возникающие при резонансных явлениях, при авариях и при коммутациях элементов электрической цепи.

Главным источником внешних перенапряжений в высоковольтных электрических сетях являются разряды молнии. Внешние перенапряжения

подразделяются на: линии и на подстанции при прямом ударе молнии (ПУМ); индуктированные на линий и на изоляции электрической машины; на подстанции и электрической машине вследствие прихода волн с линии.



Рисунок 1.1 – Классификация перенапряжений

Наиболее опасные грозовые перенапряжения возникают при прямом ударе молнии (ПУМ) в токоведущие элементы электрической сети (в фазные провода воздушных линий, в ошиновку распределительных устройств (РУ) станций и подстанций). Удар молнии в заземленные элементы конструкции (в заземленные грозозащитные тросы, заземленные опоры воздушных линий, в молниеотводы, установленные в распределительном устройстве) приводит к возникновению на них кратковременных перенапряжений, которые могут стать причиной обратных перекрытий с заземленных элементов на токоведущие.

При ударе молнии вблизи от воздушной линии или распределительного устройства возникают индуктированные перенапряжения, обусловленные взаимной электромагнитной (индуктивной и емкостной) связью канала молнии с токоведущими и заземленными элементами сети. Они в большинстве случаев имеют меньшую величину, чем перенапряжения от прямого удара молнии, но представляют опасность для изоляции оборудования сетей с номинальным напряжением до 110 кВ включительно. Импульсы грозовых перенапряжений могут также воздействовать на изоляцию электроустановок, расположенных на значительном удалении от места удара молнии, так как грозовые волны распространяются по линиям электропередач на значительные расстояния с малым затуханием.

Набегающие по воздушным линиям на распределительные устройства грозовые волны могут представлять опасность для электрооборудования станций и подстанций, которое имеет меньшие запасы электрической прочности по сравнению с линейной изоляцией.

Грозовые перенапряжения могут передаваться через трансформатор в его нейтраль и на вторичную сторону как магнитным (по коэффициенту трансформации), так и электростатическим путем (через межобмоточные емкости). Учитывая оба механизма, грозовые перенапряжения представляют опасность и для изоляции разземляемой нейтрали трансформатора, и для изоляции вторичной обмотки трансформатора, а также оборудования к ней присоединенного.

Волны перенапряжений, возникающие на линии, набегают на подстанцию, где они воздействуют на изоляцию трансформаторов, аппаратов и ошиновки. Изучение атмосферных перенапряжений на линиях и подстанциях основывается на теории волновых процессов в линиях и в схемах, содержащих линии.

Внутренние перенапряжения в зависимости от длительности воздействия на изоляцию подразделяются на квазистационарные и коммутационные.

Квазистационарные перенапряжения возникают при временных с точки зрения эксплуатации режимах работы и неблагоприятных сочетаниях параметров сети и могут продолжаться до тех пор, пока не изменится схема или режим сети. Длительность таких перенапряжений (от секунд до десятков минут) ограничивается действием релейной защиты или оперативного персонала. Квазистационарные перенапряжения условно делят на режимные, резонансные, феррорезонансные.

Режимные перенапряжения наблюдаются при неблагоприятных сочетаниях действующих в сети электродвижущих сил. К ним можно отнести перенапряжения при несимметричном коротком замыкании (или просто замыкании) на землю, а также при перевозбуждении и разгоне генератора, которые возникают в случае внезапного сброса нагрузки.

Резонансные перенапряжения имеют место при приближении одной из собственных частот колебаний отдельных участков сети к частоте вынуждающей э.д.с (как правило, частота 50 Гц). Они развиваются в контурах, содержащих емкость и ненасыщенную индуктивность – например, при одностороннем питании линии электропередачи 110-750 кВ большой протяженности; в неполнофазных режимах воздушной линии 500-750 кВ с присоединенными к ней шунтирующими реакторами, в сетях 6-35 кВ при недокомпенсации индуктивностью ДГР емкости сети.

Феррорезонансные перенапряжения могут развиваться в контурах, содержащих емкость и индуктивность с насыщенным магнитопроводом. Такие перенапряжения наблюдаются как на промышленной частоте, так и на высших и низших гармониках.

Нередко феррорезонансные процессы имеют место при неполнофазном питании силовых трансформаторов, которое может быть вызвано: перегоранием плавких вставок высоковольтных предохранителей в одной или двух фазах, неполнофазными коммутациями разъединителей или выключателей, обрывами проводов (или шлейфов на опорах) воздушных линий. Возникновение феррорезонансных процессов возможно и в схемах с измерительными трансформаторами напряжения (ТН) электромагнитного типа. Этот вид перенапряжений представляет опасность, главным образом, только для электромагнитных трансформаторов напряжения. В качестве примера можно привести феррорезонанс на сборных шинах РУ 110-750 кВ с электромагнитными ТН и воздушными выключателями, шунтированными емкостными делителями напряжения.

Коммутационные перенапряжения возникают при всевозможных быстрых изменениях режимов работы сети. Они происходят вследствие работы коммутационных аппаратов (включение и отключение элементов сети), пробоях изоляции, а также при резком изменении параметров нелинейных элементов. Наибольшее значение среди них имеют перенапряжения при коммутациях воздушных линий электропередачи, кабелей, двигателей, индуктивных элементов сети (трансформаторов, реакторов), конденсаторных батарей.

1.2 Защита от перенапряжений в электрических сетях

Все мероприятия по защите от перенапряжений делятся на две группы:

– превентивные меры снижения перенапряжений;

– защита оборудования с помощью коммутационных защитных средств.

Превентивные меры – это предотвращение возникновения перенапряжений или ограничение их величины в месте их возникновения. К таким мерам относятся следующие меры:

– применение выключателей с шунтирующими резисторами;

– применение выключателей без повторных зажиганий дуги между контактами при их разведении;

– применение грозозащитных тросов и молниеотводов;

– заземление опор линий электропередачи;

– емкостная защита изоляции обмоток трансформаторов и реакторов;

– применение емкостных элементов для снижения перенапряжений.

Коммутационные средства защиты от перенапряжений срабатывают и соединяют защищаемую цепь с заземлением в случае, когда перенапряжение в точке их установки превышает некоторую критическую величину. К этим средствам относят разрядники, шунтирующие реакторы с искровым соединением и нелинейные ограничители перенапряжений.

Надежность защиты в значительной степени определяется состоянием заземления опор воздушных линий и металлических корпусов оборудования подстанций. Заземление и вне его роли защиты от перенапряжений является

весьма ответственным элементом сетей высокого напряжения. Различают три основных типа заземлений:

– рабочее заземление, используемое для создания необходимого распределения напряжений и токов в нормальных и аварийных режимах работы сети;

– защитное заземление, служащее для защиты персонала от напряжения, возникающего на корпусах оборудования при повреждениях изоляции или вследствие влияний;

– грозозащитное заземление, предназначенное для защиты от внешних перенапряжений.

Заземление разрядников, молниеотводов и тросов способствует уменьшению вероятности перекрытия изоляции при грозовых разрядах. Функции рабочего, защитного и грозозащитного заземлений часто возлагают на одно устройство.

Основными защитными аппаратами (ЗА) для защиты изоляции от грозовых и коммутационных перенапряжений являются вентильные разрядники и нелинейные ограничители перенапряжений. При построении схем защиты от перенапряжений оборудования РУ с помощью ОПН и РВ необходимо решать две основные тесно связанные друг с другом задачи:

– выбор числа, мест установки и характеристик ЗА, которые обеспечат надежную защиту изоляции от грозовых и коммутационных перенапряжений;

– обеспечение надежной работы самих ЗА при воздействии на них рабочего напряжения сети, а также при воздействии квазистационарных перенапряжений, для ограничения которых ЗА не предназначены.

Защитные свойства РВ и ОПН основаны на нелинейности вольтамперной характеристики их рабочих элементов, обеспечивающей заметное снижение сопротивления при повышенных напряжениях и возврат в исходное состояние после снижения напряжения до нормального рабочего. Низкая нелинейность вольтамперной характеристики рабочих элементов в разрядниках не позволяла обеспечить одновременно и достаточно глубокое ограничение перенапряжений, и малый ток проводимости при воздействии рабочего напряжения. Поэтому в конструкции разрядника были использованы искровые промежутки, включаемые последовательно с нелинейными элементами и позволяющие избежать воздействия на них рабочего напряжения, срабатывающие однако в случае возникновения перенапряжений, опасных для защищаемого оборудования.

Значительно большая нелинейность окисно-цинковых сопротивлений (варисторов) ограничителей перенапряжений ОПН позволила отказаться от использования в их конструкции искровых промежутков, т.е. нелинейные элементы ОПН присоединены к сети в течение всего срока его службы.

В настоящее время вентильные разрядники практически сняты с производства, а в эксплуатации в большинстве случаев отслужили свой нормативный срок службы. Построение схем защиты изоляции оборудования как новых, так и модернизируемых РУ, от грозовых и коммутационных

перенапряжений теперь оказывается возможным только с использованием ОПН.

По общепризнанному мнению ОПН не предназначен для ограничения квазистационарных перенапряжений и защиты оборудования от них, так как это потребовало бы неоправданных затрат на параллельные элементы в конструкции ОПН. Поэтому способы ограничения квазистационарных перенапряжений выходят за рамки настоящих Рекомендаций и здесь не рассматриваются.

1.3 Воздействие грозовых перенапряжений на изоляцию воздушных линий и электрооборудование открытых распределительных устройств

Основной причиной грозовых перенапряжений на изоляции оборудования распределительных устройств (РУ) 35-750 кВ являются воздействия молнии на присоединенные воздушные линии (ВЛ), вызывающих образование грозовых волн, распространяющихся вдоль ВЛ.

Атмосферные перенапряжения на проводах линии подразделяются на индуктированные (при разряде молнии вблизи линии) и прямого удара молнии в линию (ПУМ).

Поражение молнией проводов сети - это возникновение перенапряжения от прямого удара молнии (ПУМ). Если такое перенапряжение зафиксировано вблизи провода, то оно называется индуктированным. От ПУМ в трос, опору или провод на ЛЭП возможны перекрытия изоляции любого класса напряжения. Следовательно, интенсивность грозовой деятельности в районе, где проходит трасса линий, окажет основное влияние на выбор против грозовой защиты.

Разряд молнии в возвышенный объект сопровождается образованием встречных лидеров, развивающихся с возвышенных мест объекта – в случае линии с опоры, с грозозащитного троса и с фазных проводов. Место удара молнии определяется наиболее развившимся встречным лидером, поэтому для ВЛ различают следующие случаи поражения:

1) удар молнии в провод с последующим перекрытием с провода на опору или между проводами;

2) удар молнии в вершину опоры с последующим перекрытием с опоры на провод;

3) удар молнии в пролет троса с последующим перекрытием с троса на провод или на землю.

Главную опасность для линии представляет прямой удар молнии в фазные провода с последующим перекрытием изоляции от возникающих при этом перенапряжений. По месту перекрытия возникает дуга за счет рабочего напряжения линии с необходимостью отключения короткого замыкания. Вероятность перехода импульсного перекрытия в дугу

зависит от величины рабочего напряжения и материала опор. В случае деревянных опор вероятность перехода в дугу мала; для линий на железобетонных и металлических опорах эта вероятность порядка 0,5 для сетей 3..35 кВ, а для ЛЭП 110..500 кВ близка к единице.

Прямой удар молнии в опору линии без тросов.

На линии без тросов большинство ПУМ поражает провода линии. Поэтому случай ПУМ в опору линии без тросов представляет в основном методический интерес. Схема поражения показана на рисунке 1.2. Через опору и ее заземление $R_з$ протекает ток молнии $i_м$. Напряжение на заземлении опоры будет равно:

$$u_з = i_м R_и, \tag{1.1}$$

где $R_и$ - импульсное сопротивление заземлителя при токе молнии $i_м$. Напряжение $u_з$ достигает амплитудного значения при амплитудном значении $i_м$. Примем, что ток молнии имеет косоугольный фронт с крутизной $a_м(кА/мксек)$. Тогда на фронте волны тока молнии

$$u_з = a_м t R_и, \tag{1.2}$$

Через опору и ее заземление $R_з$ протекает ток молнии $i_м$. Напряжение на заземлении опоры будет равно:

$$u_з = i_м R_и, \tag{1.3}$$

где $R_и$ - импульсное сопротивление заземлителя при токе молнии $i_м$. Напряжение $u_з$ достигает амплитудного значения при амплитудном значении $i_м$. Примем, что ток молнии имеет косоугольный фронт с крутизной $a_м(кА/мксек)$. Тогда на фронте волны тока молнии

$$u_з = a_м t R_и, \tag{1.4}$$

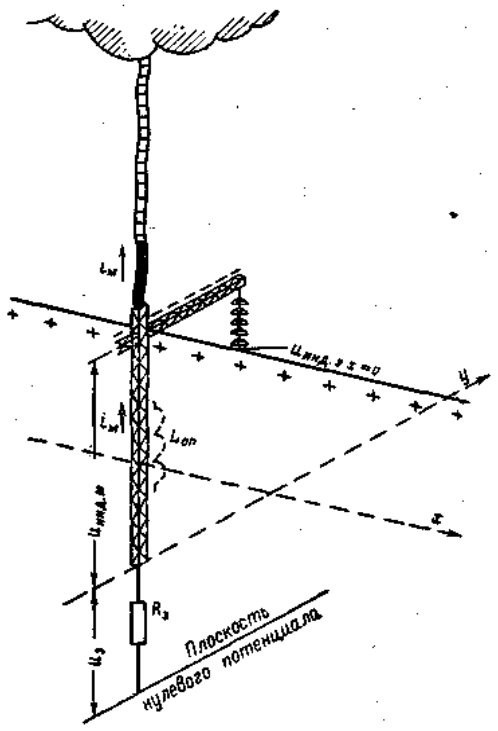


Рисунок 1.2 – Прямой удар молнии в опору линии без троса

Зависимость $R_и$ от мгновенного значения тока $i_м$ определяется для выбранного заземлителя по кривым. Полярность напряжения $u_з$ совпадает с полярностью тока молнии.

Электрическое поле тока молнии по-прежнему индуктирует напряжения $u_{инд.э}$ и $u_{инд.м}$. Магнитная составляющая $u_{инд.м}$ обусловлена самоиндукцией тока в опоре и взаимоиндукцией тока в канале молнии с контуром опора – провод. Обозначим коэффициент самоиндукции через $L_{ор}$, а коэффициент взаимоиндукции через М. Значение $L_{ор}$ растет пропорционально высоте опоры; $L_{ор}$ тем меньше, чем больше параллельных путей -для прохождения тока, создается конструкцией опоры.

Зависимости $L_{ор} = f\left(h_{ор}^{пр}\right)$ для типовых конструкций опор задаются соотношениями:

$L_{ор} = 0{,}55\left(h_{ор}^{пр}\right)$ – для портальных металлических и(железобетонных опор, мкгн;

$L_{ор} = 0{,}6\left(h_{ор}^{пр}\right)$– для деревянных П-образных опор с двумя заземляющими спусками, мкгн;

$L_{ор} = 0{,}65\left(h_{ор}^{пр}\right)$ – для башенных металлических и железобетонных опор мкгн;

$h_{ор}^{пр}$ – высота опоры до уровня подвески проводов, м.

Коэффициент взаимоиндукции М между каналом молнии и опорой зависит от длины главного канала молнии и нарастает по мере увеличения

длины этого канала $H_м = \nu_м t$, где $\nu_м$ – скорость главного разряда. Величина $\nu_м$ подвержена значительному статистическому разбросу – от $1/2$ до $1/20$ скорости света, вследствие чего в широких пределах изменяется и величина М. При малых $\nu_м$ коэффициент $M \prec\prec L_{ор}$. Поэтому в приближенных расчетах можно учитывать только коэффициент самоиндукции опоры $L_{ор}$ и, следовательно, принять

$$u_{инд.м} \approx L_{ор} \frac{di_м}{dt} = a_м L_{ор}. \qquad (1.5)$$

Суммарное напряжение на верхушке опоры

$$u_{ор} = a_м (R_и t + L_{ор}). \qquad (1.6)$$

При отрицательной полярности тока молнии напряжение $u_{ор}$ также отрицательной полярности.

На проводе индуктируется электрическая составляющая напряжения $u_{инд.э}$, которая в рассматриваемом случае обусловлена нейтрализацией зарядов в канале молнии, начиная от высоты $h_{пр}$. Расчеты показывают, что амплитуда электрической составляющей индуктированного напряжения может быть определена по формуле:

$$u_{пр} = u_{инд.э} = a_м L_э, \qquad (1.7)$$

где $a_м (кА/мксек)$ – крутизна тока молнии;

$L_э$ – коэффициент, численно равный высоте подвеса провода, мкгн;

$h_{пр}$ – высота подвеса провода, м.

При отрицательном токе молнии напряжение на проводе $u_{инд.э}$ имеет положительную полярность. Высота подвеса провода $h_{пр}$, в расчетах принимается равной средней высоте подвеса провода над землей в пролете.

На изоляцию пораженной опоры воздействует суммарное напряжение

$$u_{и.э} = u_{ор} - u_{пр} = u_з + u_{инд.м} + u_{инд.э} = a_м (t R_и + L_{ор} + L_э). \qquad (1.8)$$

Характерная кривая $u_{из}(t)$, построенная по данным приводимого ниже примера 1. Напряжение практически мгновенно нарастает до $u_{инд} = a_м (L_{ор} + L_э)$ и далее нарастает в соответствии с ростом $u_з$. Если напряжение нарастает до пересечения $U - t$ характеристикой изоляции на опоре, происходит перекрытие изоляции. Точке пересечения соответствует время $t_р$ и амплитуда

тока молнии $I_м = a_м t_р$. Если $u_{из}$ не достигает вольт-секундной характеристики, перекрытия изоляции не произойдет. Таким образом, при каждых заданных значениях $a_м$ и $I_м$ можно определить, произойдет ли перекрытие изоляции на опоре. Такое перекрытие, происходящее с заземленной опоры на провод, называется обратным.

Прямой удар молнии в опору линии с тросами. Для предотвращения ПУМ в провода на линиях с металлическими опорами подвешиваются тросы, заземленные на каждой опоре. Рассмотрим схему поражения молнией опоры с тросами (см.рисунок 1.3).

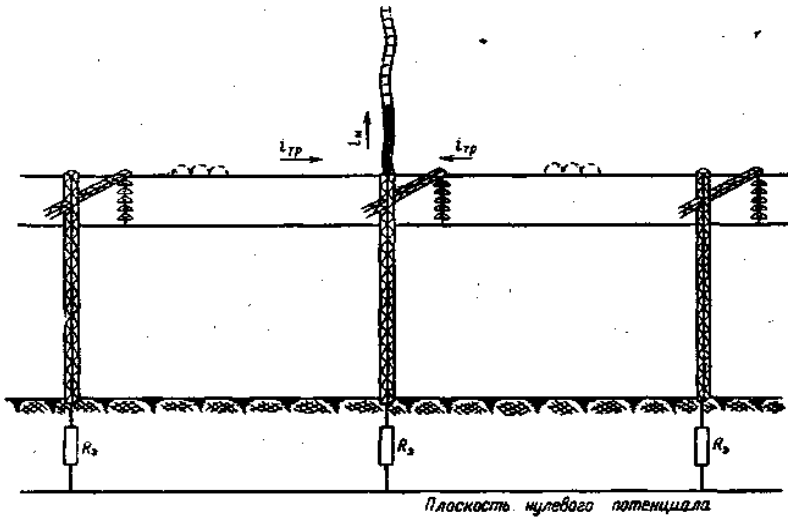


Рисунок 1.3 – Прямой удар молнии в опору линии с тросом

Ток молнии растекается по тросам в заземления нескольких, ближайших к месту поражения опор; обычно достаточно учитывать растекание тока по пораженной и соседним опорам. Расчетные схемы для определения тока в пораженной опоре показаны на рисунке 1.3. Ток молнии с косоугольным фронтом представлен источником тока $i_м = a_м t$. Пораженная опора представлена сопротивлением заземления $R_з$ и коэффициентом самоиндукции $L_{ор}$. До прихода волн, отраженных от соседних опор, тросы замещаются своими волновыми сопротивлениями (с учетом импульсной короны) $\frac{1}{2} z_{тр.к}$ (см. рисунок 1.4, а).

В процессе многократных отражений от заземлений соседних опор тросы в пролете могут замещаться индуктивностью

$$L_{mp} = \frac{z_{mp}}{2} \cdot \frac{l}{c}, \qquad (1.9)$$

где z_{mp} – волновое сопротивление тросов без учета короны (корона не влияет на индуктивность), Ом;

l – длина пролета, м;
c = 300 м/мксек.

Расчетная схема для этого случая показана на рисунке б. Учитывая большое падение напряжения на L_{mp}, можно пренебречь сопротивлениями соседних опор, что и принято в схеме на рисунке 1.4, б.

Использование в расчетах двух схем неудобно. Учитывая, что в обоих схемах ток в тросах в начальные моменты времени мал, можно принять схему на рисунке 1.4, б в качестве расчетной при всех временах. Операторное уравнение для схемы на рисунке 1.4, б запишется в виде

$$a_м \frac{1}{p^2} = i_{on} + i_{mp} = i_{on} + \frac{\bar{u}_{on}}{pL_{mp}}, \qquad (1.10)$$

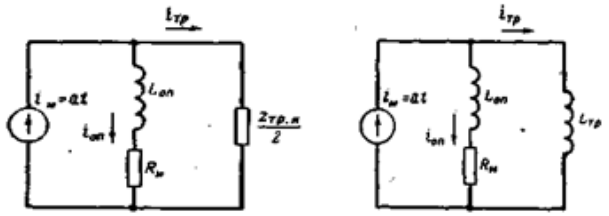
где $\bar{u}_{on} = \bar{i}_{on}(R_з + pL_{on})$.

Решение этого уравнения дает:

$$i_{on} = a_м tm\frac{1-e^{-\alpha t}}{\alpha t}; \qquad (1.11)$$

$$\frac{di_{on}}{dt} = a_м me^{-\alpha t}, \qquad (1.12)$$

где $\alpha = \frac{R_з}{L_{mp}+L_{on}}$; $m = 1-\frac{L_{on}}{L_{on}+L_{mp}}$.



а) б)

а - до прихода волн, б – после многократных отражений волн в пролете

Рисунок 1.4 – Расчетные схемы для определения тока в пораженной опоре при ПУМ в линию с тросами

Так, как обычно $L_{on} \prec\prec L_{mp}$, то $\alpha \approx R_з / L_{mp}$ и $т \approx 1$. Сопротивление заземления $R_з$ при вычислении коэффициента α обычно принимается для упрощения расчета равным $R_{\sim}$.

По известным значениям $i_{on}(t)$ и di_{on}/dt легко найти и напряжение на верхушке опоры:

$$u_{on} = i_{on}R_з + L_{on}\frac{di_{on}}{dt}. \qquad (1.12)$$

Как следует из приведенного вывода, членом $L_{on}\frac{di_{on}}{dt}$ учтена основная часть магнитной составляющей индуктированного напряжения.

Для определения напряжения, воздействующего на изоляцию линии, к напряжению u_{on} следует прибавить электрическую составляющую индуктированного напряжения на проводе $u_{пр} = u_{инд.э} = a_м L_э$ и учесть электромагнитное влияние тросов. Это влияние легко установить по схемам на рисунке 1.5. Мысленно разорвем трос вблизи опоры. Тогда на изоляцию провода и в месте разрыва опора–трос (пренебрегая различием высота h_{mp} и h_{on}) действует напряжение $u^*_{из} = u_{on} + u_{пр}$. По правилу Тевенена роль присоединенного троса выражается волной $u^*_{из}$ на тросе, которая индуктирует на проводе напряжение $k_к u^*_{из}$, где $k_к$ – коэффициент связи между тросом и проводом с учетом импульсной короны. Следовательно, полное напряжение, воздействующее на изоляцию пораженной опоры, с учетом электромагнитного влияния тросов, выражается формулой

$$u_{из}(t) = (u_{on} + u_{пр})(1 - k_к) = (u_з + u_{инд.м} + u_{инд.э})(1 - k_к) = \left(i_{on}R_и + L_{on}\frac{di_{on}}{dt} + a_м L_э\right)(1 - k_к). \qquad (1.13)$$

Коэффициент связи $k_к = k_0\gamma_к$,

где k_0 - геометрический коэффициент связи,

$\gamma_к$ - зависящий от величины напряжения поправочный коэффициент на импульсную корону. Средние значения $\gamma_к$ приведены в таблице 1.1.

