

*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования*

«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Институт энергетики

На правах рукописи

Пашичева Светлана Александровна

**«Применение УЗИП в сетях собственных нужд и
системы оперативного постоянного тока подстанций 35 кВ и выше»**

Направление подготовки 13.06.01 – Электро- и теплотехника

Наименование ООП 13.06.01_08 – Техника высоких напряжений

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Автор работы: Пашичева С.А.

Научный руководитель:

профессор, д.т.н. Титков В.В.

Санкт-Петербург – 2020

Научно-квалификационная работа выполнена в ВШВЭ института энергетики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Директор ВШВЭ: – *Белько Виктор Олегович – к.т.н., доцент*

Научный руководитель: – *Титков Василий Васильевич – д.т.н., профессор*

Рецензент: – *Монастырский Александр Евгеньевич – к.т.н.,
главный специалист ООО "Дизкон"*

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru/>

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Удары молнии и переходные процессы в высоковольтных сетях являются одними из основных причин, вызывающими повреждение или нештатную работу

оборудования на объектах энергетики. Проблема обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) стала актуальной с момента внедрения микропроцессорного оборудования, которое было более помеховосприимчивым.

Под проблемой обеспечения ЭМС первоначально понимались нарушения работы, связанное, как правило, с развитием перенапряжений в контрольных кабелях. Однако, с вводом в эксплуатацию большого числа подстанций с компактными КРУЭ возросло количество технологических нарушений связанных с повреждением или ложной работой слаботочных систем комплексных систем безопасности (КСБ). Например, таких систем как сигнализации: охранная и пожарная, систем управления доступом в помещения (СКУД), охранного и технологического видеонаблюдения.

После ведения требований СТО ПАО «ФСК ЕЭС» [1,2], в частности, требований применения экранированных кабелей для всех контрольных и сигнальных цепей, основной причиной нарушения требований ЭМС в таких цепях становятся относительно редкие воздействия вызванные протеканием токов молнии и токов коротких замыканий (КЗ). Значительно чаще повреждаются системы питания. Причина сложившейся ситуации вероятно связана с сохраняющейся традицией применения неэкранированных кабелей в сети собственных нужд (СН) и сети оперативного постоянного тока (СОПТ). Отметим, что подавляющее большинство подстанций (ПС), построенных ранее 2010 года также выполнены без какого-либо экранирования цепей СН и СОПТ (за исключением ЭС).

Развитие перенапряжений в сетях СН и СОПТ также может приводить к ложной работе и повреждению портов питания микропроцессорного оборудования, а в худших случаях и к возгораниям.

Определение необходимости использования средств защиты оборудования от импульсных перенапряжений, возникающих вследствие воздействия прямых и близких ударов молнии, требует оценки вероятности таких воздействий и оценки степени их опасности для изоляции оборудования и коммуникаций ПС. Изучению этого вопроса и посвящены работы Д.В. Разевига [44], Г.Н. Александрова [45], Э.М.Базеляна [46], Ф.Х. Халилова [47], А.С. Гайворонского [49], Б.В. Ефимова, Н.И. Гумеровой [48], и др.

Анализ процесса растекания тока в проводящих конструкциях и изучение переходных процессов с помощью моделей и методов теории заземлителей, примененных в данном исследовании для расчета перенапряжений в сети СН, содержится в трудах Е.С. Колечицкого [50], Н.В. Коровкина [51], С.Л. Шишигина [52] и др.

В настоящий момент объекты энергетики продолжают оснащаться новыми электронными системами, что связано с процессом внедрения цифровых технологий для реализации задачи цифровой трансформации отрасли [3]. Причем значительное количество такого оборудования

устанавливается на находящихся в эксплуатации объектах без выполнения проектных работ в части обеспечения ЭМС. Такая ситуация приводит к длительному существованию и постепенному накоплению скрытых дефектов, которые могут проявиться при ударах молнии в объект.

Таким образом, обеспечение ограничения грозовых перенапряжений в сетях СН и СОПТ, особенно с учетом того, что они связаны практически со всеми системами управления и жизнеобеспечения объекта, является актуальной задачей.

Устройства защиты от импульсных перенапряжений (УЗИП) – являются одной из мер аппаратной защиты таких систем. Аппаратная защита является относительно дорогостоящим методом борьбы с перенапряжениями, однако, в силу того, что СОПТ и СН имеют разветвленную структуру, установка УЗИП на шинах РУ и основных «опасных», с точки зрения развития перенапряжений участках сети, выглядит оправданной мерой. Например, один комплект УЗИП на шинах РУ будет ограничивать перенапряжения, источники которых могут находиться на разных отходящих кабельных линиях.

Использованию УЗИП в электроустановках и обзору требований нормативно-технической документации в отношении УЗИП посвящены работы А.Л. Зоричева, например, [53] и Э.М. Базеляна [19]. Однако, до настоящего момента вопрос применения УЗИП для ПС не формализован, даже несмотря на то, что применение УЗИП может вызывать снижение надежности работы систем.