Напряжение $u_{из}(t)$ нарастает до пересечения с $u-t$ характеристикой изоляции на опоре, и по времени пересечения $t_р$ определяется ток молнии $I_м = a_м t_р$, при котором наступает перекрытие изоляции.

Таблица 1.1 – Значения поправочного коэффициента $\gamma_к$ на импульсную корону при вычислении коэффициента связи $k_к$ (прямой удар молнии в опору)

Число тросов	Номинальное напряжение линии, кВ	
	35	110-220
1	1,1	1,2
2	1,15	1,25

Прямой удар молнии в линию без тросов. На линиях без тросов подавляющее число грозовых разрядов поражает провода линии. При ударе в провод токи молнии, ограниченные волновым сопротивлением линии, снижаются примерно вдвое по сравнению с разрядом в хорошо заземленный объект. Прямой удар молнии в провода приводит к растеканию тока молнии в обе стороны по пораженному проводу. Амплитуда волны перенапряжения на линии

$$U = \frac{I_м}{4} z_к + U_{инд}, \qquad (1.14)$$

где $I_м$ – ток молнии в хорошо заземленном объекте;

$z_к$ – волновое сопротивление провода с учетом импульсной короны.

При тех высоких напряжениях волн, которые возникают при прямом ударе молнии в провод, значение $z_{\hat{e}}$ можно принять равным 300 ом.

На линии с металлическими опорами волна перенапряжения с амплитудой U воздействует на изоляцию провода на опоре. Уже токи молнии порядка 5–10 кА, т. е. подавляющее большинство грозовых разрядов в линию, создают перенапряжения, достаточные для перекрытия гирлянды изоляторов, вплоть до высших классов номинального напряжения.

На линиях с деревянными опорами (см.рисунок 1.5) волна перенапряжения U воздействует на изоляцию провода относительно земли по пути гирлянда– траверса– стойка на опоре или по пути провод– земля в середине пролета, где габарит наименьший. Вследствие высокой изоляции относительно земли разряду на землю обычно предшествует импульсное перекрытие между проводами. Волна на пораженном проводе индуктирует напряжение на соседнем проводе в соответствии с коэффициентом связи проводов. Между проводами возникает напряжение

$$U = \frac{I_м}{4} z_к (1 - k_к) \qquad (1.15)$$

Волна напряжения воздействует на изоляцию по пути гирлянда–траверса–гирлянда. Индуктированные перенапряжения, возникающие на всех

трех фазах линии одновременно, не оказывают воздействия на междуфазную изоляцию.

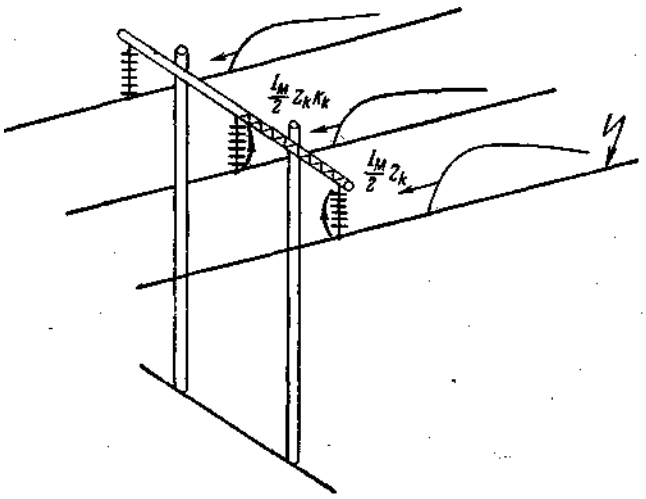


Рисунок 1.5 – Междуфазное перекрытие при поражении молнией линии на деревянных опорах

Приравнивая воздействующее напряжение 50%-ной импульсной прочности междуфазной изоляции $U_{из}$, находим из формулы (1.11) ток молнии, вызывающий перекрытие изоляции,

$$I_м = \frac{4U_{из}}{z_к(1-k_к)}. \qquad (1.16)$$

Удельное число перекрытий изоляции равно $п_{пер} = пP_I$, **у**дельное число отключений линии равно $п_{отк} = \eta п_{пер} = \eta пP_I$, а число отключений на 100 км в год $N_{отк} = п_{гр}\eta пP_I$. Значения η для линии на деревянных опорах определяется по формуле $\eta = (1{,}5E_{ср} - 4)\cdot 10^{-2}$.

Высокую надежность грозозащиты воздушных линий электропередачи обеспечивают следующие мероприятия:

1) подвеска грозозащитных тросов с достаточно малыми углами защиты;

2) снижение импульсного сопротивления опор;

3) повышение импульсной прочности изоляции линий и снижение вероятности установление дуги (в частности, этому способствует использование деревянных траверс и опор);

4) применение изолированной нейтрали или дугогасящего реактора;

5) использование автоматического повторного включения линий.

Для линий напряжением 220 кВ и выше, сооружаемых обычно на металлических или железобетонных опорах, основным средством грозозащиты являются тросы, располагаемые над фазными проводами. Импульсное сопро-

тивление заземлений опор, к которым присоединяются тросы, должно быть не более 15 Ом для линий 220 кВ, а для линий ПО кВ с железобетонными опорами - не более 20 Ом. При грунтах с удельным сопротивлением более 1000 Ом*м разрешаются более высокие значения сопротивления заземлений. Для уменьшения потерь энергии, возникающих из-за наведенного напряжения 50 Гц в контуре земля-опора-трос-опора-земля, заземление тросов производят не на каждой опоре, подвешивая трос на одном-двух изоляторах, зашунтированных искровым промежутком. Дополнительным средством уменьшения грозопоражаемости линий 220 кВ и выше является использование АПВ.

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

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

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

1) пересечения линий электропередачи между собой или с другими линиями;

2) опоры со сниженной электрической прочностью изоляции и высокие опоры переходных пролетов;

3) ответвления к подстанциям на отпайках и секционирующие разъединители на линиях;

4) кабельные вставки на линиях.

Исходя из условий надежности электроснабжения, допустимое число отключений воздушных линий в год принимают равным

$$n_{\text{откл.доп}} = \frac{N_{\text{доп}}}{(1 - \beta_{\text{АПВ}})}, \qquad (1.17)$$

где $N_{\text{доп}}$ – допустимое число перерывов электроснабжения в год ($N_{\text{доп}} \le 1$ при отсутствии резервирования и $N_{\text{доп}} \le 1$ при наличии резервирования), $\beta_{\text{АПВ}} \le 1$ – коэффициент успешности АПВ, равный 0,8-0,9 для линий 110 кВ и выше на металлических и железобетонных опорах.

2 Защита оборудования с помощью коммутационных защитных средств

2.1 Принцип действия и характеристики защитных аппаратов

Простейшим защитным устройством является искровой промежуток, включенный параллельно изоляционной конструкции. Конструктивно ЗП выполняются в виде стержневых электродов, создающих резконеоднородное поле. Для предупреждения перекрытия или пробоя изоляции вольт-секундная характеристика защитного искрового промежутка (ЗП) с учетом разброса должна в идеальном случае лежать ниже вольт-секундной характеристики защищаемой изоляции (рисунок 2.1).

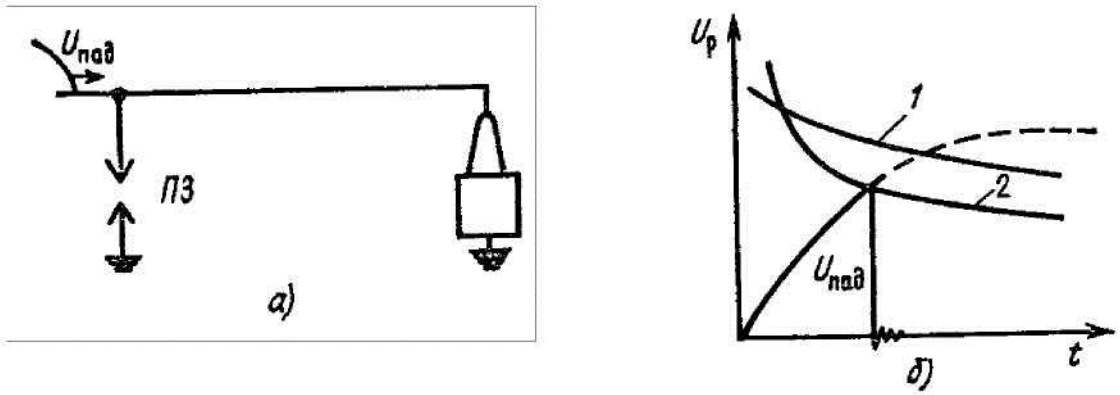


Рисунок 2.1 – Принцип действия защитного промежутка

При выполнении этого требования появление опасных для изоляции электроустановок перенапряжений невозможно, так как при набегании импульса напряжения U_{nad} происходит пробой ЗП с последующим резким падением напряжения.

Но вслед за импульсным током через защитный промежуток по ионизированному пути устремляется ток, обусловленный напряжением промышленной частоты — сопровождающий ток. При этом может не погаснуть и импульсный пробой переходит в устойчивое короткое замыкание, которое вызывает аварийное отключение электроустановки. Чтобы этого избежать, следует обеспечить гашение дуги сопровождающего тока.

Защитные аппараты, обеспечивающие не только защиту изоляции от перенапряжений, но и гашение дуги сопровождающего тока в течение времени меньшего, чем время действия релейной защиты, получили название защитных разрядников.

Переход импульсного тока при пробое ЗП в устойчивую дугу может сопровождаться аварийным отключением, поэтому ЗП желательно устанавливать лишь на тех участках сети, которые оборудованы устройствами автоматического повторного включения (АПВ).

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

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

1) срабатывание искровых промежутков приводит к короткому замыканию, которое должно отключаться выключателями; при переходном процессе среза напряжения могут возникнуть перенапряжения на продольной изоляции трансформаторов, реакторов и электрических машин;

2) большой статистический разброс пробивных напряжений затрудняет координацию изоляции;

3) вольт-секундная характеристика искрового промежутка из-за резкой неоднородности поля имеет подъем в области малых времен, соответствующих грозовым перенапряжениям, и защищаемая изоляция может остаться незащищенной (рисунок 2.1).

Вентильные разрядники являются другой разновидностью искровых промежутков, отличающихся слабой неоднородностью электрического поля и нелинейным резистором для гашения дуги. Защитная функция вентильным разрядником выполняется так же, как и простым искровым промежутком, но в связи с однородностью электрического поля вольт-секундная характеристика разрядника существенно лучше, чем у трубчатого, и меньше статистический разброс пробивных напряжений.

Отключение возникшего короткого замыкания производится с помощью нелинейного резистора, включенного последовательно с искровым промежутком. Сопротивление этого резистора велико при рабочем напряжении и резко снижается при повышенном напряжении. Нелинейные резисторы выполняются в виде дисков, состоящих из карборундового порошка (SiC) и связующего материала. Простейший единичный промежуток вентильного разрядника показан на рисунке 2.2, а. Промежуток составлен двумя латунными электродами, разделенными миканитовой шайбой.

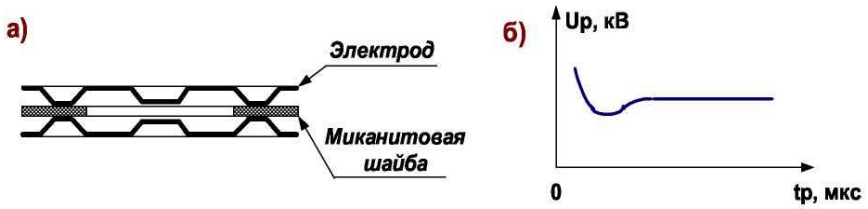


Рисунок 2.2 – Единичный искровой промежуток (а) и вид вольт-секундной характеристики разрядника с многократным искровым промежутком (б)

Единичные промежутки включаются последовательно друг с другом для улучшения гашения дуги, которая нестабильна в небольшом промежутке с холодными электродами. У многократного искрового промежутка, однако, происходит неравномерное распределение напряжения на отдельных промежутках, аналогично гирлянде изоляторов, что приводит к снижению пробивного напряжения при малых временах порядка 2-4 мкс (рисунок 2.2, б).

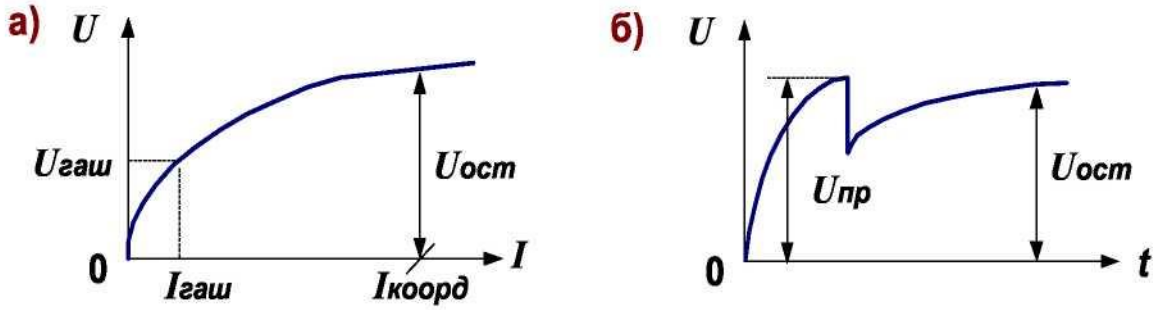


Рисунок 2.3 – Вольтамперная характеристика резистора вентильного разрядника (а) и напряжение на вентильном разряднике при его срабатывании (б)

Вентильные разрядники характеризуются:

1) номинальным напряжением;

2) наибольшим допустимым длительным напряжением на разряднике;

3) пробивным напряжением на частоте 50 Гц (обычно действующее значение);

4) остающимся напряжением на сопротивлении резистора при определенном импульсном токе (от 5 до 14 кА, в зависимости от типа разрядника), называемом током координации (см.рисунок 2.3).

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

6) пропускной способностью**,** то есть минимальным количеством нормированных импульсов тока, которые разрядник должен выдержать без существенного изменения его свойств. Это количество обычно равно 20.

2.2 Общая характеристика ОПН и их конструктивные особенности

ОПН на сегодняшний день являются одним из эффективных средств защиты оборудования электрических сетей. Данные аппараты обладают достаточно высокими эксплуатационными свойствами и надежностью. Нелинейные ограничители перенапряжений предназначены для использования в качестве основных средств зашиты электрооборудования станций и сетей среднего и высокого классов напряжения переменного тока

промышленной частоты от коммутационных и грозовых перенапряжений. При их разработке были использованы последние технологические достижения и опыт эксплуатации ОПН в отечественной и зарубежной практике. Ограничители рекомендуется применять вместо вентильных разрядников соответствующих классов напряжения при проектировании, эксплуатации, техническом перевооружении и реконструкции электроустановок.

ОПН, по сравнению с вентильными разрядниками, обладают целым рядом преимуществ:

– варисторы, применяемые в ОПН, обладают высокой стабильностью, которая не изменяется в процессе длительной эксплуатации;

– большое быстродействие срабатывания ОПН при коммутационных и грозовых перенапряжениях;

– отличные пиковые характеристики ОПН в широком диапазоне рабочей
температуры;

– применение варисторов в одно колонковом исполнении позволяет обеспечить особенно глубокое ограничение напряжений и, соответственно, более высокую надежность работы оборудования и улучшение параметров сети;

– уменьшение габарита и веса ОПН в 10 — 20 раз позволяет установить их непосредственно вблизи защищаемого оборудования;

– высокая механическая прочность и малая масса ОПН позволяет устанавливать их на ВЛ 6-110 кВ без усиления конструкции опор;

– ОПН в полимерном корпусе не требуют специального обслуживания, не повреждаются при транспортировке и хранении;

– малые массо-габариты ОПН позволяют легко выполнять их монтаж при минимальном использовании техники.

Под рабочим напряжением через ОПН протекает ток величиной доли миллиампер. Ток носит емкостной характер, вследствие чего в ОПН не выделяется активная мощность, и он может неограниченно долго находиться под рабочим напряжением. В результате ОПН не требует обслуживания и контроля параметров в процессе эксплуатации. Повышение напряжения, при появлении импульса перенапряжения, вызывает снижение активного сопротивления резисторов ОПН. Ток через ОПН возрастает до сотен ампер при появлении коммутационных перенапряжений и до тысяч ампер при воздействии грозовых перенапряжений. Резисторы ограничителя переходят в проводящее состояние и ограничивают дальнейшее нарастание перенапряжения до уровня, безопасного для изоляции защищаемого электрооборудования. Когда перенапряжение снижается, ограничитель вновь возвращается в непроводящее состояние.

Высоколинейные резисторы объемного типа (варисторы), применяемые в ОПН, выполнены из оксидно-цинковой или металлооксидной керамики – нелинейного материала, получаемого в результате высокотемпературного

обжига (до 1300 °С) специальной смеси. Смесь состоит из окиси цинка и некоторого количества оксида другого металла, например висмута, сурьмы, кобальта, марганца и т.п. Масса основной добавки составляет менее 4% массы оксида цинка. Коэффициент не линейности оксидно–цинковой керамики одного и того же образца составляет 0,02 - 0,06 и зависит от сочетания добавок к оксиду цинка и температуры обжига материала. Зависимость между напряжением, приложенным к образцу такого материала, и током в нем определяется общей для рассматриваемых материалов формулой. Коэффициент не линейности растет с увеличением значения тока, а при больших напряжениях начинает увеличиваться активная масса составляющего тока через оксидно-цинковый нелинейный рабочий резистор (НРР).

Вольт-амперная характеристика НРР из металлооксидной керамики зависит от температуры окружающей среды: при повышении температуры остаточное напряжение уменьшается, температурный коэффициент тока и коэффициент не линейности увеличиваются. Уменьшение остаточного напряжения при коротких импульсах несколько меньше, чем при длинных, например, отношение остаточного напряжения при длительности воздействия, равной одной микросекунде, к остаточному напряжению при длительности воздействия, равной восьми микросекундам, составляет 1,07.

Параметры материала НРР в значительной степени определяют срок службы ОПН. Основное значение имеют градиент напряжения, температурный коэффициент тока, температура окружающей среды, условия теплоотдачи, приложенное напряжение. В процессе старения возрастает активная составляющая тока и соответственно активная мощность. НРР выбирается из того или иного числа единичных дисковых резисторов, соединенных последовательно или последовательно-параллельно. Надежный электрический контакт между ними обеспечивается металлизацией их торцевых поверхностей и контактным нажатием.

При последовательном соединении единичных высоко нелинейных резисторов напряжение между ними распределяется очень неравномерно, что обуславливается не только емкостным распределением напряжения, но и различной электрической проводимостью отдельных резисторов, градиентом напряжения при заданном токе, тангенсом угла дельта диэлектрических потерь резисторов.

Градиент напряжения при гарантированной пропускной способности резистора при импульсе тока с максимальным значением 70 А и длительностью 3/8 мкс составляет 1,45-1,8 кВ/см, а тангенс диэлектрических потерь равен (или меньше) 0,09 увеличение числа последовательно соединенных резисторов уменьшает неравномерность распределения напряжения. Неравномерность проявляется в случае, когда заданное напряжение (градиент) приложено к небольшому числу единичных резисторов (ЕР); если же оно приложено к числу ЕР, в десять раз большему, то оно соответственно и распределяется на большее число объектов с уменьшением напряжения, приходящегося на каждый ЕР, с учетом активных

утечек которого неравномерность снижается. Выравнивание его по высоте аппарата достигается посредством трубчатого экранного кольца, закрепляемого на верхней крышке элемента, что существенно облегчает работу НРР.

Диски из оксидно – цинковой керамики помещается в специальную термоусаживаемую трубку (трубка полиэтиленовая радиационно – модифицированная), которая при нагревании вместе с дисками до температуры 170-180°С плотно облегает колонку из дисков, создавая продольное и поперечное давление. Продольное давление обеспечивает электрический контакт между отдельными дисками, а поперечное создает из разрозненных дисков одно конструктивное целое — колонку.

Пропускная способность НРР определяется площадью поперечного сечения ЕР и градиентом напряжения. Увеличение ее достигается увеличением диаметра дисков. Толщина диска ЕР определяется специальными расчетами, где решающее значение имеет обеспечение наибольшего теплоотвода с целью предотвращения прогорания материала диска по цепи протекания сопровождающего тока. Этот размер НРР определяется при разработке ОПН.

Развитие технологии производства полупроводников обеспечило к началу 70-х годов создание материалов с резко-нелинейными резистивными характеристиками на основе оксида цинка. В широком диапазоне изменения плотности тока (несколько порядков от 1 до 1000 $A/см^2$) напряжение на варисторах изменяется незначительно – примерно на 30%.

Такие материалы позволили создать принципиально новые защитные аппараты – ОПН. Отличительной особенностью этих аппаратов является отсутствие в них искровых промежутков, предотвращающих протекание значительного тока через варисторы при рабочем напряжений и обеспечивающие протекание значительного тока через варисторы только при перенапряжениях (как это происходит у разрядников). Резкая нелинейность ВАХ варисторов на основе оксида цинка позволяет ставить колонку варисторов непосредственно под рабочее напряжение, когда протекающий через колонку варисторов (КВ) активный ток составляет доли миллиампера.

При этом обеспечивается тепловой баланс варисторов: выделяемое в них тепло рассеивается в окружающее пространство и не происходит его накопления и постепенного повышения температуры варисторов вплоть до их разрушения. Тем не менее, обеспечение теплового баланса варисторов – важный вопрос, определяющий допустимые нагрузки на варисторы при рабочем напряжении.

Минимальная высота варисторов определяется исходя из задаваемой производителем наибольшей длительно допустимой напряженности варисторов $E_{в.н.р}$ и задаваемого потребителем наибольшего длительно допустимого напряжения сети в месте установки ограничителя $U_{н.р}$.

$$H_{к.мин} = \frac{U_{н.р}}{E_{в.н.р}} \cdot K_{н.р} \qquad (2.1)$$

где $K_{н.р}$ - коэффициент неравномерности распределения напряжения вдоль колонки варисторов при наибольшем рабочем напряжении.

Параметр $E_{в.н.р}$ чрезвычайно важен для обеспечения эксплуатационной способности ограничителя. Обычно он задается производителем на уровне $E_{в.н.р.} \approx 1 \div 1{,}5 кВ/см$. Однако, следует иметь в виду, что в зависимости от конструкции ограничителя (материал и толщина покрышки, размер внутренней полости между покрышкой и варисторами, ее заполнение) условия теплообмена варисторов с окружающей средой значительно изменяются. Поэтому и допустимое значение $E_{в.н.р}$ корректируется в зависимости от конструкции ОПН. Для этого предусмотрены испытания варисторов на старение в течение 1000 часов в макете, составляющем точную копию части ОПН определенной конструкции.

Увеличение сопротивления тепловому потоку от варисторов в окружающее пространство требует снижения наибольшей допустимой напряженности в варисторах. Не учет этого обстоятельства является одной из основных причин повреждения ОПН в эксплуатации.

При наибольшем рабочем напряжении на варисторах активная составляющая тока очень мала.

Значения емкостного тока при наибольшем рабочем напряжении варисторов различных диаметров приведены в таблице 2.1.