Данная работа посвящена изучению вопросов применения УЗИП в условиях, характерных для ПС напряжением 35 кВ и выше. для защиты оборудования СН и СОПТ и обеспечения соответствия качества электроснабжения потребителей этих сетей.

Разработка рекомендаций по определению характеристик и схем подключения УЗИП для их применения на этапе проектирования, обоснованных расчетным и экспериментальным способом, позволит обеспечить повышение надежности работы оборудования ПС, что является масштабной и актуальной задачей.

Объектом исследования являются СН и СОПТ подстанций 35-750 кВ и потребители СН и СОПТ.

Предметом исследования являются перенапряжения в СН и СОПТ, возникающие в результате прямых и близких ударов молнии в оборудование и коммуникации ПС, с учетом влияния на них УЗИП.

Целью исследования является разработка рекомендаций по выбору параметров и схем подключения УЗИП в СН и СОПТ подстанций 35 кВ и выше для защиты от грозовых перенапряжений, учитывающих современные требования к электромагнитной совместимости,

надежности и качеству электропитания потребителей СН и СОПТ, для предотвращения повреждений и сбоев в работе оборудования и потребителей этих сетей.

Задачи исследования. Для реализации цели при проведении исследования были поставлены и решены следующие задачи:

- 1) анализ состава оборудования, потребителей и схем СН и СОПТ, современных тенденций изменения требований по электромагнитной совместимости и состава потребителей СН и СОПТ;
- 2) разработка моделей ПС 110 кВ для анализа уровней перенапряжений в сети СН на примере сети освещения, расчетно-экспериментальное исследование процесса протекания тока молнии в сети освещения ПС;
- 3) определение основных условий для принятия проектировщиками решения об использовании УЗИП и указание мест их установки для защиты от перенапряжений сетей СН и СОПТ на ПС 35 кВ и выше.
- 4) разработка рекомендаций по выбору амплитуды импульсного тока УЗИП класса I, так как данный дорогостоящий класс УЗИП применяется для защиты оборудования расположенного в зоне 0-В на территории ПС.
- 5) разработка рекомендаций по схемам подключения УЗИП в системах СН и СОПТ ПС 35 кВ и выше.

Апробация и внедрение результатов работы. Основные положения работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- VI международной научно-технической конференции «Полимерные и керамические изоляторы и изоляционные конструкции высокого напряжения. Воздействие перенапряжений на твёрдую изоляцию ВЛ и подстанций» (ФГАОУ ДПО «ПЭИПК», 28-29 января, г. Санкт-Петербург, 2016 г.)

- восьмой международной научно-технической конференции «Перенапряжения и надёжность эксплуатации электрооборудования» имени академика Н.Н.Тиходева (ФГАОУ ДПО «ПЭИПК» 14 декабря, г. Санкт-Петербург, 2017 г.)

- двенадцатой научно-технической конференции «Гидроэнергетика. Гидротехника. Новые разработки и технологии» (ПАО «РусГидро», АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», АО «Ленгидропроект», ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого», Ассоциация «Гидроэнергетика России», 15-16 ноября, г. Санкт-Петербург, 2018 г.)

- международной он-лайн конференции «Высоковольтные воздушные и кабельные линии электропередачи: актуальные вопросы и новые тенденции» (АО «НПО «Стример», 28-30 апреля, г. Санкт-Петербург, 2020 г.)

1 ОБЗОР ПРОБЛЕМЫ

1.1 Система собственных нужд

Сеть СН ПС питается от трансформаторов собственных нужд, подключенных к разным источникам питания (секциям распределительного устройства ПС, питающимся от разных силовых трансформаторов и т.п.). При относительно небольшой мощности (63–160 кВА) трансформаторов собственных нужд (ТСН) обычно применяются двухступенчатые схемы электроснабжения потребителей СН как наиболее простые и надежные. Верхняя ступень – щит собственных нужд (ЩСН) 380/220 В, нижняя – силовые сборки и шкафы управления на ОРУ, в ЗРУ, ОПУ, а также в других вспомогательных зданиях и сооружениях. Однако, при ТСН мощностью 400–1000 кВА и более такие простые схемы могут привести к существенному увеличению капитальных затрат на кабельные сети. Это связано с необходимостью резервирования отказа автоматических выключателей (АВ) отходящих от ЩСН фидеров вводным выключателем. В случае, когда подстанция выполнена в виде КРУ, питание сети СН может осуществляться напрямую с шин 0,4 кВ РУ низкого напряжения.

Сеть собственных нужд является наиболее разветвленной сетью на ПС. Потребителями СН являются практически все вспомогательные устройства переменного тока, обеспечивающие работу ПС.

Все потребители в соответствии с [24] разделяются на категории по ответственности (Таблица 1.1) и по длительности включения (Таблица 1.2).