Таблица 1

Диаметр варисторов, мм	28	45	60	70	85	115	138
Активная площадь, $см^2$	6,2	16	28,3	38,5	51,4	93,7	136
$I_{в.с}, мА$	0,17	0,44	0,78	1,06	1,43	2,6	3,8

Таблица 2.2

Наибольшее рабочее напряжение ОПН, кВ	3,6	7,2	12	17,5	24	26,5	30	40,5
Высота колонки варисторов, мм	34	68	115	167	230	250	286	386

Таблица 2.3

Наибольшее рабочее напряжение ОПН, кВ	127	172	252	363	525	787	1200
Высота колонки варисторов, мм	0,73	1,0	1,45	2,1	3,03	4,5	6,93

При повышении класса напряжения сети высота колонки варисторов увеличивается. При этом емкостной ток с поверхности варисторов на землю увеличивается и приводит к искажению распределения напряжения вдоль колонки ОПН. Если не приняты меры по выравниванию распределения напряжения вдоль колонки, падение напряжения на части варисторов колонки может увеличиваться по сравнению со средним, а на части варисторов – уменьшаться. Увеличение падения напряжении на варисторах приводит к увеличению активного тока через них и соответственно к их перегреву и преждевременному повреждению. Поэтому степень неравномерности распределения напряжения вдоль колонки варисторов должна быть ограничена специальными мерами (например, до уровня $К_{н.р} \prec 1{,}05$ с помощью системы экранов).

В таблицах 2.2 и 2.3 приведены результаты вычислений по формуле максимальных высот колонки варисторов для ОПН, работающих в сетях с изолированной 2 и заземленной нейтралью при $Е_{в.н.р.} = 1{,}05 кВ/см$.

Дополнительный емкостной ток протекает через варисторы при увлажнении их поверхности, т.к. при этом резко изменяется распределение напряжения вдоль варисторов, и возникает большая разница потенциалов между увлажненной поверхностью покрышки и варисторами. Эта разница потенциалов и является причиной появления дополнительного тока через варисторы. Повышенный ток через варисторы при длительном увлажнении приводит к падению напряжения на них, увеличению активного тока, к нарушению теплового баланса, перегреву варисторов и их преждевременному разрушению.

ОПН фирмы «АВВ» (рисунок 2.4) в полимерном корпусе могут состоять из одного или нескольких модулей, каждый из которых содержит одну колонку варисторов. Варисторы не обладают «кумулятивным» эффектом, т.е. их вольт-амперная характеристика не зависит от числа срабатываний ОПН. Силиконовая покрышка наносится на активную часть методом непосредственного вакуумного литья в специальной холдинговой машине.



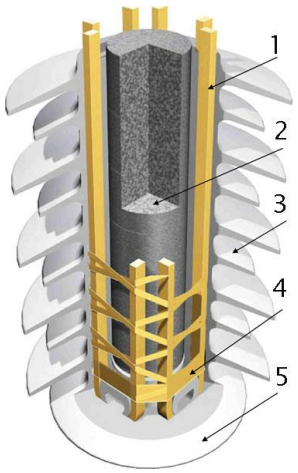
Рисунок 2.4 – ОПН фирмы «АВВ»

Фланцы соединены друг с другом двумя или более усиливающими элементами из стекловолокна, что придает ОПН высокие механические

характеристики. Благодаря тому, что силиконовая изоляция наносится непосредственно на вариаторы, внутри нет воздуха и, как следствие, отсутствуют внутренние частичные разряды. Кроме того, улучшаются условия охлаждения варисторов, что улучшает энергопоглащающую способность ОПН.

ОПН фирмы «ABB» состоит из внешнего изолятора, выполненного из негаллогенированной силиконовой резины с концевыми фланцами и выводами, выполненными из нержавеющей стали, алюминия или меди. Внутренняя часть ОПН состоит из металлооксидных варисторов, стальных прокладок, алюминиевыхкомпонентов, стекловолоконных стяжек и арамидных волокон. Металлоксидные варисторы представляют собой агломератные «таблетки», состоящие в основном из ZnO (90%) и др. веществ (более 1%): Bi_2O_3, Sb_2O_3, NiO, Cr_2O_3. Металлоксидные варисторы покрыты слоем тонкого стекла (<0,1 % веса), содержащим PbO.

Силиконовая резина, используемая для внешней изоляции, обладает значительно более высокой гидрофобностью и стойкостью к воздействию ультрафиолетовой радиации, чем фарфоровая изоляция. Кроме того, применение полимерной изоляции снижает массогабаритные параметры ОПН, что расширяет возможность их применения. ОПН «ABB» серии PEXL1M (см.рисунок 2.2) могут монтироваться по так называемой «перевернутой» схеме, когда подвод напряжения осуществляется снизу.



1 – усиливающие элементы; 2 – варисторы; 3 – покрышка новой резины;
4 – защитная лента; 5 – фланец

Рисунок 2.5 – Конструкция ОПН серии PEXLIM

Использование полимерной изоляции также повышает взрывобезопасность ОПН и позволяет избавиться от специальных устройств по сбросу давления. На внутренней стенке полимерного корпуса имеются специальные насечки, и в случае внутреннего перекрытия аппарата происходит разрыв корпуса в этих местах.

3 Защита подстанции от набегающих волн

3.1 Механизм формирования набегающих волн

Причиной возникновения на подстанции опасных перенапряжений от набегающих волн являются грозовые поражения воздушных линий (ВЛ) электропередачи. При ударе молнии в линию на проводах ВЛ образуется волна напряжения, движущаяся в сторону подстанции. Амплитуда такой волны ограничена импульсной прочностью линейной изоляции.

Можно выделить три основных случая прямого поражения молнией ВЛ с тросами (рисунок 3.1):

1) удар молнии в фазный провод при прорыве сквозь тросовую защиту (или при отсутствии таковой);

2) удар молнии в вершину опоры;

3) удар молнии в молниезащитный трос.

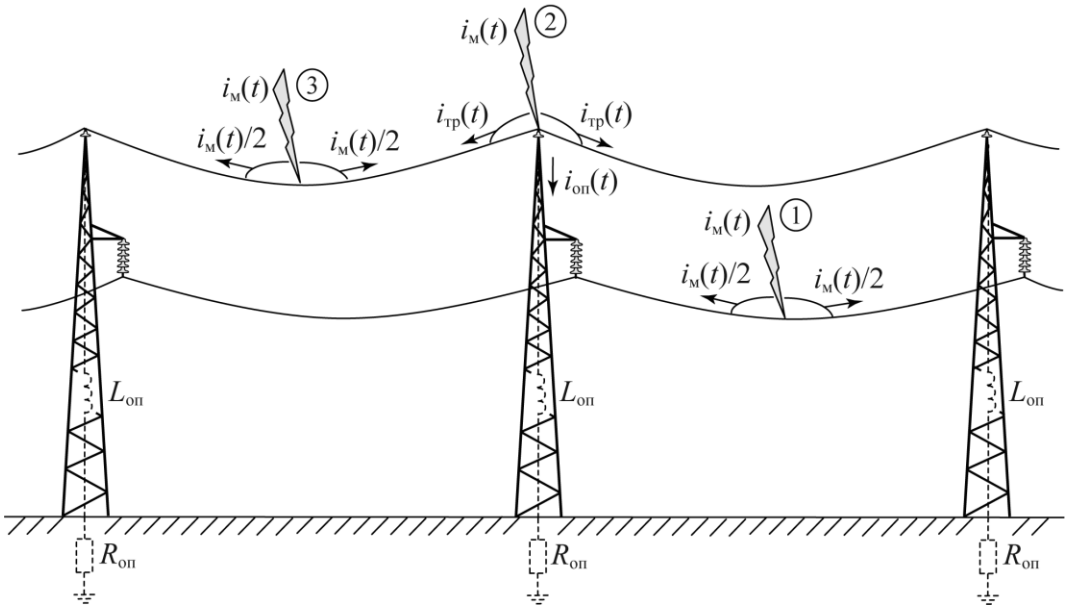


Рисунок 3.1 - Расчетные случаи поражения ВЛ молнией

В первом случае на фазном проводе сразу формируются две электромагнитные волны, движущиеся в противоположные стороны по волновым каналам линии. Рассматривая задачу приближенно в однофазной постановке можно принять для линии волновое сопротивление прямой последовательности Z_c. Тогда напряжение бегущей по линии волны можно оценить приближенно следующим образом:

$$u_в(t) = Z_c \frac{i_м(t)}{2}. \qquad (3.1)$$

Так как ток молнии достигает своего амплитудного значения (десятки килоампер) за время порядка нескольких микросекунд, то на ближайшей к точке удара молнии гирлянде изоляторов напряжение начинает быстро нарастать. Гирлянда изоляторов обладает импульсной электрической прочностью, которая имеет статистический разброс. В расчетах импульсную прочность гирлянды принимают равной 50%-ному разрядному напряжению $U_{50\%}$ – максимальному значению стандартного грозового импульса напряжения (1,2/50 мкс), при котором разряд наступает в 50% всех случаев подачи напряжения. Как только напряжение на гирлянде изоляторов превысит ее импульсную прочность, произойдет перекрытие гирлянды, и большая часть тока стечет в землю по заземлителю опоры. В сторону подстанции отправится волна, ограниченная по амплитуде импульсной прочностью гирлянды $U_{50\%}$.

При ударе молнии в опору напряжение на фазном проводе ВЛ сначала определяется только составляющими, индуктированными электромагнитным полем канала молнии. Большая часть тока молнии протекает по опоре, создавая падение напряжения на индуктивности опоры $L_{оп}$ и на импульсном сопротивлении ее заземлителя $R_{оп}$. Если ток молнии и крутизна его фронта окажутся достаточно большими, то разность потенциалов между вершиной опоры и фазным проводом превысит импульсную прочность гирлянды изоляторов, что приведет к обратному перекрытию. При этом на фазном проводе практически мгновенно появится напряжение и по линии в сторону подстанции отправится волна с отвесным фронтом.

При ударе молнии в трос ток молнии растекается между соседними опорами. При этом возможно возникновение как обратного перекрытия гирлянды изоляторов на опоре, так и пробоя воздушного промежутка «молниезащитный трос-фазный провод». В обоих случаях на фазном проводе ВЛ формируются волны с отвесным фронтом, движущиеся в сторону подстанции.

Во всех трех случаях грозового поражения ВЛ от места перекрытия в сторону подстанции движется электромагнитная волна, амплитуда которой может быть принята равной $U_{50\%}$. Если эта волна образовалась в результате обратного перекрытия, то ее начальная длительность фронта $\tau_{ф,0}$ может быть в расчетах принята равной нулю.

Приход волны напряжения на подстанцию приводит к возникновению волнового переходного процесса, в результате которого на изоляции электрооборудования могут возникнуть опасные перенапряжения. Поэтому для защиты изоляции оборудования применяются ОПН (ограничители перенапряжений нелинейные), пришедшие на смену вентильным разрядникам (РВ). Серийный выпуск РВ прекращен с 1997 года, но в эксплуатации находится еще много таких устройств.

Если бы ОПН или РВ располагались в непосредственной близости от защищаемого ими электрооборудования, то напряжение на его изоляции не превышало бы остающегося напряжения защитного аппарата, и защита была бы достаточно надежной. На практике защитные аппараты устанавливают у

силовых трансформаторов и автотрансформаторов и, возможно, еще в нескольких местах. Поэтому часть оборудования удалена от защитных аппаратов на расстояния, которые могут достигать нескольких десятков метров и более. Приход волны грозового происхождения с крутым фронтом приводит к возникновению переходного процесса, сопровождающегося высокочастотными колебаниями вокруг остающегося напряжения ОПН или РВ. Амплитуда перенапряжений на оборудовании при этом тем больше, чем больше крутизна набегающей волны и его удаленность от защитного аппарата.

Для понимания механизма формирования перенапряжений, воздействующих на изоляцию электрооборудования, можно рассмотреть две упрощенные схемы замещения подстанции. Первая схема (см.рисунок 3.2,а) составлена для оборудования, расположенного до защитного аппарата по ходу движения волны, это в первую очередь относится к измерительным трансформаторам напряжения и тока. Вторая схема (см.рисунок 3.2,б) является типичной для защиты от перенапряжений силового трансформатора.

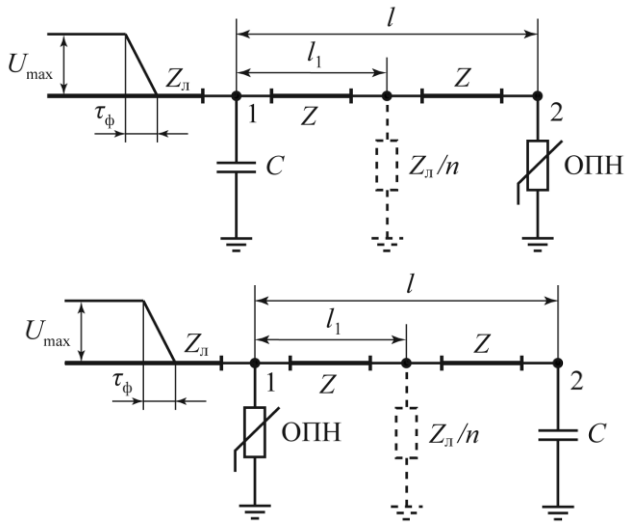


Рисунок 3.2 – Упрощенные схемы замещения подстанции

На обеих схемах показаны линия электропередачи с волновым сопротивлением $Z_л$, участки ошиновки суммарной длиной l и ОПН. Набегающая волна $u_{над}$ представлена стилизованным косоугольным импульсом с длительностью фронта $\tau_ф$ и амплитудой $U_{max} = U_{50\%}$. Пунктиром обозначено эквивалентное волновое сопротивление отходящих линий $Z_{экв}=Z_л/n$, где n–число линий. Электрооборудование подстанции (трансформаторы, выключатели, разъединители) для расчета волновых процессов замещают емкостями (замещение трансформатора емкостью справедливо только для первых микросекунд переходного процесса, пока индуктивности препятствуют прохождению через них импульсных токов).

На рисунке 3.3 приведены идеализированные осциллограммы напряжений в точках 1 и 2 схемы рисунка 3.2 а. Они построены в предположении, что емкость электрооборудования С = 0, а ОПН имеет идеальную вольтамперную характеристику – при напряжениях меньше $U_{ост}$ его сопротивление равно бесконечности, а при превышении уровня $U_{ост}$ становится равным нулю его динамическое сопротивление (напряжение на ОПН при этом неизменно и равно $U_{ост}$). В момент времени t = 0 набегающая с линии волна приходит в точку 1 и на оборудовании напряжение $u_и$ начинает линейно возрастать (см.рисунок 3.3,а). Через время $\tau = l/v$ (v можно принять равной скорости света) волна придет в точку 2. До тех пор, пока ОПН находится в непроводящем состоянии, отраженная от него волна будет равна падающей, а напряжение на нем будет нарастать с удвоенной скоростью. Когда оно достигнет уровня $U_{ост}$ напряжение на ОПН стабилизируется, а отраженная волна начнет уменьшаться, меняя знак на обратный:

$$u_{отр} = U_{ост} - u_{пад} = U_{ост} - U't, \tag{3.2}$$

где $U' = U_{50\%}/\tau_ф$ – крутизна фронта набегающей волны.

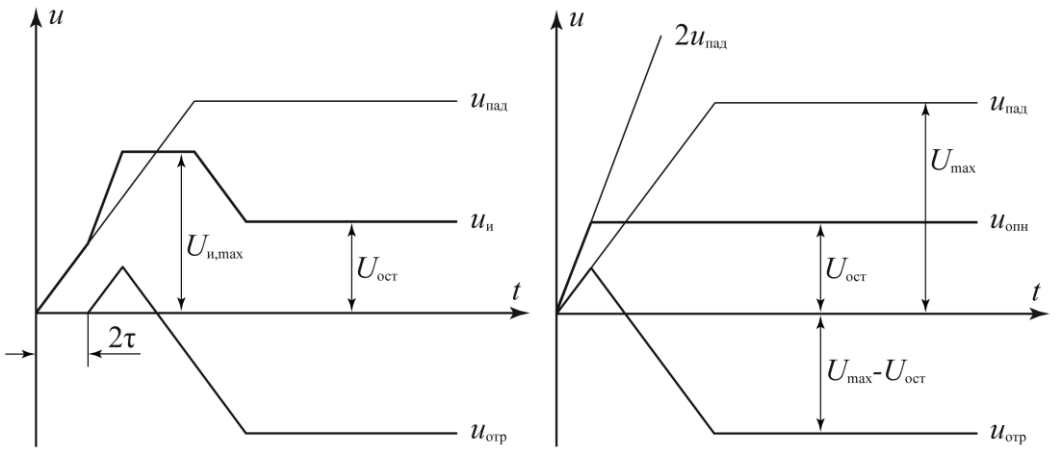


Рисунок 3.3 – Формирование напряжений в схеме

Отраженная волна вернется в точку 1 в момент времени $t = 2\tau$, накладываясь на напряжение набегающей волны (см.рисунок 3.3,а). Результирующее напряжение на изоляции электрооборудования оказывается неизменным и равным:

$$\begin{aligned} u_и &= u_{пад}(t) + u_{отр}(t - 2\tau) = U't + U_{ост} - U'(t - 2\tau) = \\ &= U_{ост} + U'2\tau = U_{ост} + U'2\frac{l}{v}. \end{aligned} \tag{3.3}$$

Эта формула справедлива при $\tau_ф > 2\tau$ и позволяет сделать оценку максимального напряжения $U_{и,max}$ на изоляции электрооборудования в точке 1. За пределами фронта набегающей волны напряжение на оборудовании снижается до остающегося значения $U_{ост}$.

При учете емкости электрооборудования и действительной вольтамперной характеристики ОПН напряжения оказываются такими, как показано на рисунке 3.4,а. Преломление волны в точке 1 при учете емкости происходит со сглаживанием фронта. Отраженная от ОПН волна также сглаживается емкостью, и результирующее напряжение на изоляции оборудования изменяется более плавно, чем при отсутствии емкости.

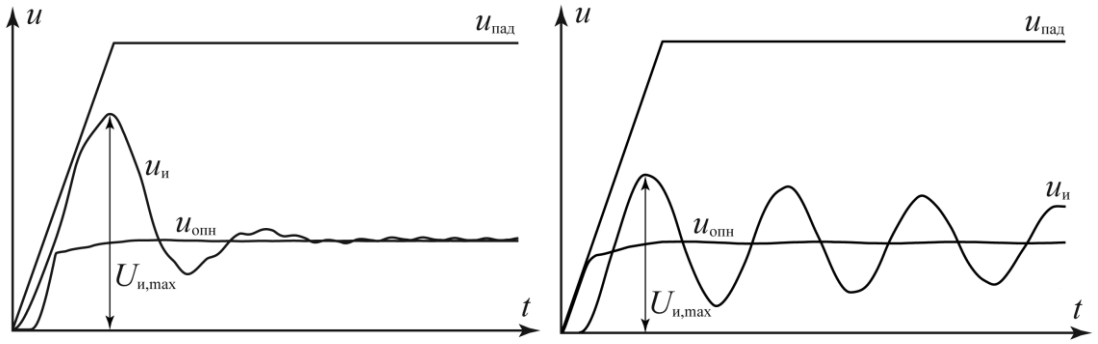


Рисунок 3.4 – Характерные формы перенапряжений на подстанционном электрооборудовании

Отходящие от подстанции линии снижают уровень перенапряжений. Если отходящая линия удалена от электрооборудования на расстояние l_1 (рис. 1,а), то в этой точке на схеме замещения следует включить ее волновое сопротивление $Z_л$. Пройдя расстояние l_1, набегающая волна отражается от точки включения отходящей линии. Коэффициент отражения при этом отрицательный, а его значение зависит от числа отходящих линий. К оборудованию возвращается отраженная волна, и ее напряжение, накладываясь на напряжение набегающей волны, снижает перенапряжение (так как напряжение отраженной волны отрицательно). Чем дальше от точки 1 расположена отходящая линия, тем позже приходит отраженная от нее волна и тем меньшим оказывается ее влияние.

Проанализируем перенапряжения в точках подстанции, расположенных за ОПН по ходу распространения волны (схема рисунок 3.2 ,б). Будем считать, что когда набегающая волна достигает на ОПН уровня $U_{ост}$, он переходит в проводящее состояние и напряжение на нем перестает изменяться. Поэтому после преломления набегающей волны в точке 1 к емкости электрооборудования распространяется волна с амплитудой $U_{ост}$. Если пренебречь емкостью оборудования (C=0), то волна будет отражаться от точки 2 с коэффициентом отражения $\beta=1$. Возвращаясь в точку 1, волна отражается с $\beta=-1$ (так как пренебрегаем сопротивлением ОПН). Процесс последовательных отражений волны от точек 1 и 2 будет периодическим, в

результате напряжение в точке 2 будет колебаться вокруг значения $U_{ост}$, амплитуда колебаний составит $2U_{ост}$. Если учесть емкость оборудования и вольтамперную характеристику ограничителя, то напряжение на оборудовании примет форму униполярного колебательного импульса (см. рисунок 3.4,б).

При грозовых перенапряжениях имеют место следующие закономерности:

– амплитуда импульса грозового перенапряжения на электрооборудовании тем больше, чем дальше расположен защитный аппарат и чем больше крутизна фронта набегающей волны;

– форма импульса грозового перенапряжения на электрооборудовании, расположенном до ОПН, характеризуется коротким пиком, после которого напряжение снижается до значения, близкого к остающемуся напряжению ограничителя (см. рисунок 3.4,а);

– форма импульса грозового перенапряжения на электрооборудовании, расположенном за ОПН, имеет характер затухающих колебаний, накладывающихся на остающееся напряжения ограничителя (см. рисунок 3.4,б), т.е. униполярного колебательного импульса с периодом колебаний порядка нескольких микросекунд; огибающая максимумов этих колебаний, как правило, спадает быстрее, чем стандартный грозовой импульс 1,2/50 мкс.

Уровень перенапряжений зависит от параметров ОПН и уменьшается в случае применения ОПН с меньшими остающимися напряжениями.

Расчет грозовых перенапряжений в реальных схемах подстанций осуществляется с помощью численного моделирования. Для исследования на расчетной модели нужно составить схему замещения подстанции, используя план подстанции с обозначением расстояний по ошиновке и соединительным проводам. Электрооборудование следует заменить сосредоточенными емкостями. Значения этих емкостей для основных видов электрооборудования класса напряжения 110 кВ сведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Входные емкости электрооборудования ПС 110 кВ

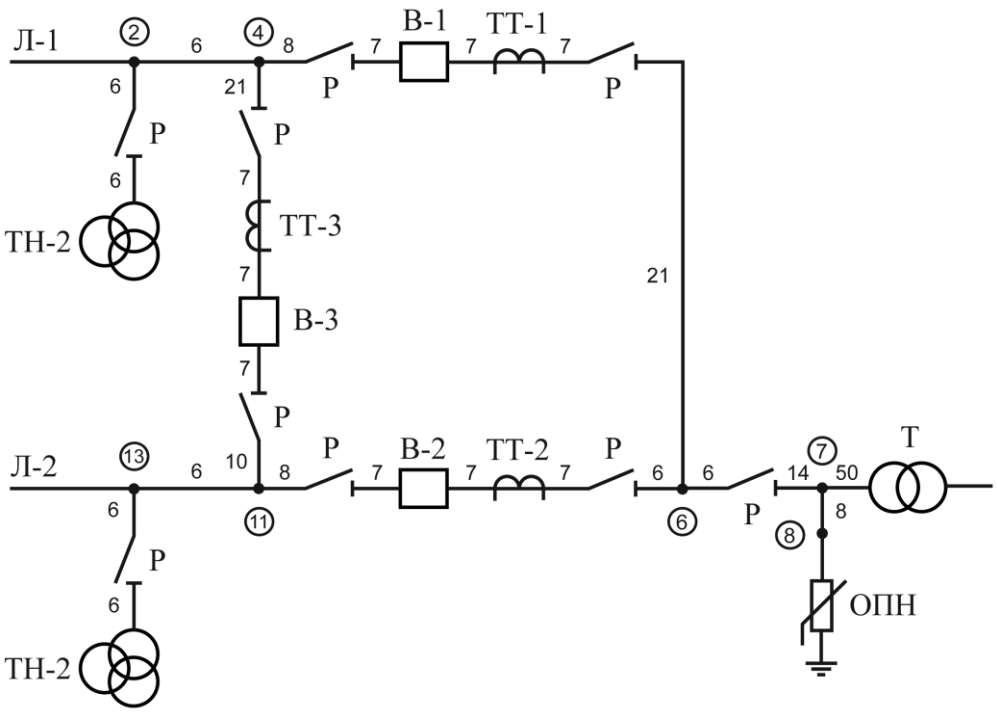
Наименование оборудования	Значения входных емкостей, пФ
Силовые трансформаторы и автотрансформаторы	1500
Электромагнитные трансформаторы напряжения	300
Трансформаторы тока	150
Выключатели масляные (вкл./выкл.)	800/500
Разъединители (вкл./выкл.)	60/40

На рисунке 3.5 представлена схема ОРУ 110 кВ (треугольник), а на рисунке 3.6,а – расчетная схема замещения. Цифры в схеме на рисунке 3.5, а также подчеркнутые цифры на рисунке 3.6,а указывают расстояния в метрах между аппаратами или узловыми точками, цифры у емкостей – значения емкостей в пикофарадах. Полученная схема может быть исследована

непосредственно на расчетной модели, но ее можно упростить для экономии расчетного времени.

Наибольший интерес представляет определение напряжений в точках, наиболее удаленных от защитных аппаратов, – на трансформаторе напряжения, линейном разъединителе и силовом трансформаторе. Поэтому перед преобразованием схемы необходимо наметить точки (узлы), которые должны быть сохранены (именно эти узлы пронумерованы на схеме рисунка 3.6,а). Затем можно упростить схему, разнеся часть емкостей в намеченные узлы по правилу моментов. Упрощенная схема представлена на рисунке 3.6,б.

Для оценки надежности защиты подстанционного электрооборудования от набегающих волн необходимо сопоставить расчетные импульсные напряжения, которые могут возникать на изоляции, с ее электрической прочностью. Расчетные напряжения следует определять с учетом ряда случайных факторов – фазы рабочего напряжения в момент прихода набегающей волны и ее формы (амплитуды, длительности фронта и импульса, частоты наложенных колебаний). Форма набегающей волны, в свою очередь, зависит от места грозового поражения ВЛ и параметров тока молнии, также являющихся случайными. Таким образом, строгое определение расчетных напряжений – задача, которая принципиально должна решаться с помощью методов теории вероятностей и математической статистики.

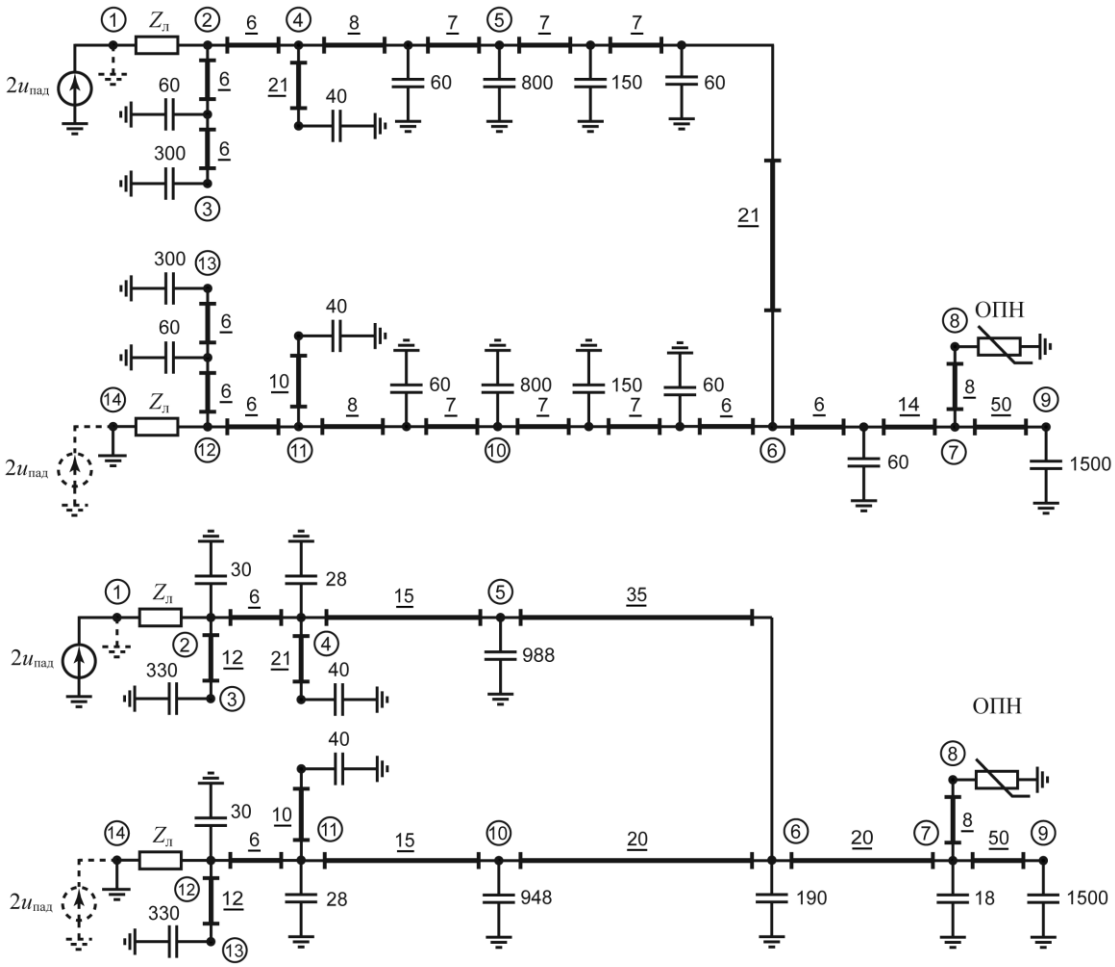


Л-1, Л-2 – подходящие воздушные линии электропередачи; ТН-1, ТН-2 – трансформаторы напряжения; ТТ-1, ТТ-2, ТТ-3 – трансформаторы тока; Т – силовой трансформатор; В-1, В-2, В-3 – масляные выключатели; Р – разъединители

Рисунок 3.5 – Схема ОРУ 110 кВ

Сопоставление расчетных напряжений с электрической прочностью изоляции электрооборудования можно выполнить следующим образом. Для каждого вида оборудования в ГОСТ 1516.3 регламентированы испытания грозовыми импульсами и нормированы значения испытательных напряжений. Для учета отличий между условиями при испытаниях и в эксплуатации вводят понятие допустимого напряжения, которое определяют по-разному для внутренней и внешней изоляции оборудования.

При определении допустимых напряжений необходимо учитывать отличие формы расчетного и испытательного импульсов напряжения. Для внешней изоляции следует также учитывать отличие атмосферных условий (давления, температуры, влажности) от тех, к которым приведены испытательные напряжения.



а – полная; б – упрощенная

Рисунок 3.6 – Схема замещения ОРУ 110

Требования ПУЭ определены для ряда типовых схем, если же схема или компоновка распределительного устройства отличается от типовой, то

необходимо выполнять специальные расчеты защиты подстанции от набегающих волн.

Для оценочных расчетов надежности защиты подстанции от набегающих волн допустимое напряжение для внутренней изоляции трансформаторов может рассчитано по формуле:

$$U_{\text{доп}} = 1{,}1\left(U_{\text{ПГИ}} - 0{,}5U_{\text{ном}}\right), \tag{3.4}$$

где $U_{\text{ПГИ}}$ - испытательное напряжение полным грозовым импульсом;

$U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение сети.

Эта формула учитывает отличие формы импульса воздействующего напряжения от стандартной формы, а также влияние рабочего напряжения. При использовании этой формулы расчет грозовых перенапряжений следует проводить без учета напряжения промышленной частоты.

Допустимое напряжение для внешней изоляции (вводов, разъединителей, выключателей и др.) определяется вольт-секундной характеристикой (ВСХ) для стандартного испытательного импульса 1,2/50 мкс. Если ВСХ неизвестна, то ее можно приближенно оценить через испытательные напряжения полным и срезанным грозовыми импульсами с помощью следующей формулы:

$$U_{\text{доп}}(t) = B_0\sqrt{1+\frac{T_0}{t}}\,. \tag{3.5}$$

Коэффициенты B_0 и T_0 определяются подстановкой в эту формулу испытательного напряжения срезанным грозовым импульсом при времени 2 мкс и полным грозовым импульсом при времени 8 мкс, и решением получившейся системы уравнений.

Как было установлено при анализе простых схем, перенапряжения на электрооборудовании тем больше, чем круче фронт набегающей волны. Существует критическая крутизна фронта, превышение которой может вызывать перенапряжения, превышающие допустимые напряжения для изоляции. Оценив значение критической крутизны, можно рассчитать среднее число лет безаварийной работы подстанции.

Таблица 3.2 -Рекомендуемые показатели надежности защиты подстанции

$U_{\text{ном}}$, кВ	35	110	220	330	500	750	1150
М, годы	200-300	300-400	400-600	600-800	800-1000	1000-1200	1200-1500

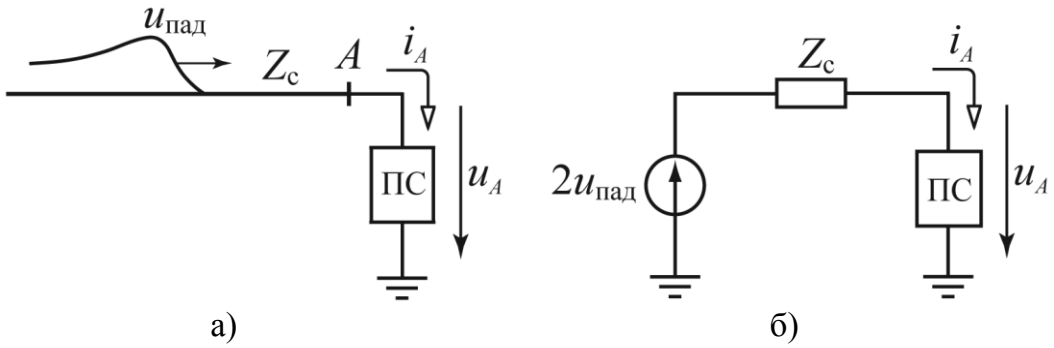
Расчетное определение критической крутизны можно выполнить с помощью компьютерного моделирования. Для электрооборудования наиболее

удаленного от ОПН или РВ выполняется серия расчетов перенапряжений при последовательном увеличении крутизны фронта импульсного источника.

3.2 Волновые процессы при набегании электромагнитной волны на узел неоднородности

Процессы, протекающие на подстанции при воздействии набегающих с линии волн, кратковременны. Их длительность составляет десятки микросекунд, а максимальные перенапряжения возникают в течение нескольких микросекунд переходного процесса. Длительности фронта воздействующих напряжений оказываются соизмеримыми с временами пробега волн по участкам ошиновки распределительного устройства, что приводит к необходимости учета волнового характера процессов при качественном анализе и в численном моделировании.

Если предположить, что электромагнитная волна распространяется только по одному волновому каналу линии электропередачи (с параметрами прямой последовательности), то задачу расчета волнового переходного процесса на подстанции можно решать в однофазной постановке. На рисунке 3.7,а показан случай набегания волны напряжением $u_{пад}$ по однопроводной линии с волновым сопротивлением Z_c. Электрооборудование подстанции на рисунке показано двухполюсником, подключенным к линии в точке А.



а – поясняющая схема; б – расчетная схема замещения

Рисунок 3.7 – Набегание волны на узел неоднородности

В соответствии с общим решением волновых уравнений линии напряжение в каждой ее точке (и, в частности, в точке А) представляет собой сумму двух волн, движущихся в противоположных направлениях, – падающей $u_{пад}$ и отраженной $u_{отр}$:

$$u_A = u_{пад} + u_{отр}. \qquad (3.6)$$

Ток, протекающий через точку А, определяется разностью двух волн:

$$i_A = i_{\text{пад}} - i_{\text{отр}}. \quad (3.7)$$

Напряжение $u_в$ и ток $i_в$ бегущей по линии волны пропорциональны друг другу:

$$u_{\text{в}} = Z_c i_{\text{в}}, \quad (3.8)$$

где $Z_с$ – волновое сопротивление линии, которое для прямой последовательности линий 110–750 кВ находится в диапазоне 250÷400 Ом.

Умножая (3.7) на $Z_с$ и складывая с (3.6), получим с учетом (3.8):

$$2u_{\text{пад}} = Z_c i_A + u_A. \quad (3.9)$$

При исследовании волновых процессов на подстанции необходимо учитывать отходящие от нее линии. Это представление справедливо до тех пор, пока в начале линии не появится отраженная волна, т.е. в течение двух времен пробега волны по отходящей линии. При этом напряжение в начале линии относится к втекающему в нее току так же, как соотносятся друг с другом напряжение и ток падающей волны, т.е. входное сопротивление линии определяется ее волновым сопротивлением.

Обычно время пробега волны по отходящей линии значительно больше характерных времен волнового процесса на подстанции, поэтому замещение отходящей линии волновым сопротивлением справедливо.

Участки ошиновок на подстанции в схеме замещения представить волновыми сопротивлениям нельзя, так как время пробега волны по ним в большинстве практических случаев меньше длительности фронта набегающей волны. Поэтому задачи расчета грозовых перенапряжений на подстанции приходится решать с помощью численного моделирования на компьютере. Для расчета волновых процессов компьютерные программы используют для представления ошиновок модели длинных линий, реализующие для учета конечного времени пробега волны по ошиновке метод бегущих волн.

3.3 Исследование возникновения и развития грозовых перенапряжений

Лабораторный стенд «Компьютерная высоковольтная лаборатория» создан на базе программы EMTLab, разработанной на кафедре ТЭВН МЭИ. Расчетная модель подстанции для расчета грозовых перенапряжений показана на рисунке 3.8.

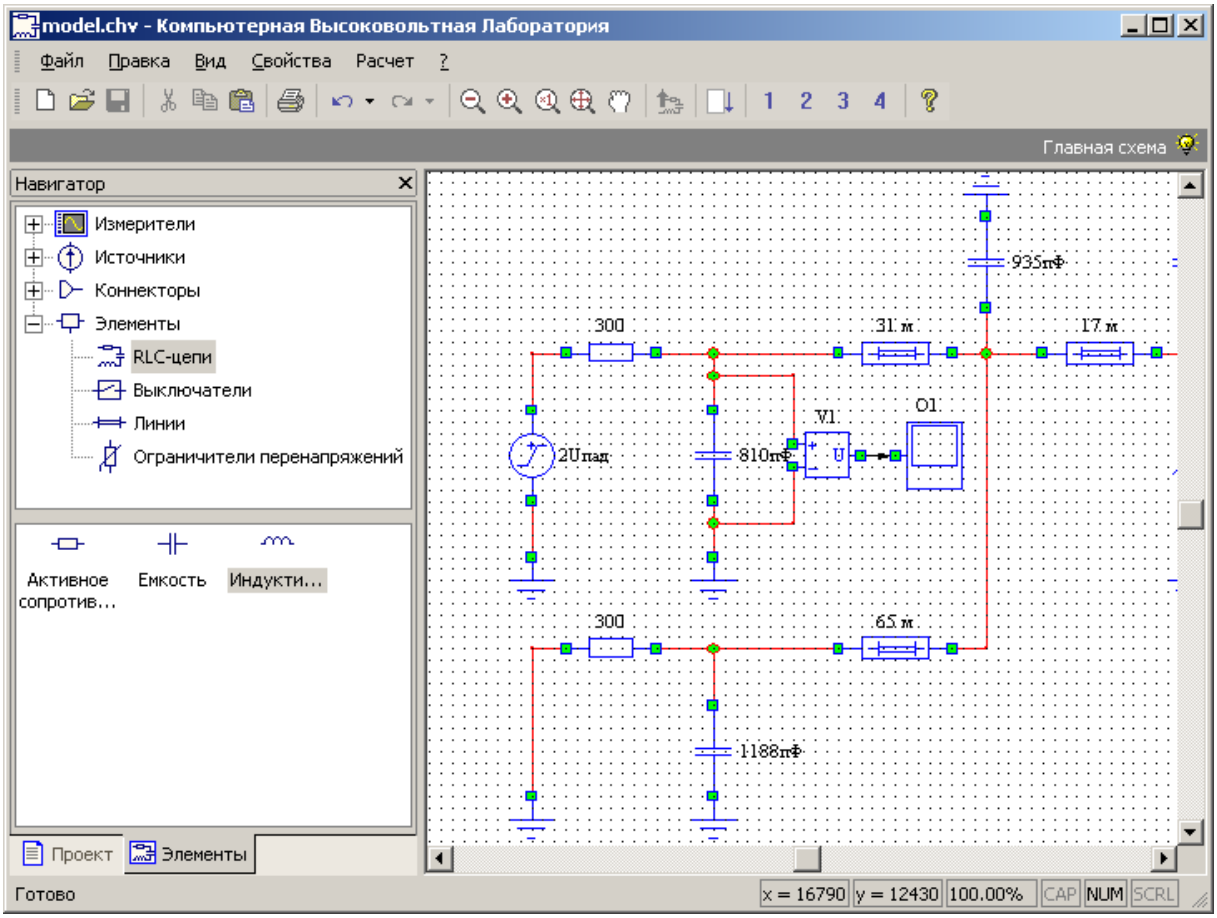


Рисунок 3.8 - Расчетная модель подстанции в программе «Компьютерная высоковольтная лаборатория»

Для добавления соединений необходимо щелкнуть левой кнопкой мыши по узлу элемента или общему узлу нескольких соединений, что автоматически переводит программу в режим рисования соединений. При последующих нажатиях левой кнопки мыши будет выполняться добавление промежуточных точек в создаваемое соединение. Для завершения рисования нового соединения необходимо щелкнуть левой кнопкой мыши по требуемому конечному узлу. Для отмены добавления нового соединения во время его рисования можно воспользоваться пунктом «Отменить соединение» контекстного меню, доступного по нажатию правой кнопки мыши, или клавишей **Esc**.

Для удаления элементов или соединений из схемы необходимо сначала выделить их, а затем нажать клавишу Delete. Для копирования элементов и соединений также необходимо сначала выделить их, а затем воспользоваться кнопкой «Копировать» Панели инструментов или комбинацией клавиш Ctrl + C. Для удаления объектов из схемы и помещения их в буфер для последующей вставки можно воспользоваться кнопкой «Вырезать» Панели инструментов или комбинацией клавиш Ctrl + X. Вставка скопированных (или

«вырезанных») ранее объектов выполняется с помощью кнопки «Вставить» Панели инструментов или нажатием комбинации клавиш Ctrl + V.

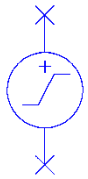
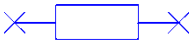
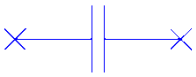
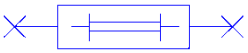
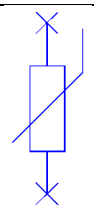
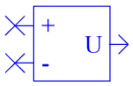
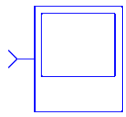
Для масштабирования схемы и быстрой навигации по ней можно воспользоваться кнопками «Увеличить», «Уменьшить», «Показать все» и «Перетащить» в Панели инструментов или в контекстном меню, доступном по нажатию правой кнопки мыши. Для удобства работы с программой эти режимы масштабирования также доступны с помощью колеса мыши. Так, увеличение и уменьшение схемы производится при прокрутке колеса мыши. При нажатии на колесо мыши и удерживании его в нажатом состоянии возможно перемещение схемы. В свою очередь, автоматическое масштабирование «Показать все», позволяющее отобразить на экране целиком всю схему, осуществляется двойным щелчком по колесу мыши.

Измерение напряжений и токов в расчетной модели выполняется с помощью блоков Вольтметр и Амперметр. Для вывода измеренных значений напряжений и токов на экран используется блок вывода Осциллограф, в котором вывод расчетных осциллограмм выполняется в отдельном окне, открывающемся по двойному щелчку мыши на блоке осциллографа. На одном осциллографе можно вывести несколько осциллограмм одновременно, их число определяется количеством входов (входных портов) осциллографа. Для того, чтобы изменить число входов (по умолчанию осциллограф имеет один входной порт), необходимо воспользоваться диалогом «Осциллограф», который вызывается с помощью пункта «Свойства» контекстного меню для выделенного осциллографа. Кроме того, с помощью этого диалога можно задать обозначения осей X и Y, а также числовые множители, которые используются для масштабирования сигналов при их отображении. Так, например, по умолчанию осциллограф выводит напряжение в вольтах, а время – в миллисекундах. В случае, если необходимо вывести напряжение в киловольтах, можно воспользоваться кнопкой «Параметры осей Y подграфиков» диалога «Осциллограф» и в появившемся диалоге «Параметры отображения осей Y осциллографа» задать для всех входных портов множитель 0,001. В свою очередь, для отображения временных интервалов в микросекундах необходимо воспользоваться кнопкой «Параметры осей X подграфиков» диалога «Осциллограф» и затем в появившемся диалоге «Параметры отображения осей X осциллографа» задать множитель по оси X, равный 1e6.

Запуск схемы на расчет осуществляется по нажатию кнопки «Расчет» в Панели инструментов или функциональной клавиши F5.

Блоки, используемые в лабораторном стенде, сведены в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 - Элементы расчетной модели, используемые в лабораторной работе

Элемент	Описание
	Источник косоугольного импульса, моделирующий набегание с линии электромагнитной волны. Параметры: – амплитудное значение напряжения, кВ; – крутизна фронта, кВ/мкс. Местонахождение блока в библиотеке элементов: Источники → Неуправляемые.
	Активное сопротивление для представления волновых сопротивлений воздушных линий. Местонахождение блока в библиотеке элементов: Элементы → RLC-цепи.
	Емкость для представления входных емкостей электрооборудования: трансформаторов, выключателей, разъединителей. Местонахождение блока в библиотеке элементов: Элементы → RLC–цепи.
	Линия с распределенными параметрами, предназначенная для моделирования ошиновок. Параметры: – длина, км; – волновое сопротивление, Ом; – скорость распространения, м/с. Местонахождение блока в библиотеке элементов: Элементы → Линии.
	Нелинейный ограничитель перенапряжений (ОПН). Параметры ОПН задаются таблицей импульсных токов (кА) и соответствующих им остающихся напряжений (кВ). Местонахождение блока в библиотеке элементов: Элементы → Ограничители перенапряжений.
	Аналоговый заземлитель. Местонахождение блока в библиотеке элементов: Коннекторы → Заземлители.
	Вольтметр. Местонахождение блока в библиотеке элементов: Измерители → Непрерывные.
	Цифровой осциллограф. Местонахождение блока в библиотеке элементов: Измерители → Блоки вывода.

По завершении сборки расчетной схемы перед ее запуском на счет необходимо задать параметры расчета (пункт «Параметры расчета» в меню «Расчет» программы). Шаг расчета следует принять равным 0,001 мкс, а время счета – 20 мкс.

Для определения максимальных напряжений на электрооборудовании следует по окончании расчета открыть осциллограмму напряжения двойным

щелком мыши по блоку Осциллограф. Далее, дважды щелкнув мышью по расчетной осциллограмме, открыть диалоговое окно «Свойства кривой». В появившемся диалоге на закладке «Информация» максимальное расчетное значение напряжения отображается в поле «Максимальное значение координаты Y».

Для удобства обработки результатов для каждого пункта задания в программе имеется табличная форма, вызываемая путем нажатия кнопки с номером пункта задания в Панели инструментов. Найденные значения максимальных напряжений следует ввести в таблицу и, по окончании ее заполнения, нажать кнопку «Построить график».

По итогам выполнения работы, полученные табличные формы и графики целесообразно сохранить путем их копирования и вставки в доступный на компьютере текстовый редактор WordPad. Для копирования в буфер обмена табличных форм можно воспользоваться комбинацией клавиш Alt + Print Screen. Графики можно скопировать в буфер обмена или сохранить в файл с помощью меню Правка окна графопостроителя XYGraph (пункты «Копировать рисунок» и «Сохранить рисунок» соответственно).

Составим расчетную модель для схемы с набеганием косоугольного импульса на емкость в конце линии. Измерим напряжение на емкости (точка А на схеме) с учетом (см. рисунок 3.9 и 3.10) и без емкости электрооборудования (см. рисунок 3.11 и 3.12). Максимальное значение набегающей волны Umax = 660 кВ, длительность фронта $\tau_ф$ = 1 мкс (u’ = Umax/$\tau_ф$ = 660/1 = 660 кВ/мкс). Волновое сопротивление линии Zc = 400 Ом.

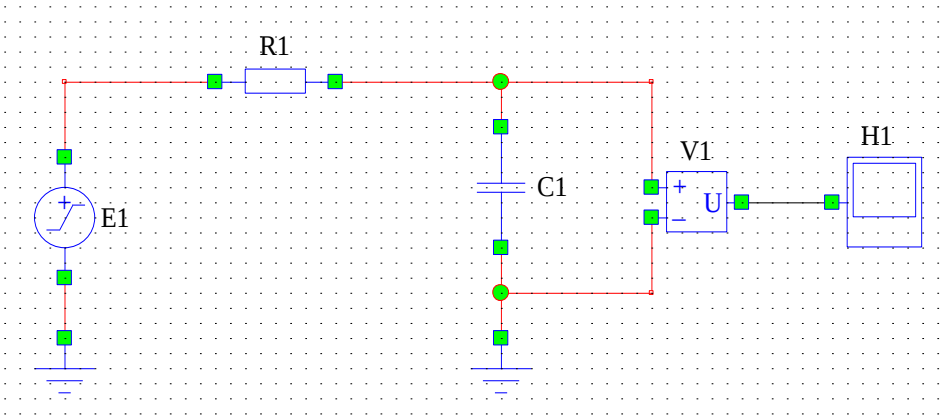


Рисунок 3.9 – Расчетная модель для схемы с набеганием косоугольного импульса с учетом емкости

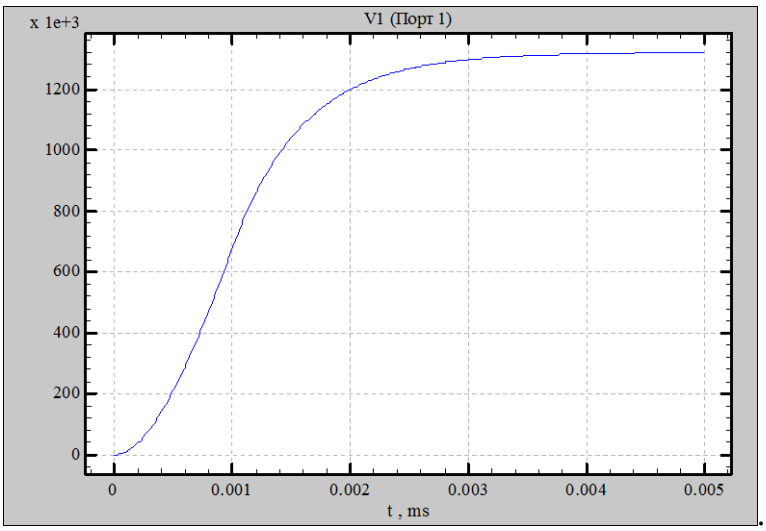


Рисунок 3.10 – Формирование напряжений в схеме с учетом емкости

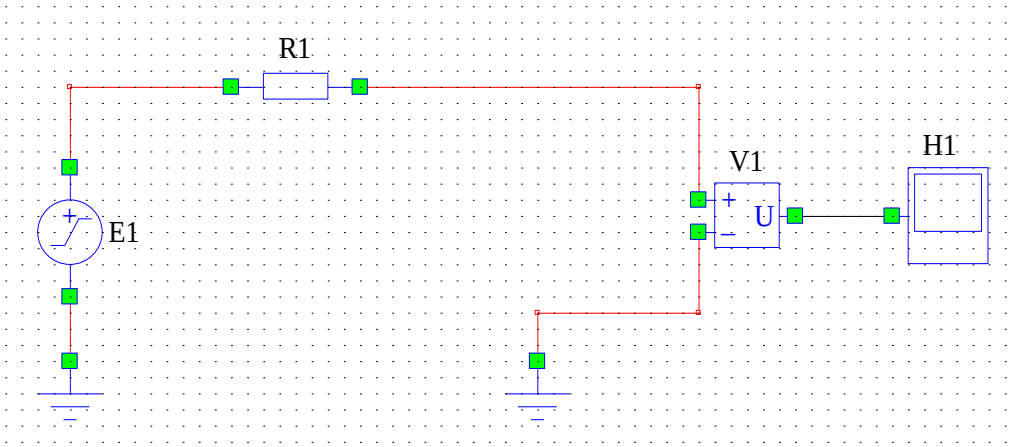


Рисунок 3.11 – Расчетная модель для схемы с набеганием косоугольного импульса без учета емкости

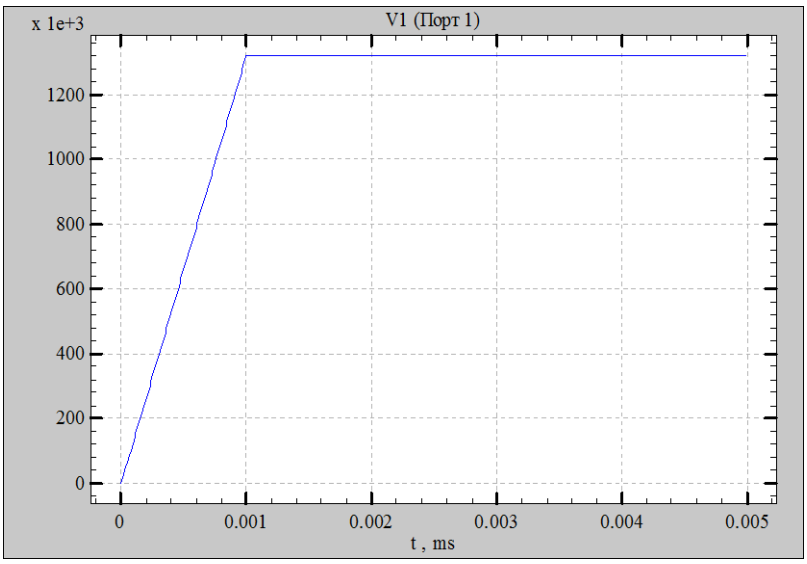


Рисунок 3.12 – Формирование напряжений в схеме без учета емкости

3.3.2 Построим зависимость максимального напряжения на изоляции электрооборудования $U_{и,max}$ для обеих схем от расстояния l между ОПН и защищаемым оборудованием, включенным до (рисунок 3.13) и после ОПН (рисунок 3.14) по ходу движения волны. Емкость оборудования принять равной C = 1500 пФ, импульсную прочность гирлянд линейной изоляции $U_{50\%}$ = 660 кВ, длительность фронта волны $\tau_{фр}$=2 мкс, волновое сопротивление линии и ошиновки Z_c=400 Ом. Результаты измерений свести в таблицу 3.3.

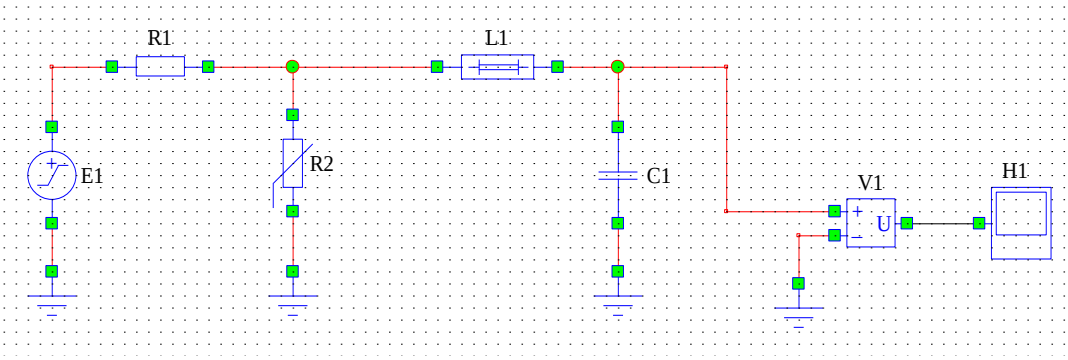


Рисунок 3.13 – Расчетная модель для выявления зависимости максимального напряжения на изоляции электрооборудования, ОПН включен до защищаемого оборудования

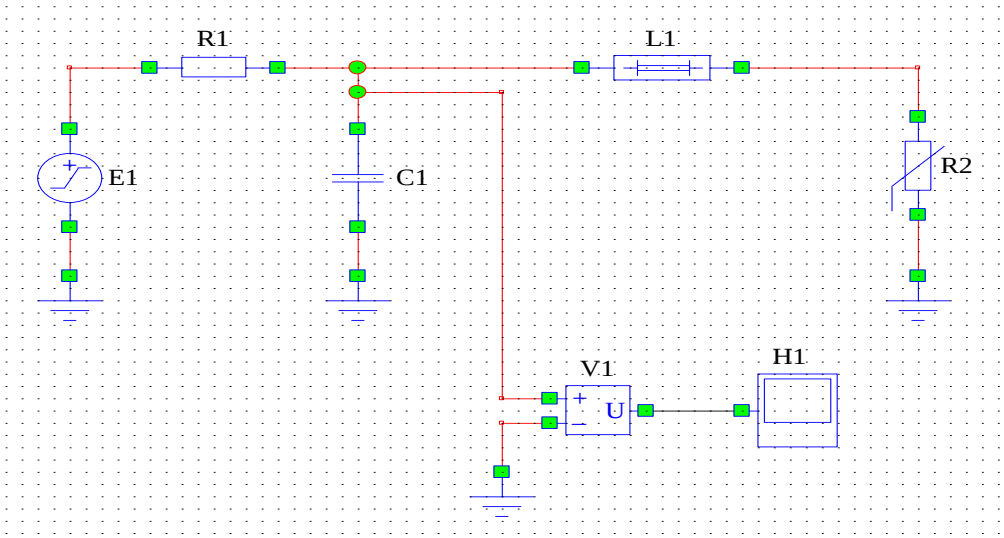
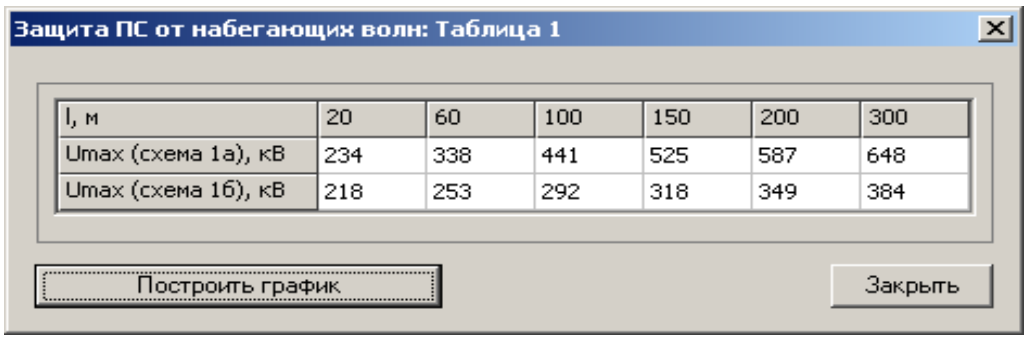


Рисунок 3.14 – Расчетная модель для выявления зависимости максимального напряжения на изоляции электрооборудования, ОПН включен после защищаемого оборудования



l, м	20	60	100	150	200	300
Umax (схема 1а), кВ	234	338	441	525	587	648
Umax (схема 1б), кВ	218	253	292	318	349	384

Рисунок 3.14 - Результаты измерений

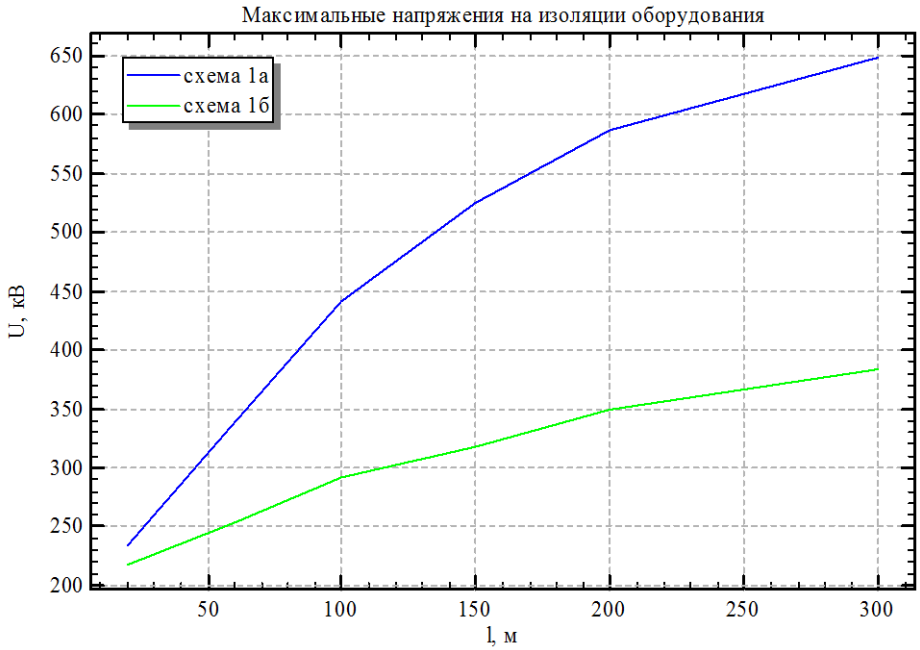


Рисунок 3.15 – Результаты расчета и значения максимального напряжения на изоляции оборудования

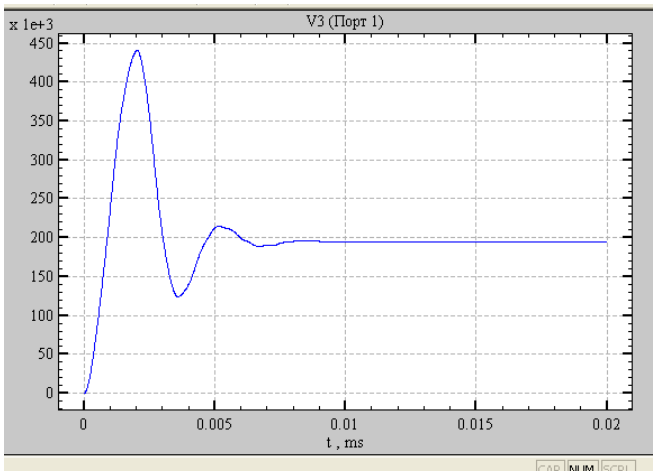


Рисунок 3.15 – Характерные формы перенапряжений на подстанционном электрооборудовании, когда ОПН включен до защищаемого оборудования

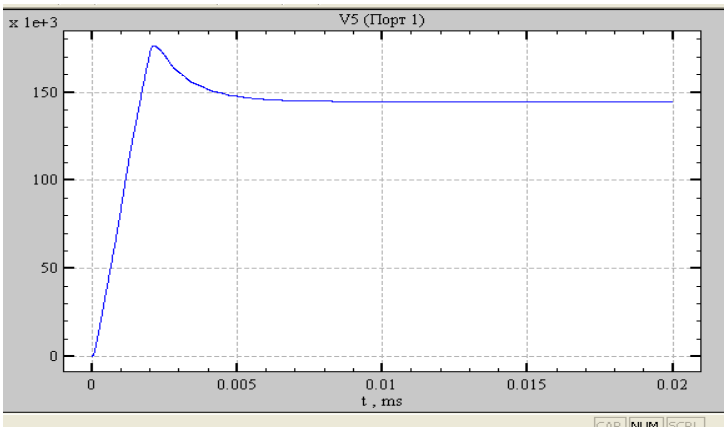


Рисунок 3.16 – Характерные формы перенапряжений на подстанционном электрооборудовании, когда ОПН включен после защищаемого оборудования

Рассмотри влияние отходящих линий на перенапряжения. Установим длину ошиновки l = 100 м и включим эквивалентное сопротивление $Z_{экв}$ = 300 Ом между проводом ошиновки и землей на расстоянии l_1 от точки 1 (см.рисунок 3.17), равном 0, 50 и 100 м (рисунок 3.18, 3.19) . Измерим напряжение на емкости емкости С. Повторим опыт при $Z_{экв}$ = 150 Ом и $Z_{экв}$ = 75 Ом. Построим зависимости максимальных напряжений на изоляции $U_{и,max}$ от l_1 и сделаем вывод относительно влияния числа и местоположения отходящих линий на условия защиты подстанции. Результаты измерений свести в таблицу 3.4.

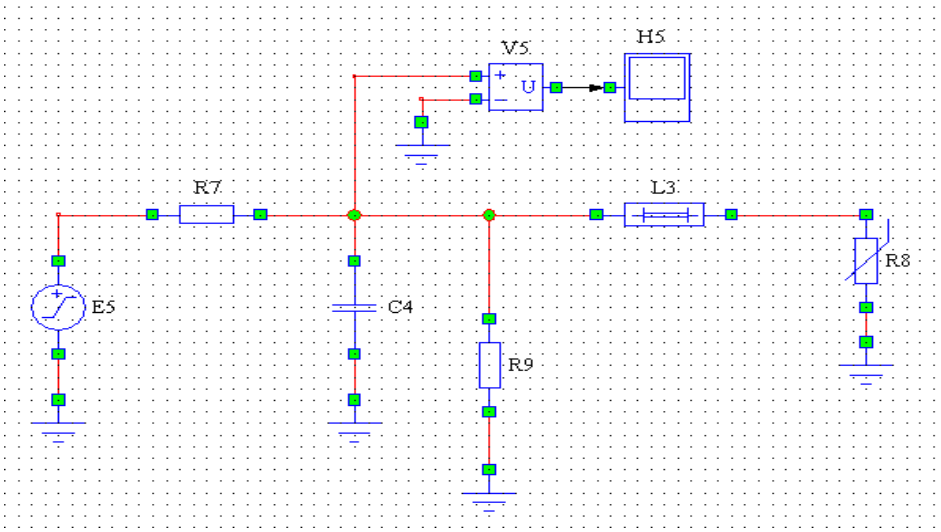


Рисунок 3.17 – Расчетная модель для определения влияния отходящих линий на перенапряжения, l = 0 м и эквивалентное сопротивление $Z_{экв}$ = 300 Ом

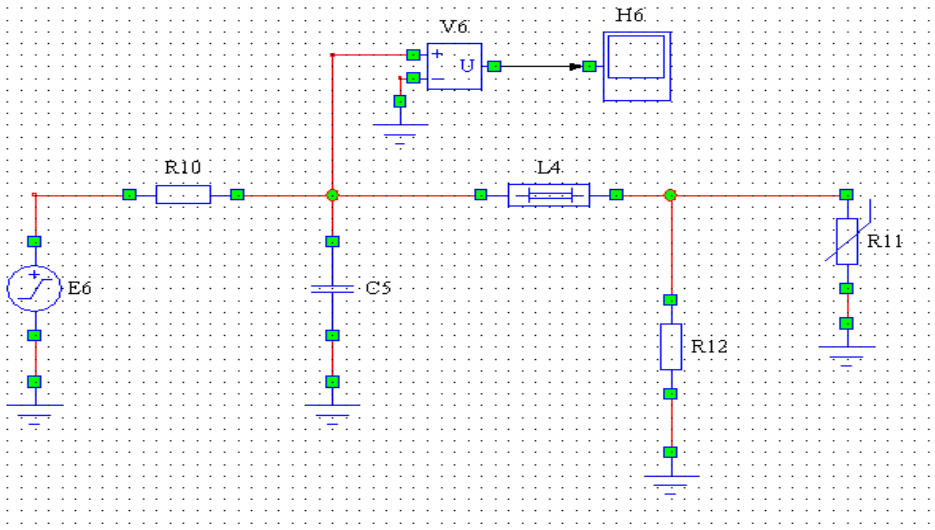


Рисунок 3.18– Расчетная модель для определения влияния отходящих линий на перенапряжения, l = 50 м и эквивалентное сопротивление $Z_{экв}$=150 Ом

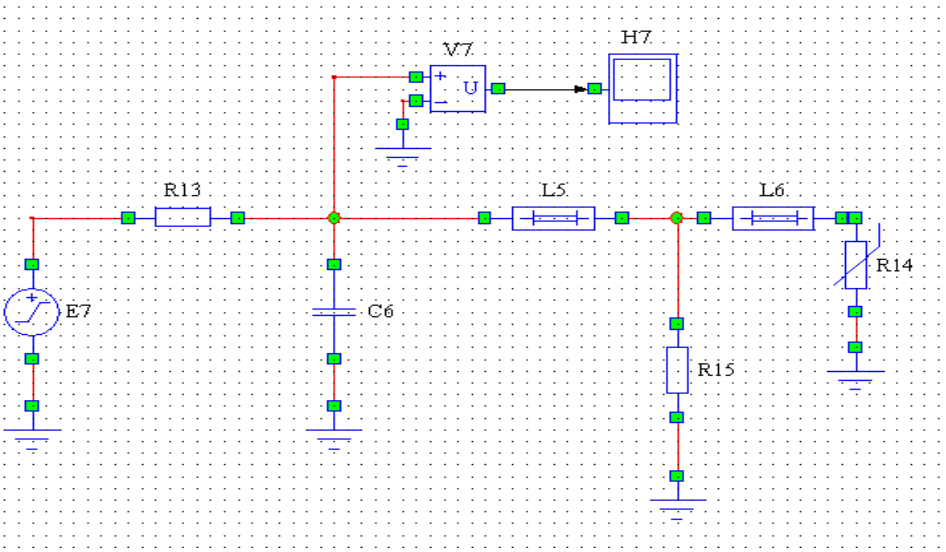


Рисунок 3.19 – Расчетная модель для определения влияния отходящих линий на перенапряжения, l=100 м и эквивалентное сопротивление $Z_{экв}$=75Ом

l1, м	0	50	100
Zл = 300 Ом	323	359	416
Zл = 150 Ом	255	313	394
Zл = 75 Ом	176	252	360

Рисунок 3.19 – Результаты измерений

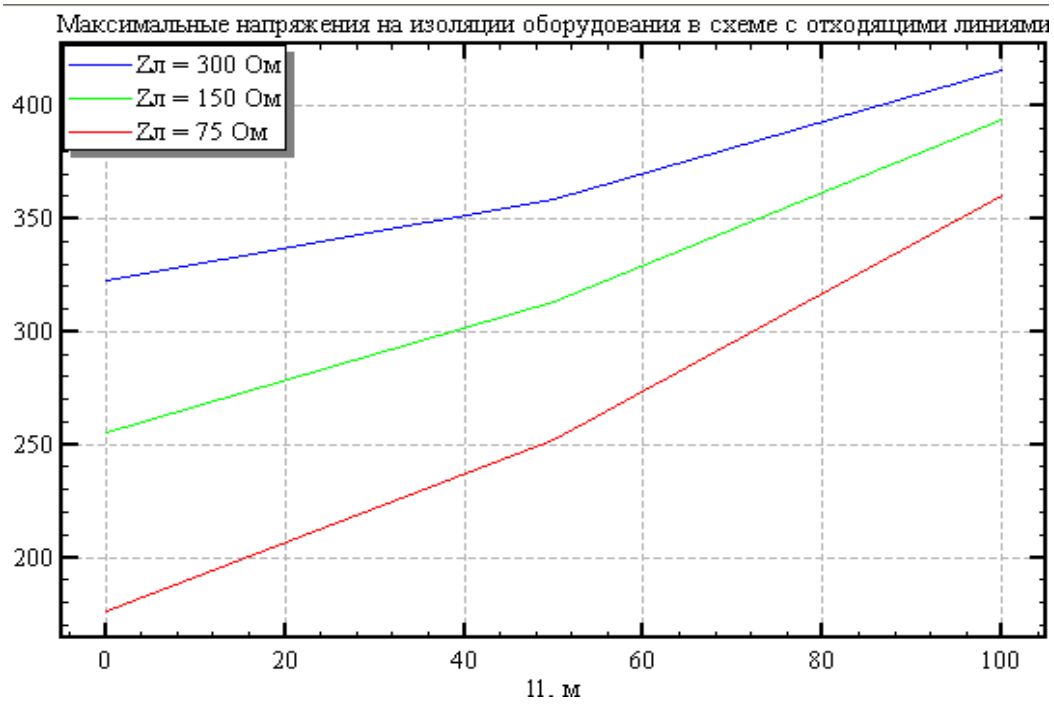


Рисунок 3.20 – Зависимости максимальных напряжений на изоляции $U_{и,max}$ от l_1

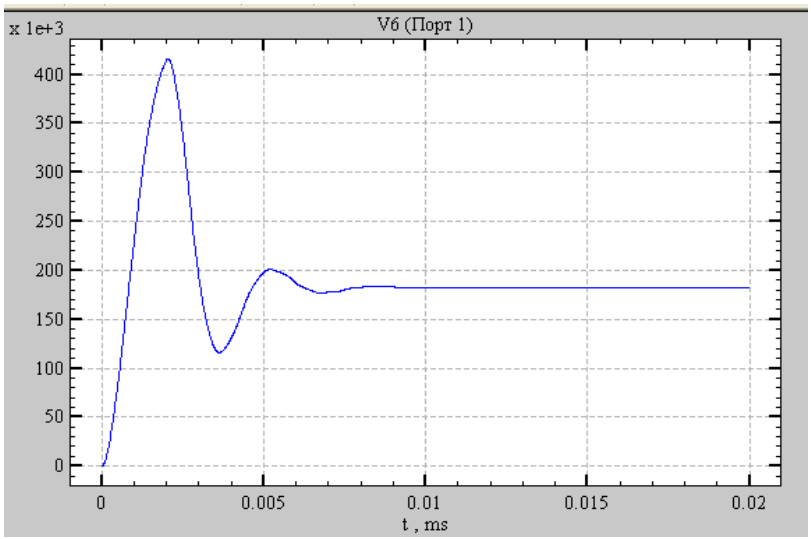


Рисунок 3.21 – Характерные формы перенапряжений на подстанционном электрооборудовании

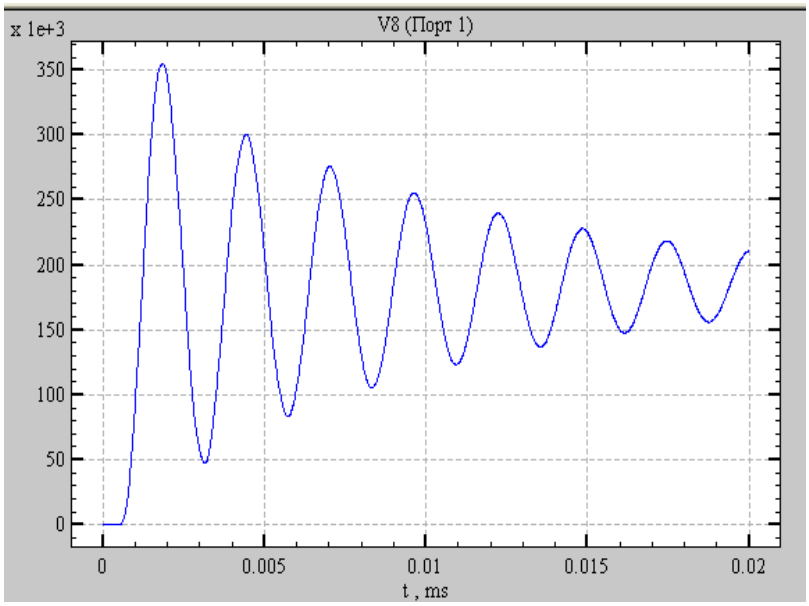


Рисунок 3.22 – Характерные формы перенапряжений на подстанционном электрооборудовании

Определим надежность защиты подстанции 110 кВ при работе с одним трансформатором Т-1 и защитным аппаратом ОПН-1 при замкнутой перемычке (выключатель В-3 включен).

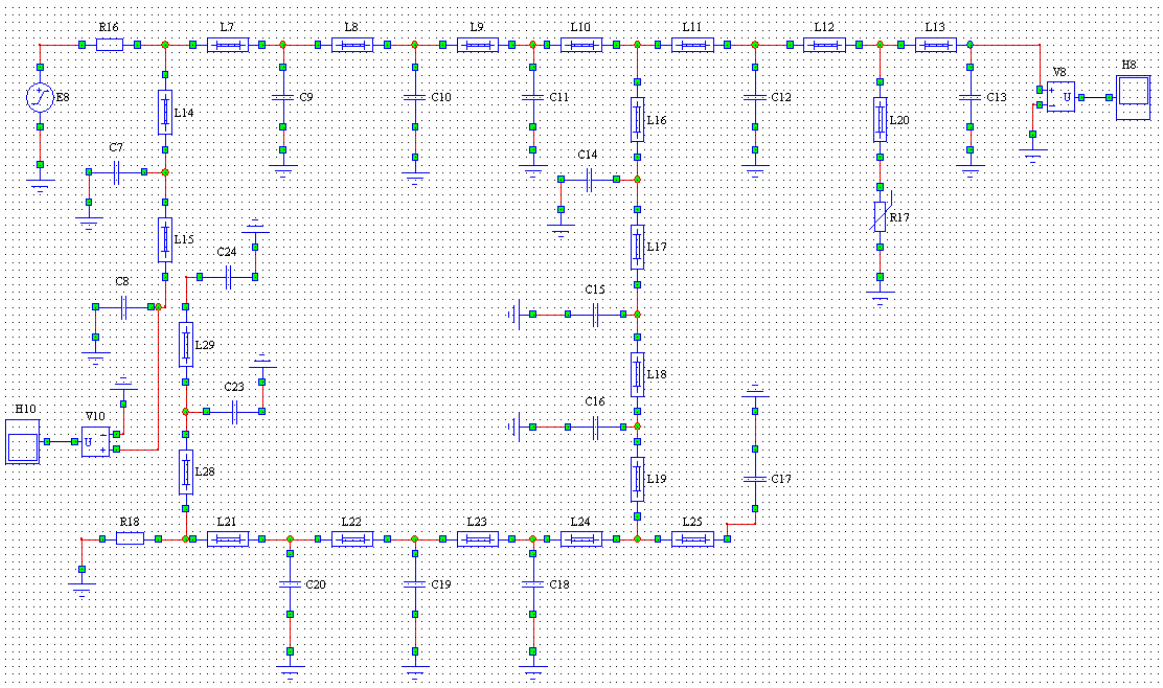


Рисунок 3.23 – Расчетная модель для упрощенной схемы замещения

Создадим расчетную модель для упрощенной схемы замещения (рисунок 3.23) и проведем расчет для случая падения волны напряжения по линии Л-1, для чего подключить источник косоугольного напряжения к точке

1 и заземлить точку 14. Измерим напряжения в точках 3 и 8 упрощенной схемы при изменении длительности фронта волны $\tau_ф$ от 4 до 0,5 мкс. По результатам измерений построим зависимость $U_{и,max} = f(U')$, определим критическую крутизну $U'_{кр1}$ для внутренней и внешней изоляции и вычислим длину опасной зоны $x_{кр1}$ для линии Л-1. Результаты измерений свести в таблицу 3.5.

Тф, мкс	4	3	2	1	0.5
U', кВ/мкс	165	220	330	660	1320
Uтн, кВ	253	284	287	395	438
Uтр, кВ	216	203	254	331	355

Рисунок 3.24 – Результаты измерений

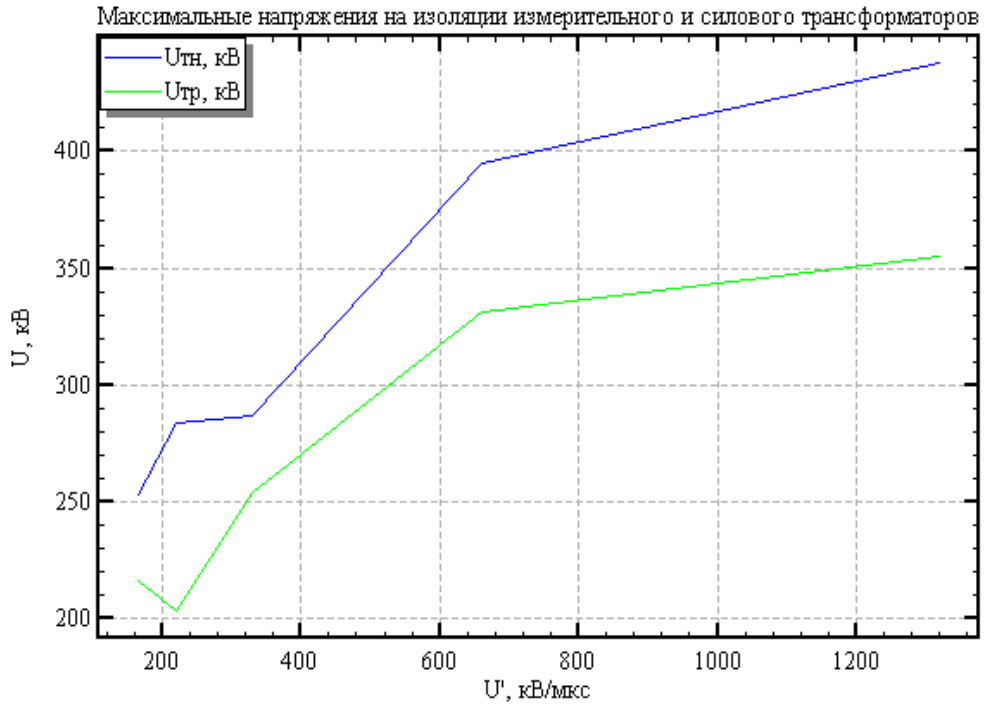


Рисунок 3.25 – зависимость $U_{и,max} = f(U')$

4 Расчет и проектирование грозозащиты подстанции $U_н = 110$ кВ

4.1 Расчет напряжения на изоляции силового трансформатора при заданной волне перенапряжения

Расчет производим по правилу эквивалентной волны. Данный метод заключается в следующем: пусть в узле х сходятся n линий, по которым в узел х набегают волны перенапряжения U_{max}. К узлу х подключено сопротивление нагрузки Z_x. Каждая линия обладает собственным волновым сопротивлением W_m (рисунок 4.1).

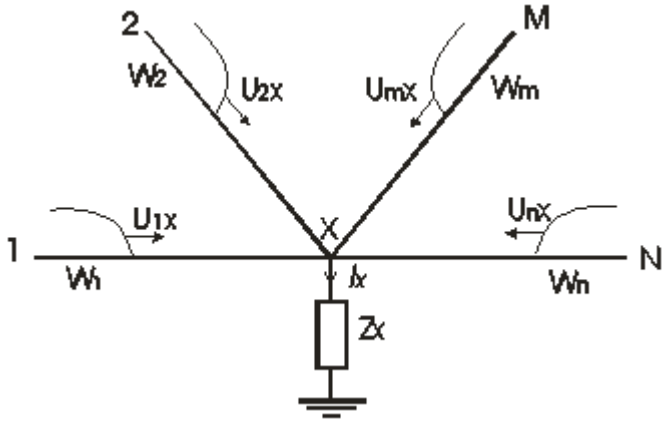


Рисунок 4.1 – Схема с распределенными параметрами

В соответствии с правилом эквивалентной волны (см.рисунок 4.2) схема с распределенными параметрами приводится к схеме с сосредоточенными параметрами.

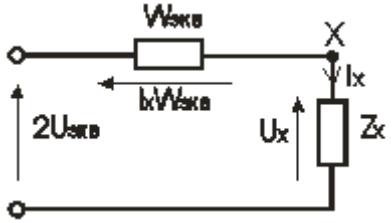


Рисунок 4.2 – Эквивалентная схема с сосредоточенными параметрами

Эквивалентное волновое сопротивление $W_{экв}$ находится параллельным сложением всех волновых сопротивлений линий, сходящихся в узле х:

$$\frac{1}{W_{экв}} = \frac{1}{W_1} + \frac{1}{W_2} + ... + \frac{1}{W_m} + ... + \frac{1}{W_n} \quad (4.1)$$

Падающие волны заменены включением ЭДС $E = 2U_{экв}$, равное сумме преломленных в узле х волн, т.е.

$$2U_{экв} = \sum_{m=1}^{n} \alpha_{\max} U_{\max} \tag{4.2}$$

где $\alpha_{\max} = \frac{2W_{экв}}{W_m}$ - коэффициент преломления в узле х, проходящей по линии m.

Ток через сопротивление Z_x будет равен:

$$i_1 = \frac{2U_{экв}}{Z_x + W_{экв}}, \tag{4.3}$$

тогда напряжение в узле х найдется из уравнения:

$$2U_{экв} = U_x + i_x \cdot W_{экв} \tag{4.4}$$

При этом в выражении (4.2) необходимо учитывать запаздывание волн, приходящих в узел х относительно друг друга.

4.2 Расчет напряжений в узловых точках подстанции методом бегущих волн

Метод бегущих волн, включая в себя правило эквивалентной волны, позволяет производить расчет схем содержащих ряд узлов. Для этого определяют по правилу эквивалентной волны суммарное напряжение $U_x(t)$ в каждом из узлов, возникающее вследствии прихода в узел волн $U_{\max}(t)$ по всем линиям.

Далее вычисляют для каждой из линий волну, распространяющуюся от данного узла к соседнему:

$$U_{xm} = U_x - U_{mx} \tag{4.5}$$

Каждая из этих условных отраженных волн U_{xm} будет для соседнего узла m приходящей волной. Для расчета напряжений в узловых точках подстанции выбрана простейшая схема (рисунок 4.3).

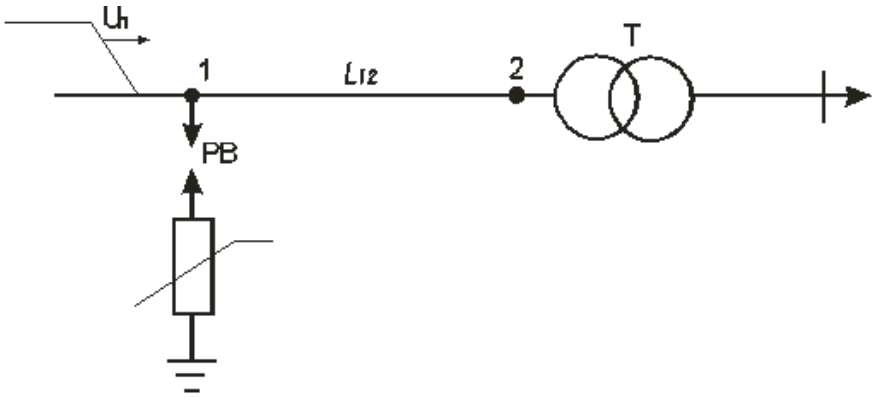


Рисунок 4.3 – Схема подстанции

На рисунке 4.4 изображена схема замещения подстанции, в которой трансформатор заменен входной емкостью.

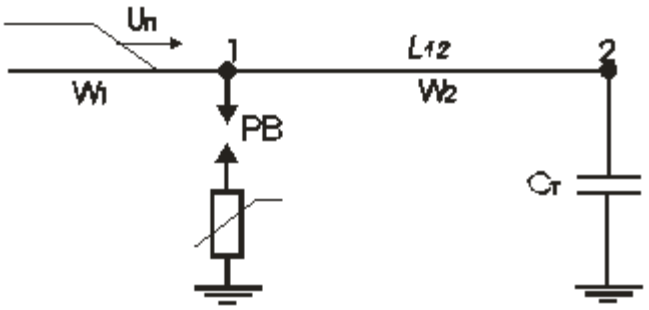


Рисунок 4.4 – Схема замещения подстанции

Рассчитываем крутизну волны перенапряжения:

$$\alpha = \frac{U_n}{\tau_\phi} = \frac{800}{0{,}5} = 1600 \frac{кВ}{мкс}.$$

Выбираем расчетный интервал времени Δt.

Для достижения высокой точности расчета рекомендуется Δt выбирать из условия:

$$\Delta t = \left(\frac{1}{50} \div \frac{1}{100} \right) \tau_\phi \ . \qquad (4.6)$$

Но в условиях ручного счета обычно снижают требования к точности.

Выбираем $\Delta t = 0{,}1 \cdot 0{,}5 = 0{,}05$мкс.

Определяем вспомогательные параметры M и N:

$$M = \frac{2 \cdot t_{12}}{\Delta t} = \frac{2 \cdot 0{,}25}{0{,}05} = 10;$$

$$N = \frac{\tau_{ф}}{\Delta t} = \frac{0{,}5}{0{,}05} = 10;$$

$$t_{12} = \frac{l_{12}}{v} = \frac{75}{300} = 0{,}25\text{мкс}.$$

где ν=300 м/мкс – скорость распространения электромагнитной волны.

Определим параметры линии, которой заменяется емкость трансформатора:

длина линии

$$l_{23} = \frac{v \cdot \Delta t}{2} = \frac{300 \cdot 0{,}05}{2} = 7{,}5\text{м}$$

волновое сопротивление

$$W_3 = \frac{\Delta t}{2C} = \frac{0{,}05 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 1200 \cdot 10^{-12}} = 20{,}83\text{Ом}.$$

$$t_{23} = \frac{\Delta t}{2} = \frac{0{,}05}{2} = 0{,}025\text{мкс}.$$

Заменяем нелинейную вольтамперную характеристику (ВАХ) вентильного разрядника отрезками прямых и находим уравнения этих прямых. Когда срабатывает РВ, то в соответствии с правилом эквивалентной волны схема замещения узла с разрядником будет иметь вид (см.рисунок 4.5):

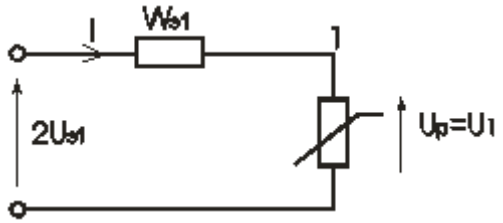


Рисунок 4.5 – Эквивалентная схема замещения узла с разрядником

На основании второго закона Кирхгофа можно записать:

$$2U_{экв} = U_p + I \cdot W_{э1} \qquad (4.7)$$

откуда

$$U_р = 2U_{экв} - I \cdot W_{э1} \quad (4.8)$$

Уравнение (4.8) является уравнением прямой линии, которая отсекает на оси ординат отрезок $2U_{э1}$, а на оси абсцисс отрезок $\frac{2U_{э1}}{W_{э1}}$.

Вентильный разрядник срабатывает когда $2U_{э1} = U_{пр}$, следовательно, точку 1 на ВАХ можно найти, если провести линию через точку U на оси ординат и через точку $\frac{U_{пр}}{W_{э1}}$ на оси абсцисс (рисунок 4.5).

$$W_{э1} = \frac{W_1 \cdot W_2}{W_1 + W_2} = \frac{400 \cdot 300}{400 + 300} = 171{,}43 Ом;$$

$$2U_{э1} = U_{пр} = 260 кВ;$$

$$I = \frac{U_{пр}}{W_{э1}} = \frac{260}{171{,}43} = 1{,}52 кА.$$

Таблица 4.1 - Характеристики вентильного разрядника

Параметры РВ					
Тип разрядника	$U_н, кВ$	$U_{пр.имп}, кВ$	$U_{ост}, кВ$ при токах		
			3 кА	5 кА	10 кА
РВМГ	110	310	245	265	295

ВАХ РВ строится по трем точкам при токах 3, 5, 10 кА и соответствующим этим токам $U_{ост}$ (таблица 4.1). Начальный участок ВАХ (рисунок 4.5) от 0 до 3 кА строим произвольно. Через точку 2 проводим прямую параллельную прямой, проходящей через точку 1. Эта прямая отсекает на оси ординат значение $U_г$, которое можно определить из выражения:

$$U_г = U_2 + I_2 \cdot W_{э1} = 265 + 5 \cdot 171{,}43 = 1122{,}15 кВ.$$

где $U_2 = 265 кВ$, $I_2 = 5 кА$ - координаты точки 2;

$W_{э1} = 171{,}43 Ом$ - эквивалентное сопротивлении линии.

Запишем уравнение прямой, проходящей через точки 1 – 2:

$$U = E_1 + I \cdot Z_{р1} \quad (4.9)$$

Значение E_1 находится из графика (рисунок 3.6) или вычисляется по формуле:

$$E_1 = \frac{U_1 \cdot I_2 - U_2 \cdot I_1}{I_2 - I_1} = \frac{94 \cdot 5 - 265 \cdot 0{,}98}{5 - 0{,}98} = 53\text{кВ}. \quad (4.10)$$

где U_1, I_1 - координаты точки; U_2, I_2 - координаты точки 2.

Сопротивление разрядника Z_{p1} определяется по формуле

$$Z_{p1} = \frac{U_2 - U_1}{I_2 - I_1} = \frac{265 - 94}{5 - 0{,}98} = 42{,}54\text{Ом}. \quad (4.11)$$

Решим систему уравнений:

$$\begin{cases} 2U_{э1} = U_p + I \cdot W_{э1} \\ U_p = E_1 + I \cdot Z_{p1} \end{cases} \quad (4.12)$$

$$U_p = \frac{Z_{p1}}{Z_{p1} + W_{э1}} \cdot 2U_{э2} + \frac{E_1 W_{э1}}{Z_{p1} + W_{э1}} \quad (4.13)$$

Получим (4.13) или $U_p = b_1 \cdot 2U_{э1} + d_1$ (4.14) - уравнение отрезка 1-2.

Учитывая, что $U_p = U_1$, для узла 1 имеем:

$$U_1 = b_1 \cdot 2U_{э1} + d_1, \quad (4.14)$$

где:

$$b_1 = \frac{Z_{p1}}{Z_{p1} + W_{э1}} = \frac{42{,}54}{42{,}54 + 171{,}43} = 0{,}199,$$

$$d_1 = \frac{E_1 \cdot W_{э1}}{Z_{p1} + W_{э1}} = \frac{94 \cdot 171{,}43}{42{,}54 + 171{,}43} = 42{,}46.$$

Уравнение прямой, проходящей через точки 2–3 рассчитывается аналогично:

$$U_p = b_2 \cdot 2U_{э1} + d_2 \quad (4.15)$$

где:

$$b_2 = \frac{Z_{p2}}{Z_{p2} + W_{э1}} = \frac{6}{6 + 171{,}43} = 0{,}034,$$

$$d_2 = \frac{E_2 \cdot W_{э1}}{Z_{p2} + W_{э1}} = \frac{236 \cdot 171{,}43}{6 + 171{,}43} = 228.$$

$$Z_{p2} = \frac{U_3 - U_2}{I_3 - I_2} = \frac{295 - 265}{10 - 5} = 6\text{Ом}.$$

$$E_2 = \frac{U_2 \cdot I_3 - U_3 \cdot I_2}{I_3 - I_2} = \frac{265 \cdot 10 - 295 \cdot 5}{10 - 5} = 236\text{кВ}.$$

Приведем расчет эквивалентных сопротивлений для каждого узла и коэффициентов преломления для каждой линии.

$$W_{э1} = 171{,}43\text{Ом}.$$

$$W_{э2} = W_2 = 300\text{Ом}.$$

$$\alpha_{11} = \frac{2W_{э1}}{W_1} = \frac{2 \cdot 171{,}43}{400} = 0{,}857.$$

$$\alpha_{21} = \frac{2W_{э1}}{W_2} = \frac{2 \cdot 171{,}43}{300} = 1{,}143.$$

$$\alpha_{22} = \frac{2W_{э2}}{W_2} = \frac{2 \cdot 300}{300} = 2.$$

На основе приведенных формул составляется таблица 4.2 исходных данных.

Таблица 4.2

Параметр	$\alpha, кВ/мкс$	$\Delta t, мкс$	t_{12}, vrc	
Числовое значение	1600	0,05	0,25	
Параметр	b_1	d_1	b_2	d_2
Числовое значение	0,199	42,46	0,034	228
Параметр	$U_г, кВ$	$W_{э1}, Ом$	$W_{э2}, Ом$	
Числовое значение	1122,15	171,43	300	
Параметр	α_{11}	α_{21}	α_{22}	
Числовое значение	0,857	1,143	2	

Составим расчетные уравнения для каждого узла.

Узел 1.

$$2U_{э1} = U_1 + i_1 W_{э1} \tag{4.16}$$

Пока разрядник не сработал

$$i_1 = 0 \quad \text{и} \quad 2U_{э1} = U_1 \tag{4.17}$$

$$2U_{э1} = \sum_{m=1}^{n} \alpha_{m1} U_{m1} \tag{4.18}$$

где U_{m1} – волна напряжения, идущая по m-ной линии к узлу 1;

α_{m1} – коэффициент преломления для волны U_{m1};

n – число линий, сходящихся в узле 1.

Запишем уравнение (4.18) в виде:

$$2U_{э1} = \alpha_{11} U_n + \alpha_{21} U'_{21} \tag{4.19}$$

где $U'_{21} = U_{21}(t - 2t_{12})$ - отраженная от точки 2 волна, пришедшая в узел 1 с запаздыванием на время двойного пробега по участку 1 – 2 , т.е:

$$U'_{21} = U_{21}(t - 2t_{12}) \tag{4.20}$$

Таким образом, до пробоя РВ напряжение в узле 1 определяется по формуле:

$$U_1 = 2U_{э1} \tag{4.21}$$

Когда разрядник срабатывает:

$$U_1 = b_1 \cdot (2U_{э1}) + d_1, \text{ если } U_{пр} = 2 \cdot U_{э1} \tag{4.22}$$

$$U_1 = b_2 \cdot (2U_{э1}) + d_2, \text{ если } 2 \cdot U_{э1} \succ U_г \tag{4.23}$$

Определим волну напряжения идущую от узла 1 к узлу 2:

$$U_{12} = U_1 - U'_{21} = U_1 - U_{21}(t - t_{12}) \tag{4.24}$$

Узел 2.

$$2U_{э2} = U_2 + i_2 W_{э2} \tag{4.25}$$

$$i_2 = C \frac{dU_2}{dt} \tag{4.26}$$

$$2U_{э2} = U_2 + C \cdot W_{э2} \cdot \frac{dU_2}{dt} \quad (4.27)$$

$$\frac{dU_2}{dt} + \frac{1}{W_{э2} \cdot C} \cdot U_2 = \frac{1}{W_{э2} \cdot C} 2U_{э2} \quad (4.28)$$

Волна, отраженная от узла 2:

$$U_{21} = U_2 - U_{12} \quad (4.29)$$

Напряжение U_2 находится графическим методом подкасательной.

4.3 Расчет кривой опасных параметров (КОП)

Расчет КОП осуществим с помощью метода бегущих волн на ЭВМ. С целью повышения точности расчетов напряжений в узловых точках подстанции необходимо изменить исходные данные.

Выбираем $\Delta t = 0{,}01\tau_ф = 0{,}01 \cdot 0{,}5 = 0{,}005$мкс.

Определяем вспомогательные параметры M и N:

$$M = \frac{2 \cdot t_{12}}{\Delta t} = \frac{2 \cdot 0{,}25}{0{,}005} = 100;$$

$$N = \frac{\tau_ф}{\Delta t} = \frac{0{,}5}{0{,}005} = 100;$$

$$t_{12} = \frac{l_{12}}{v} = \frac{75}{300} = 0{,}25\text{мкс}.$$

где число шагов расчета: $P \geq 3N$, т.е. $P \geq 300$. Принимаем $P = 300$.

$$W_3 = \frac{\Delta t}{2C} = \frac{0{,}005 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 1200 \cdot 10^{-12}} = 2{,}083\text{Ом}.$$

Волновое сопротивление:

$$l_{23} = \frac{v \cdot \Delta t}{2} = \frac{300 \cdot 0{,}005}{2} = 0{,}75\text{м}$$

$$t_{23} = \frac{\Delta t}{2} = \frac{0{,}005}{2} = 0{,}0025\text{мкс}.$$

$$W_{э2} = \frac{W_2 \cdot W_3}{W_2 + W_3} = \frac{300 \cdot 2{,}083}{300 + 2{,}083} = 2{,}069\text{Ом}$$

$$\alpha_{22} = \frac{2W_{э2}}{W_2} = \frac{2 \cdot 2{,}069}{300} = 0{,}014.$$

$$\alpha_{32} = \frac{2W_{э2}}{W_3} = \frac{2 \cdot 2{,}069}{2{,}083} = 1{,}986.$$

Для расчета КОП подстанции необходимо выбрать четыре значения $\tau_ф$ и для каждого значения определить $\Delta t, M, N, W_3, W_{32}, \alpha_{22}, \alpha_{32}$. После предварительных расчетов составляется таблица исходных данных, необходимых для расчета кривой опасных параметров. Для расчета также необходимо знать параметры кривой допустимых импульсов перенапряжений для внутренней изоляции трансформатора (рисунок 4.6). Данные для построения этой кривой приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3

$U_н, кВ$	$U_1, кВ$	$U_2, кВ$	$U_3, кВ$	$U_4, кВ$	$t_2, мкс$	$t_3, мкс$	$t_4, мкс$
110	165	550	550	382	1,5	3	10

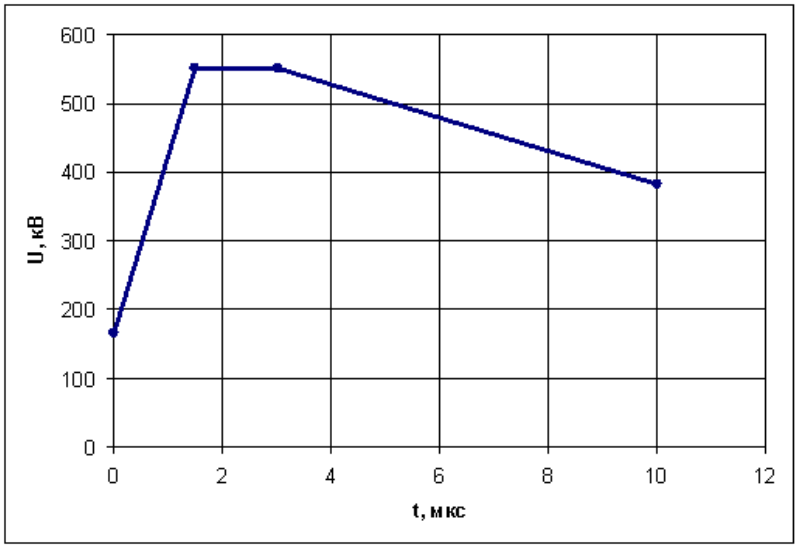


Рисунок 4.6 – Кривая допустимых импульсных перенапряжений для внутренней изоляции трансформатора

4.4 Эффективность грозозащиты подстанции от волн перенапряжений, набегающих с линии

Опасные импульсы перенапряжений, набегающие на подстанцию с воздушной линии, могут возникать в результате прорыва молнии через тросовую защиту и при обратных перекрытиях при ударе молнии в опоры или тросы в пределах защитного подхода. Среднее годовое число перекрытий изоляции подстанции вследствие набегания на нее опасных импульсов грозовых перенапряжений определяется:

$$b = b' + b'' + b''', \tag{4.30}$$

где b' - среднее годовое число перекрытий изоляции вследствие прорыва молнии через тросовую защиту;

b'' - среднее годовое число перекрытий изоляции вследствие обратных перекрытий при ударах молнии в опору;

b'''- среднее годовое число перекрытий изоляции вследствие обратных перекрытий при прямом ударе молнии в трос.

Определим среднее годовое число перекрытий изоляции вследствие прорыва молнии через тросовую защиту:

$$\beta' = N_n \cdot P_\alpha, \tag{4.31}$$

где N_n - число ударов молнии в трос в пределах защитного подхода;

P_α - вероятность прорыва молнии через тросовую защиту.

Вероятность прорыва молнии через тросовую защиту:

$$\lg P_a = \frac{\alpha \cdot \sqrt{h_{on}}}{A} - B, \tag{4.32}$$

где α – защитный угол троса, $\alpha=25^0$;
A=90, B=4 – для линий напряжением 110-220кВ.

Тогда

$$P_\alpha = 10^{\frac{\alpha \cdot \sqrt{h_{on}}}{90} - 4} = 10^{\frac{25 \cdot \sqrt{20,5}}{90}} = 0,00182.$$

Число ударов молнии в трос в пределах защитного подхода:

$$N_n = \frac{l_{зп}}{100} \cdot 4h_{ср.тр} \cdot \frac{D_г}{100}, \tag{4.33}$$

где $h_{ср.тр}$ – средняя высота подвеса троса, $h_{ср.тр} = 14,17$ м;

$l_{зп}$ – длина защитного подхода, $l_{зп} = 1,1414$ км;

$D_г$ – число грозовых часов в году, $D_г = 55$ часов.

Тогда:

$$N_n = 4 \cdot 14{,}17 \cdot \frac{1{,}1414}{100} \cdot \frac{55}{100} = 0{,}356.$$

$$\beta' = N_n \cdot P_\alpha = 0{,}356 \cdot 0{,}00182 = 0{,}00065.$$

Определим среднее годовое число перекрытий изоляции вследствие обратных перекрытий при ударах молнии в опору:

$$\beta'' = N_{оп} \cdot P_{оп}, \tag{4.34}$$

где $N_{оп}$ – число прямых ударов молнии в опору;

$P_{оп}$ – вероятность обратных перекрытий при ударе молнии в опору.

$$N_{оп} = N_n (1 - P_\alpha) \cdot \frac{4h_{оп}}{l_{пр}}, \tag{4.35}$$

где $l_{пр}$ – длина пролета, $l_{пр} = 90$ м;

$h_{оп}$ – высота опоры, $h_{оп} = 20{,}5$ м.

$$N_{оп} = 0{,}356 \cdot (1 - 0{,}00182) \cdot \frac{4 \cdot 20{,}5}{90} = 0{,}324.$$

Тогда:

$$P_{оп} = e^{-\frac{I_{0кр}}{26}}, \tag{4.36}$$

где $I_{0кр}$ – критический ток молнии при ударе в опору, который приводит к перекрытию линейной изоляции.

$$I_{0кр} = \frac{U_{50\%}}{R_и + \delta \cdot h_{оп}}, \tag{4.37}$$

где $U_{50\%}$ - импульсное разрядное напряжение гирлянд изоляторов;

$R_и$ – импульсное сопротивление заземлителя;

δ – коэффициент, который характеризует один грозозащитный трос на линии, δ=0.3.

$R_и = 4{,}34$Ом - импульсное сопротивление для трехлучевого заземлителя,

$$I_{0кр} = \frac{886{,}36}{4{,}34 + 0{,}3 \cdot 20{,}5} = 84{,}5\text{кА}.$$

Тогда:

$$P_{on} = e^{-\frac{84,5}{26}} = 0,039.$$

$$\beta'' = 0,324 \cdot 0,039 = 0,012565.$$

Определим среднее годовое число перекрытий изоляции вследствие обратных перекрытий при прямом ударе молнии в трос:

$$\beta''' = N_{mp} \cdot P_{обб}^{mp}, \qquad (4.38)$$

где N_{mp} – число ударов молнии в трос в середине пролета;

$P_{обб}^{mp}$ – вероятность пробоя промежутка трос-провод при ударе молнии в трос в середине пролета.

$$P_{обр}^{тр} = e^{-\frac{a_{кр}}{15,7}} \qquad (4.39)$$

где $a_{кр}$ - критическая крутизна тока молнии, при которой происходит пробой промежутка тром-провод:

$$a_{кр} = \frac{2250 \cdot l_{m-n}}{(1-K) \cdot l_{пр}} = \frac{2250 \cdot 2,21}{(1-0,25)90} = 73,56 кА/мкс, \qquad (4.40)$$

где l_{m-n} - расстояние между проводом и тросом,

$$l_{m-n} = h_{m-n} / \cos\alpha = 2 / \cos 25 = 2,21;$$

К– геометрический коэффициент связи между проводом и тросом.

$$N_{mp} = N_n(1-P_\alpha) - N_n(1-P_\alpha)\frac{4h_{on}}{l_{пр}}, \qquad (4.41)$$

$$N_{mp} = 0,356(1-0,00182) - 0,356(1-0,00182)\frac{4 \cdot 20,5}{90} = 0,0316.$$

$$P_{обр}^{mp} = e^{-\frac{73,56}{15,7}} = 0,00923.$$

$$\beta''' = N_{mp} \cdot P_{обб}^{mp} = 0,0316 \cdot 0,00923 = 0,00029.$$

Определим среднее годовое число перекрытий изоляции подстанции вследствие набегания на нее опасных импульсов грозовых перенапряжений:

$$b = b' + b'' + b''' = 0{,}00065 + 0{,}012565 + 0{,}00029 = 0{,}0135.$$

Показатель грозоупорности при трехлучевом заземлителе опор:

$$M = \frac{1}{\beta} = \frac{1}{0{,}0135} = 74{,}04 \text{лет}.$$

4.5 Расчет среднегодового числа грозовых отключений воздушной линии

Определим число ударов молнии в линию за год:

$$n_{уд} = 4 \cdot h_{тр.ср} \cdot \frac{L_{ВЛ}}{100} \cdot \frac{D_г}{100}, \qquad (4.42)$$

где $h_{тр.ср}$ – средняя высота подвеса троса, $h_{тр.ср} = 14{,}17$ м;

$L_{ВЛ}$ – длина воздушной линии, $L_{ВЛ} = 240$ км;

$D_г$ – число грозовых часов в году, $D_г = 55$ часов.

$$n_{уд} = 4 \cdot 14{,}17 \cdot \frac{240}{100} \cdot \frac{55}{100} = 74{,}82 \text{удара/год}.$$

Вероятность прорыва молнии сквозь тросовую защиту:

$$\lg P_\alpha = \frac{\alpha \cdot \sqrt{h_{оп}}}{A} - B, \qquad (4.43)$$

где α – защитный угол троса, $\alpha = 25^0$;

A=90, B=4 – для линий напряжением 110-220кВ.

Тогда

$$P_\alpha = 10^{\frac{\alpha \cdot \sqrt{h_{оп}}}{90} - 4} = 10^{\frac{25 \cdot \sqrt{20{,}5}}{90} - 4} = 0{,}00182.$$

Ток защитного уровня:

$$I_{зу} = \frac{2 \cdot U_{50\%}}{W_k} = \frac{2 \cdot 886{,}36}{435} = 4{,}075 \text{кА}, \qquad (4.44)$$

где $W_k = 435$ Ом – волновое сопротивление проводов воздушной линии с учетом короны.

При токе $I_{зу} = 20кА$ вероятность импульсного перекрытия гирлянды изоляторов при ударе молнии в провод вычисляется по формуле:

$$P_{пр} = \exp\cdot\left(-0{,}008\cdot I_{зу}\right) = exp\cdot\left(-0{,}008\cdot 4{,}075\right) = 0{,}968. \quad (4.45)$$

Вероятность перехода импульсного перекрытия изоляции в короткое замыкание при ударе молнии в провод и опору: $h_{пр} = h_{ор} = 0{,}7$ для линии $U_{ном} = 110кВ$ с металлическими и железобетонными опорами.

Доля ударов молнии в опору:

$$\Delta_{оп} = 4\cdot\frac{h_{оп}}{l_n} = 4\cdot\frac{20{,}5}{90} = 0{,}911 \quad (4.46)$$

где l_n – длина пролета, $l_n = 90$ м.

Доля ударов молнии в трос:

$$\Delta_{тр} = 1 - \Delta_{оп} = 1 - 0{,}911 = 0{,}0889.$$

Вероятность перекрытия линейной изоляции:

$$P_{оп} = \exp\cdot\left(-0{,}008\cdot I_{зу}\right) \text{ при } I_{кр} \prec 20кА,$$

$$P_{оп} = \exp\cdot\left(-0{,}03\cdot I_{зу}\right) \text{ при } I_{кр} \succ 20кА,$$

где $I_{кр}$ – критический ток, кА.

$$I_{кр} = \frac{U_{50\%}}{R_и + \delta\cdot h_{оп}} \quad (4.47)$$

$$I_{кр} = \frac{886{,}36}{4{,}34 + 0{,}3\cdot 20{,}5} = 84{,}5кА.$$

Тогда $P_{оп} = \exp\cdot\left(-0{,}03\cdot 84{,}5\right) = 0{,}0793$.

Критическая крутизна волны напряжения, при которой может произойти пробой промежутка трос-провод

$$a_{мкр} = \frac{2\cdot v\cdot l_{m-n}\cdot E_p}{W_{тр}\cdot l_n\cdot\left(1-k\right)}, \quad (4.48)$$

где W_{mp} – волновое сопротивление троса;

E_p – разрядная напряженность, $E_p = 750$ кВ/м;

ν – скорость движения волны, $\nu = 250$ м/мкс;

k – коэффициент электромагнитной связи, $k = 0{,}23$;

$l_п$ – длина пролета, $l_п$=90 м; $l_{т\text{-}п}$ – расстояние трос-провод, при учете защитного угла троса, м.

$$l_{m-n} = \frac{h_{m-n}}{\cos\alpha} = \frac{2{,}0}{\cos 25} = 2{,}21\text{м}. \quad (4.49)$$

$$W_{mp} = 60 \cdot \ln \cdot \frac{2 \cdot h_{cp.mp}}{D/2}, \quad (4.50)$$

где D – диаметр троса, D=0.012м по ГОСТ-3063-96.

$$W_{mp} = 60 \cdot \ln \cdot \frac{2 \cdot 14{,}17}{0{,}012/2} = 507{,}6\text{Ом}.$$

Тогда:

$$a_{мкр} = \frac{2 \cdot 250 \cdot 2{,}21 \cdot 750}{507{,}6 \cdot 90 \cdot (1-0{,}23)} = 23{,}56\text{кА/мкс}.$$

$$P = (a_{мкр}) = \exp \cdot (-0{,}06 \cdot a_{мкр}) = \exp \cdot (-0{,}06 \cdot 23{,}56) = 0{,}243.$$

Критический ток молнии:

$$I_{мкр} = a_{мкр} \cdot \frac{l_п}{\nu}, \quad (4.51)$$

где ν - скорость распространения электромагнитной волны, $\nu = 250$ м/мкс.

$$I_{мкр} = 23{,}56 \cdot \frac{90}{250} = 8{,}482\text{кА}.$$

Вероятность импульсного пробоя воздушного промежутка трос-провод при ударе молнии в трос:

$$P_{тр} = P(a_{мкр}) \cdot P(I_{мкр}), \quad (4.52)$$

где:

$$P = (I_{мкр}) = \exp \cdot (-0{,}008 \cdot I_{мкр}) = \exp \cdot (-0{,}008 \cdot 8{,}482) = 0{,}934.$$

тогда:

$$P_{тр} = 0{,}243 \cdot 0{,}934 = 0{,}227.$$

Вероятность установления дуги при пробое воздушного промежутка трос- провод:

$$h_{тр} = (1{,}6 \cdot E_{ср} - 6) \cdot 10^{-2}, \quad (4.53)$$

где $E_{ср}$ – средняя напряженность, кВ/м.

$$E_{ср} = \frac{U_{наиб.раб.ф}}{l_{т-п}}, \quad (4.54)$$

где

$$U_{наиб.раб.ср} = \frac{1{,}15 \cdot U_{л}}{\sqrt{3}} = \frac{1{,}15 \cdot 110}{\sqrt{3}} = 73{,}03 кВ. \quad (4.55)$$

$$E_{ср} = \frac{U_{наиб.раб.ф}}{l_{т-п}} = \frac{73{,}03}{2{,}21} = 33{,}045 кВ/м.$$

Тогда

$$h_{тр} = (1{,}6 \cdot 33{,}045 - 6) \cdot 10^{-2} = 0{,}469.$$

Число грозовых отключений линии:

$$n_{откл} = n_{уд} \cdot \left[P_{\alpha} \cdot P_{пр} \cdot h_{пр} + (1 - P_{\alpha}) \cdot (D_{оп} \cdot P_{оп} \cdot h_{оп} + D_{тр} \cdot P_{тр} \cdot h_{тр})\right] \quad (4.56)$$

$$n_{откл} = 74{,}82 \cdot [0{,}00182 \cdot 0{,}968 \cdot 0{,}7 + (10.00182) \cdot (0{,}911 \cdot 0{,}0793 \cdot 0{,}7 + 0{,}0889 \cdot 0{,}227 \cdot 0{,}469)]$$
$$= 4{,}576 \succ\succ 5 отключения$$

Число отключений линии с учетом применения АПВ за год:

$$N_{АПВ} = n_{откл} \cdot (1 - \beta_{АПВ}), \quad (4.57)$$

где $\beta_{АПВ}$ - коэффициент успешности срабатывания АПВ,

$\beta_{АПВ} = (0{,}8 \div 0{,}9)$.

Принимаем $\beta_{АПВ} = 0{,}85$.

$$N_{АПВ} = n_{откл} \cdot (1 - \beta_{АПВ}) = 4{,}576 \cdot (1 - 0{,}85) = 0{,}69.$$

Как было сказано выше, эффективность защиты подстанции характеризуется числом перекрытия изоляции, поскольку каждое перекрытие сопровождается возникновением больших токов короткого замыкания и мощных дуг, а образующиеся при перекрытиях срезы напряжения представляют серьезную опасность для внутренней изоляции трансформаторов.

Произведя необходимые расчеты получили, что среднее годовое число перекрытий изоляции $\beta = 0{,}0135$. При таком значении β число лет работы подстанции без отключений $M = 74$ года. Что говорит о высоком уровне грозоупорности подстанции, если учесть, что срок службы электрооборудования подстанции гораздо ниже.

Эффективность молниезащиты воздушной линии электропередач определяется исходя из среднегодового числа грозовых отключений. В результате расчетов получили число отключений $N_{откл.уст} = 0{,}69$. Что говорит о том, что для данной ВЛЭП использование одного троса вполне удовлетворяет необходимые требования по молниезащите. Но, следует отметить , что выбор одноцепных железобетонных опор является положительным фактором, так как по статистике среднегодовое число грозовых отключений для одноцепных ВЛ существенно меньше, чем для двухцепных.

Для увеличения эффективности молниезащиты следует уменьшать вероятность прорыва молнии сквозь защиту, а также уменьшать среднегодовое число перекрытий изоляции подстанции. Этого добиваются путем применения других конструкций опор (в требуемых ситуациях), заземлителей, используя иную конфигурацию системы молниеотводов, применяя большее чем один число тросов и т.д.

В целом можно утверждать, что рассчитанная подстанция удовлетворяет требуемым условиям грозозащиты.

5 Охрана труда и безопасность жизнедеятельности

5.1 Воздействие электрического тока на организм человека

Количество электрических травм в общем, числе невелико, до 1,5%. Для электроустановок напряжением до 1000 V количество электрических травм достигает 80%.

Причины электрических травм: Человек дистанционно не может определить находится ли установка под напряжением или нет.

Ток, который протекает через тело человека, действует на организм не только в местах контакта и по пути протекания тока, но и на такие системы как кровеносная, дыхательная и сердечно-сосудистая.

Возможность получения электрических травм имеет место не только при прикосновении, но и через напряжение шага и через электрическую дугу.

Электрический ток, проходя через тело человека, оказывает термическое воздействие, которое приводит к отекам (от покраснения, до обугливания), электролитическое (химическое), механическое, которое может привести к разрыву тканей и мышц; поэтому все электрические травмы делятся на местные и общие (электроудары).

Местные электрические травмы:

- электрические ожоги (под действием электрического тока);
- электрические знаки (пятна бледно-желтого цвета);
- металлизация поверхности кожи (попадание расплавленных частиц металла электрической дуги на кожу);
- электроофтальмия (ожог слизистой оболочки глаз).

Общие электрические травмы (электроудары):

1 степень: без потери сознания;

2 степень: с потерей;

3 степень: без поражения работы сердца;

4 степень: с поражением работы сердца и органов дыхания;

Крайний случай: состояние клинической смерти (остановка работы сердца и нарушение снабжения кислородом клеток мозга). В состоянии клинической смерти находятся до 6-8 мин.

Причины поражения электрическим током (напряжение прикосновения и шаговое напряжение):

1) Прикосновение к токоведущим частям, находящимся под напряжением;

2) Прикосновение к отключенным частям, на которых напряжение может иметь место:

2.1) В случае остаточного заряда;

2.2) В случае ошибочного включения электрической установки или несогласованных действий обслуживающего персонала;

2.3) В случае разряда молнии в электрическую установку или вблизи;

2.4) Прикосновение к металлическим не токоведущим частям или связанного с ними электрического оборудования (корпуса, кожухи, ограждения) после перехода напряжения на них с токоведущих частей

3) Поражение напряжением шага или пребывание человека в поле растекания электрического тока, в случае замыкания на землю.

4) Поражение через электрическую дугу при напряжении электрической установки выше 1кВ, при приближении на недопустимо-малое расстояние.

5) Действие атмосферного электричества при газовых разрядах.

6) Освобождение человека, находящегося под напряжением.

Факторы, влияющие на исход поражения электрическим током:

1) Род тока (постоянный или переменный, частота 50Гц наиболее опасна).

2) Величина силы тока и напряжения.

3) Время прохождения тока через организм человека.

4) Путь или петля прохождения тока.

5) Состояние организма человека.

6) Условия внешней среды.

Количественные оценки:

1. В интервале напряжения 450-500 В, вне зависимости от рода тока, действие одинаково:

- меньше 450 В — опаснее переменный ток,
- меньше 500 В — опаснее постоянный ток.

2. Кардиологические заболевания, заболевания нервной системы и наличие алкоголя в крови, снижают сопротивление тела человека.

3. Наиболее опасным является путь прохождения тока через сердечную мышцу и дыхательную систему.

Таблица 5.1 - Характер воздействия постоянного и переменного токов на организм человека

I, мА	Переменный (50 Гц)	Постоянный
0,5-1,5	Ощутимый. Легкое дрожание пальцев.	Ощущений нет.
2-3	Сильное дрожание пальцев.	Ощущений нет.
5-7	Судороги в руках.	Ощутимый ток. Легкое дрожание пальцев.
8-10	Не отпускающий ток. Руки с трудом отрываются от поверхности, при этом сильная боль.	Усиление нагрева рук.
20-25	Паралич мышечной системы (невозможно оторвать руки).	Незначительное сокращение мышц рук.
50-80	Паралич дыхания.	При 50мА не отпускающий ток.
90-100	Паралич сердца.	Паралич дыхания.

Таблица 5.2 - Подуровни напряжений прикосновения и сила тока при аварийном режиме электрических установок по ГОСТ 12.1.038-82

Род и частота тока	Норм. вел.	ПДУ, при t, с	
		0,01 - 0,08	свыше 1
Переменный f = 50 Гц	$U_Д$ $I_Д$	650 В —	36 В 6 мА
Переменный f = 400 Гц	$U_Д$ $I_Д$	650 В —	36 В 6 мА
Постоянный	$U_Д$ $I_Д$	650 В	40 В 15 мА

Сопротивление тела человека

Факторы, приводящие к уменьшению сопротивления тела человека: увлажнение поверхности кожи; увеличение площади контакта; время воздействия.

Сопротивление рогового (верхнего слоя кожи) от 10 до 100 кОм. Сопротивление внутренних тканей 800-1000 Ом. Расчетная величина $R_{чел} = 1000 Ом$.

Классификация помещений по опасности поражения электрическим током (ПУЭ-85).

Помещения I класса. Особо опасные помещения.

1.100 % влажность;

2.наличие активной среды.

Помещения II класса. Помещения повышенной опасности поражения электирческим током:

- повышенная температура воздуха (t = + 35 °С);
- повышенная влажность (> 75 %);
- наличие токопроводящей пыли;
- наличие токопроводящих полов;

-наличие электрических установок (заземленных) — возможности прикосновения одновременно и к электрической установке и к заземлению или к двум электрическим установкам одновременно.

Помещения III класса. Мало опасные помещения. Отсутствуют признаки, характерные для двух предыдущих классов.

Закон Ома в дифференциальной форме:

$$E = i \cdot \rho$$

где ρ - удельное сопротивление грунта [Ом·м];

i - плотность тока.

Т.к. падение напряжения между двумя точками или разность потенциалов

$$V_{Ae} = \int_{x_A}^{x_0} dU = \int_{x_A}^{x_0} \Gamma' \cdot dx = \int_{x_A}^{x_0} r_i dx = \int_{x_A}^{x} \frac{I}{2px^2} r dx = \frac{I}{2p} r \cdot \int_{x}^{x_e} \frac{dx}{x^2} = \frac{I}{2p} r \cdot \frac{I}{X} \Big|_{x_A}^{x_e} = \frac{I}{2p} r \cdot \left(\frac{I}{X_e} - \frac{I}{A} \right)$$

$$V_{A_e} = \frac{I \cdot r}{2p} \cdot \left(\frac{X_A}{X_e} - \frac{X_e}{X_A} \right) \qquad (5.1)$$

$$X_B \to \infty (X \approx 2Ом), \varphi \approx 0$$

$$j_A = \frac{I \cdot r}{2p \succ A} \qquad (5.2)$$

Распределение потенциала по поверхности земли осуществляется по закону гиперболы.

Напряжение прикосновения — это разность потенциалов точек эл. цепи, которых человек касается одновременно, обычно в точках расположения рук и ног.

$$V_{пт} = j_T - j_H = \frac{Ir}{2p}(1-1) = \frac{Ir}{2p} \qquad (5.4)$$

Напряжение шага — это разность потенциалов φ1 и φ2 в поле растекания тока по поверхности земли между точками, расположенными на расстоянии шага (≈ 0,8 м).

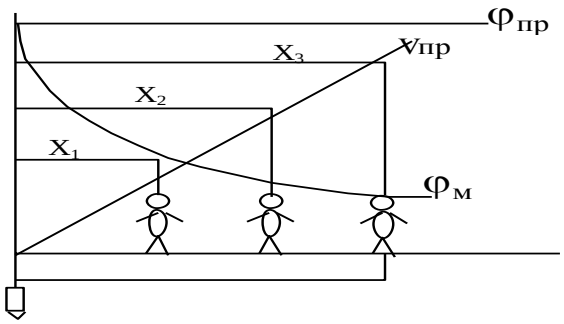


Рисунок 5.1 – Схема шагового напряжения

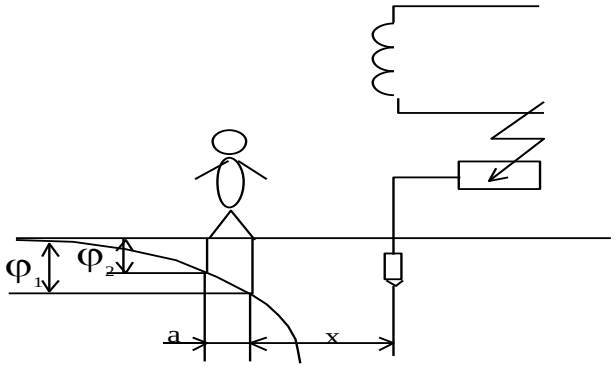


Рисунок 5.2 – Схема возникновения шагового напряжения при аварии

$$V_{й} = j_1 - j_2 = \frac{I_г}{2p}\left[\frac{1}{\succ} - \frac{1}{\succ + \Theta}\right] = \frac{I_г}{2p} \cdot \frac{\succ + \Theta \rightarrow}{\succ(\succ + \Theta)} = \frac{I_г}{2p} \cdot \frac{\Theta}{(\succ + \Theta)} \qquad (5.5)$$

Методы и средства защиты: заземление, зануление, отключение

Таблица 5.3 - Виды и анализ электрических сетей

3-х фазная 3-х проводная сеть с изолированной нейтралью	
Нормальный режим работы	$V_{ПР} = V_Ф$; $V_A = \sqrt{3} V_Ф$ $I_4 = \frac{3\,U_e}{3R_4 + R_{C,}}$ U до 1000 В R_4 = 1000 Ом $R_{ИЗ}$ = 500000 Ом $I_4 = \frac{3 \cdot 220}{3 \cdot 1000 + 500000} = 1{,}3$ мА (легкое дрожание пальцев)
Автоматический режим работы	R4 = 1000 Ом; RЗИ = 100 Ом $I_4 = \frac{V_1}{R_4 + R_{,C}}$ мА, I4=346 мА (паралич сердца)
3-х фазная 4-х проводная с заземленной нейтралью	
Нормальный режим работы	$V_Ф$ = 220 В, R_4 = 1000 Ом, $R_Н$ = 4 Ом $I_4 = \frac{V_Ф}{R_4 + R_н}$ мА I_4 = 220 мА (паралич сердца)
Автоматический режим работы	R_4 = 1000 Ом; $R_Н$ = 4 Ом; $R_{ЗИ}$ = 100 Ом; $V_Ф$ = 220 В $I_4 = \frac{V_Ф(R_{,C} + R_Н\sqrt{3})}{R_{,C} \cdot R_Н + R_4(R_{,C} + R_4)}$ I_4=225 мА (паралич сердца)

Общетехнические средства защиты:

1)Рабочая изоляция

2) Для оценки изоляции используют следующие критерии:

3) сопротивление фаз электрической проводки без подключенной нагрузки $R_1 \geq 0{,}05$;

4) сопротивление фаз электрической проводки с подключенной нагрузкой $R_2 \geq 0{,}08$ МОм.

5) Двойная изоляция

6) Недоступность токоведущих частей (используются осадительные средства — кожух, корпус, электрический шкаф, использование блочных схем и т.д.)

7) Блокировки безопасности (механические, электрические)

8) Малое напряжение

9) Для локальных светильников (36 В), для особо опасных помещений и вне помещений.

10) В используется во взрывоопасных помещениях.

11) Меры ориентации (использование маркировок отдельных частей электрического оборудования, надписи, предупредительные знаки, разно цветовая изоляция, световая сигнализация).

Специальные средства защиты:

1. Заземление;

2. Зануление;

3. Защитное отключение.

Принцип действия заземления.

Снижение напряжения между корпусом, оказавшимся под напряжением (в случае аварийной ситуации) и землей, до безопасной величины.

Заземление используется в 3-х фазных 3-х проводных сетях с изолированной нейтралью. Эта система заземления работает в том случае, если RH ≤ 4 Ом; V < 1000 В; RH ≤ 0,5 Ом; V > 1000 В (ПУЭ-85).

Принцип действия зануления.Преднамеренное соединение корпусов электрических установок с многократно заземленной нейтралью трансформатора или генератора.

Превращение замыкания на корпус в короткое однофазное замыкание за счет срабатывания токовой защиты, которая отключает систему питания и тем самым отключается поврежденное устройство.

Принцип действия защитного отключения

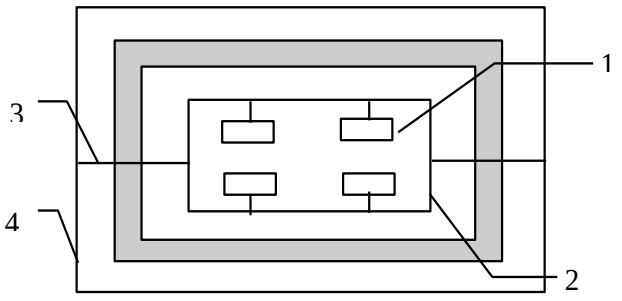
Это преднамеренное автоматическое отключение электрической установки от питающей сети в случае опасности поражения электрическим током. Условия, при которых выполняется заземление или зануление в соответствии с требованиями ПУЭ-85.

В особо опасных помещениях, помещениях с повышенной опасностью и вне помещений 42 В и выше переменного тока 110 В и выше пост. тока

При всех напряжениях во взрывоопасных помещения.

Заземляющие устройства бывают естественными (используются конструкции зданий) в этом случае нельзя использовать те элементы, которые при попадании искры приводят к аварии (взрывоопасные).

Искусственные — контурное и выносное защитное заземляющее устройство.



1- электрическая установка; 2- внешний контур;
3 - шина заземления; 4- внутренний контур

Рисунок 5.3 - Контурное заземляющее устройство

6 Экономическая оценка эффективности инвестиции в строительство подстанции

6.1 Экономическая и финансовая эффективность в строительство ЛЭП и подстанции

В соответствии со строительными нормами срок строительства ПС «Романовка» и строительства ЛЭП 35 кВ принят равным одному году.

Организационная структура управления принята как и действующих региональных подстанциях. Ремонт части оборудования, арматуры и токопроводов выполняется силами персонала подстанции, включаемого в штатное расписание. Особо сложные ремонтные работы выполняются с привлечением персонала специализированных ремонтных организаций. На ПС и на строящейся ЛЭП устанавливается современное высокоавтоматизированное оборудование, что обеспечивает надежное электроснабжение потребителей.

Капитальные вложения и издержки в строительство ЛЭП и подстанции были рассчитаны в разделе технико-экономического сравнения двух вариантов сети. Экономические показатели выбранного варианта приведены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Затраты по проекту

Затраты	ПС, млн. тенге	ЛЭП, млн. тенге
Капиталовложения	221,6	305
Ежегодные издержки на амортизацию и эксплуатацию	20,8	8,5
Затраты на возмещение потерь электроэнергии	5,2 млн. тенге	

Определяем себестоимость передачи электроэнергии по проектируемой ЛЭП. Приведенные затраты по варианту сети составляют 561,1 млн.тенге. Себестоимость определяется суммарными издержками, связанными с передачей и распределением электроэнергии, и количеством энергии отпущенной потребителю

$$S = \frac{И}{Э_{год}}, \qquad (6.1)$$

$$S = \frac{561{,}1 \cdot 10^6}{431 \cdot 10^6} = 1{,}3 \text{тенге} / \text{кВт} \cdot \text{ч}.$$

С учетом отпускной цены станции ($S = 1{,}5 \text{тенге} / \text{кВт} \cdot \text{ч}$), тарифа НЭСа ($S = 0{,}75 \text{тенге} / \text{кВт} \cdot \text{ч}$), и РЭКа ($S = 2 \text{тенге} / \text{кВт} \cdot \text{ч}$) себестоимость передачи будет равна

$$S = 1{,}3 + 1{,}5 + 0{,}7 + 2 = 5{,}5 \text{тенге} / \text{кВт} \cdot \text{ч}.$$

Тогда тариф на электроэнергию с учетом рентабельности 50% составит

$$T = S \cdot R, \tag{6.2}$$

$$T = 5{,}5 \cdot 1{,}15 = 6{,}32 \text{тенге} / \text{кВт} \cdot \text{час}.$$

Объем реализации (стоимость реализованной электроэнергии) в проекте принимается неизменной и определяется как

$$C = T \cdot W, \tag{6.3}$$

где T – цены на электроэнергию, равная $6{,}32 \text{тенге} / \text{кВт} \cdot \text{час}$,

W – объем реализуемой электроэнергии, $\text{млн.кВт} \cdot \text{час}$.

$$C = 6{,}32 \cdot 431 = 2723{,}92 \text{млн.тенге}.$$

Строительство и эксплуатация рассматриваемых энергообъектов осуществляется за счет привлечения собственных средств организации и заемного капитала потенциальных инвесторов.

Схема выплаты процентов за кредит принимаем из расчета 15 % годовых, начиная с первого года эксплуатации.

NPV показывает на какую ценность фирма может прирасти, в результате реализации инвестиционного проекта.

Расчет NPV идет до 1-го положительного значения.

Таблица 6.2 – Расчет NPV

Годы	CF, млн. тенге.	R15	PV15, млн. тенге.	R20	PV20, млн. тенге.
0	-561,1	1	-561,1	1	-561,1
1	2723,92	0,87	1788,60	0,833	1712,53
2	2723,92	0,756	1554,23	0,694	1426,77
3	2723,92	0,658	1352,95	0,579	1190,34
4	2723,92	0,572	1175,76	0,482	990,92
5	2723,92	0,497	1021,76	0,402	929,25
6	2723,92	0,432	888,13	0,335	688,71
	2723,92		$\sum$6377.42		$\sum$6377.42
	2723,92		NPV=37.15		NPV=-37.48

Если NPV в нужные фирмы сроки положительный, то значит в результате проекта ценность фирмы возрастает и его надо принимать.

NPV определяется по формуле:

$$NPV = -I_0 + \sum_{t=0}^{n} \frac{CF_t}{(1+r)^t}, \qquad (6.4)$$

где I_0 - инвестиции в данный проект, млн. тенге.,

CF_t - поток наличности, млн. тенге.,

r – ставка дисконтирования,

t – время реализации проекта, год.

Внутренняя норма прибыли представляет собой уровень окупаемости средств направленных на цели инвестирования. Это значение r при котором NPV = 0. IRR при NPV = 0, это когда проект не обеспечивает роста ценности фирмы, но и не ведет к ее снижению.

IRR служит индикатором уровня риска по проекту. Чем больше IRR превышает принятый фирмой барьерный коэффициент, тем больше запас прочности проекта и тем менее страшны ошибки при оценке будущих денежных поступлений.

Рассчитываем IRR для r = 20 % банковского процента и методом интерполяции при помощи r = 15 % определим IRR по формуле:

$$IRR = r_1 + \frac{NPV_1}{NPV_1 - NPV_2} \cdot (r_2 - r_1), \qquad (6.5)$$

где r_t - банковский процент в размере 15 %,

r_2 - банковский процент в размере 20 %,

$NPV_1 - NPV$ при банковском проценте 15 %,

$NPV_2 - NPV$ при банковском проценте 20 %.

$$IRR = 15 + \frac{37.15}{37.15 + 37.48}(20 - 15) = 17.5\%$$

Определяем срок окупаемости. Метод состоит в определении того срока окупаемости, который необходим для возмещения суммы первоначальных инвестиций.

$$PP = \frac{I_0}{CF}, \qquad (6.6)$$

$$PP = \frac{2723.92}{269.9} = 10 \text{ лет.}$$

Из предельных расчетов видно, что срок окупаемости инвестиций составил 10 лет.

Таким образом, анализ приведенных финансово-экономических показателей свидетельствует об эффективности инвестиций в рассматриваемый проект.

Заключение

Источником возникновения атмосферных перенапряжений в системах является грозовой разряд, обычно в виде молнии между облаком и землей. Если перенапряжение возникло в результате поражения молнией проводов сети, то говорят о перенапряжениях прямого удара молнии (ПУМ). При отсутствии непосредственного поражения молнией проводов атмосферное перенапряжение называется индуктированным. Перенапряжения прямого удара молнии могут достигать значений, достаточных для перекрытия изоляции линий любого класса напряжения. Основной мерой защиты линий передачи от прямых ударов молнии является подвеска хорошо заземленных тросов, экранирующих провода. Важным средством повышения надежности линий является автоматическое повторное включение.

Волны перенапряжений, возникающие на линии, набегают на подстанцию, где они воздействуют на изоляцию трансформаторов, аппаратов и ошиновки. Основным средством защиты подстанционной изоляции служат вентильный разрядник РВ и нелинейные ограничители перенапряжений ОПН. Успехи в конструировании ОПН и в разработке схем защиты обеспечивают в настоящее время создание надежной защиты трансформаторных подстанций, а также вращающихся машин, приключенных к воздушным линиям.

Воздушные линии электропередачи испытывают ежегодно десятки ударов молнии в каждые 100 км линии. Поражение молнией фазного провода, сопровождающееся прохождением большого тока, создает на проводе такое высокое импульсное напряжение, что практически невозможно создать изоляцию, которая могла бы его выдержать. Поэтому в большинстве случаев линии на металлических опорах имеют один или два заземленных троса, подвешиваемых выше фазных проводов и воспринимающих на себя удар молнии. Однако наличие тросов не исключает возможности появления высоких потенциалов на вершине металлической опоры при прямых ударах в нее молнии даже при малых импульсных сопротивлениях заземления опоры. Высокий потенциал на опоре может стать причиной разряда с опоры на фазный провод (обратное перекрытие).

В данной работе рассмотрены вопросы защиты линий электропередачи 110 кВ от атмосферных перенапряжений, принципы защиты РУ 110 кВ от грозовых перенапряжений, произведены расчеты числа перекрытий и отключений линий $U_н = 110$ кВ, а также расчет и проектирование грозозащиты подстанции $U_н = 110$ кВ.

Список литературы

1 Базуткин В.В., Ларионов В.П., Пинталь Ю.С. Техника высоких напряжений /Под ред. В.П.Ларионова. – М.: ЭАИ, 1986. – 464 с.

2 Техника высоких напряжений /Под ред. Д.В.Разевига. – М.: Энергия, 1976. – 488 с.

3 Техника высоких напряжений /Под ред. М.В.Костенко. – М.: Высшая школа, 1973. – 528 с.

4 Долгинов А.И. Техника высоких напряжений в электроэнергетике. – М.: Энергия, 1968. – 468 с.

5 Базуткин В.В., Дхомовская Л.Ф. Расчеты переходных процессов и перенапряжений. – М.: ЭАИ, 1983. – 328 с.

6 Сви П.М. Контроль изоляции оборудования высокого напряжения. – М.: Энергия, 1980. – 112 с.

7 Долгинов А.И. Перенапряжения в электрических системах. – М.-Л: Госэнергоиздат, 1962. – 512 с.

8 Сиротинский Л.И. Техника высоких напряжений /Волновые процессы и внутренние перенапряжения в электрических системах. – М.-Л: Госэнергоиздат, 1959. – 365 с.

9 РД 153-34.3-35.125-99. Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений /Под научной редакцией Н.Н.Тиходеева. –2-е изд. –СПб: ПЭИПК Минтопэнерго РФ, 1999. –355 с.

10 Костенко М.В., Ефимов Б.В., Зархи И.М., Гумерова Н.И. Анализ надежности грозозащиты подстанций. –Л.: «Наука», 1981. –128 с.

11 Правила устройства электроустановок. Издание 7-е. –М.: Энергоатомиздат, 2004.

12 Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей. Издание 15-е. – М.:Энергоатомиздат, 1996. –288 с.

13 Дмитриев М.В., Евдокунин Г.А. Моделирование процессов в цикле ОАПВ сиспользованием программного комплекса ЕМТР//Сборник докладов международной научно-технической конференции “Перенапряжения и надежность эксплуатации электрооборудования”, 05-09 апреля 2004 года, выпуск №3, Минск.: Изд-во ПЭИПК Минтопэнерго РФ, С-Петербург, 2004. – 380 с.

14 Базуткин В.В., Кадомская К.П., Костенко М.В., Михайлов Ю.А. Перенапряжения в электрических системах и защита от них. Учебник для вузов. –СПб.: Энергоатомиздат, Санкт-Петербургское отд-ние, 1995. –320 с. – ISBN 5-283-04423-8.

15 Костенко М.В., Кадомская К.П., Левинштейн М.Л., Ефремов И.А. Перенапряжения и защита от них в воздушных и кабельных электропередачах высокого напряжения. –Л.: «Наука», Ленинградское отд-ние, 1988. –302 с. – ISBN 5-02-024434-1.