Таблица 1.1 – Категории потребителей СН по ответственности

Категория	Последствия потери питания	Потребители
А-0	приводит к отказу основного оборудования, угрозе жизни людей, взрывам, пожарам	Оборудование АСУ ТП; оборудование устройств телемеханики; оборудование охранной и пожарной сигнализаций; приборы водяного и газового пожаротушения и т.д.
А-1	приводит к нарушению нормального режима работы, частичному или полному отключению ПС	Светильники аварийного освещения; светильники охранного освещения территории; оборудование обогрева высоковольтной коммутационной аппаратуры в районах, в которых значение температуры воздуха меньше -50°C (для ПС с отсутствием дежурного персонала); электродвигатель насоса пожаротушения; электродвигатель насоса принудительной циркуляции масла силового трансформатора (реактора) и т.д.
А-2	отключение допустимо на время включения резервного питания дежурным персоналом или до приезда обслуживающего персонала на ПС без дежурства	Приборы отопления производственных помещений; нагревательный элемент системы обогрева шкафов наружной установки в том числе релейных шкафов; обогрев РПН; электродвигатели приводов ножей разъединителя; оборудование системы кондиционирования помещений панелей РЗА и АСУ ТП, серверного оборудования; и т.д.
А-3	допустимы более длительные перерывы питания, чем для категории А-2	Светильники рабочего и дежурного освещения; электродвигатели вентиляторов бытовых помещений; Электродвигатель насосной станции системы бытового водоснабжения; сварочная сеть и т.д.

Таблица 1.2– Категории потребителей СН по длительности включения

Категория	Длительность включения	Потребители
Б-1	потребители, постоянно	Электродвигатель насоса и вентилятора системы

	включенные в сеть (в том числе цепи управления и релейной защиты);	охлаждения трансформатора (реактора); электродвигатель насоса пожаротушения; электродвигатель насоса принудительной циркуляции масла силового трансформатора (реактора); оборудование АСУ ТП и т.д.
Б-2	потребители, включаемые периодически (например, в зависимости от температуры наружного воздуха, или имеющие технологические перерывы в работе)	Светильники аварийного освещения; светильники охранного освещения территории; оборудование обогрева; приборы отопления производственных помещений; нагревательный элемент системы обогрева шкафов наружной установки в том числе релейных шкафов; обогрев РПН; электродвигатели приводов ножей разъединителя и т.д.
Б-3	потребители, включаемые во время ремонта или аварии	Электродвигатель насоса пожаротушения; сварочная сеть и т.д.

Согласно [24] сети СН переменного тока выполняют на напряжение 380/220 В с системой заземления TN-S и TN-C-S. Точка разделения PEN и PE проводников, как правило, располагается в ЩСН, иногда, непосредственно на трансформаторе СН. Схемы питания потребителей выбираются в соответствии с их категорией электроснабжения по ответственности и длительности включения.

Вследствие необходимости обеспечения требований электробезопасности, наличия многократно подключенных к системе заземления/уравнивания потенциалов защитных проводников сеть является несимметричной. То есть, условия для развития перенапряжений относительно «земли» для разных проводников: фазного L, нулевого N и защитного PE, отличаются.

Наиболее подверженными воздействию перенапряжений системами являются рабочее и охранное освещение, вентиляция, видеонаблюдение, то есть оборудование, которое располагается непосредственно на конструкциях с молниеотводами, либо на кровле зданий и сооружений.

Исторически для прокладки КЛ СН использовались кабельные линии с ПВХ изоляцией, как правило, без экранов. Следует отметить, что согласно СТО ПАО ФСК ЕЭС прокладка неэкранированных КЛ в помещениях и территории РУ запрещена, если не приведено расчетное обоснование такого решения.

Важной особенностью системы является то, что к ней подключено большое количество оборудования, не подвергающегося жестким испытаниям по программам, характерным для микропроцессорного оборудования систем РЗА и т.п. Чаще всего наиболее помеховосприимчивым оборудованием, получающим питание по системе СН, оказывается обычное «бытовое» электронное оборудование. Повреждение такого оборудования несет в себе риски пожара.

Таблица 1.3 – Требования к помехоустойчивости низковольтных входных портов оборудования, питающегося от переменного тока на ПС высокого напряжения

Вид помех	Стандарт на метод испытаний на помехоустойчивость	Степень жесткости испытаний	Испытательный уровень	Примечание
Микросекундные импульсные помехи большой энергии (1/50 мкс - 6,4/16мкс) по схеме: - провод-провод - провод-земля	ГОСТ Р 51317.4.5	-	4 2	4 кВ 3 кВ
Повторяющиеся колебательные затухающие помехи по схеме - провод-провод - провод-земля	ГОСТ Р 51317.4.12	Испытания проводят при частоте 1 МГц (более высокие частоты для испытаний оборудования для подстанций с газовой изоляцией - на рассмотрении)	3	2,5 кВ 1 кВ

Помехоустойчивость оборудования 0,4 кВ в соответствии с [32] представлены в таблице 1.3. Импульсная прочность изоляции кабелей в соответствии с [1] на стадии проектирования может быть принята равной 15 кВ/мм.

Защиту сети СН от перенапряжений в [24] рекомендуется организовывать с применением УЗИП комбинированного типа I+II класса, установленного на каждой секции ЩСН.

Для применения в условиях действующей ПС оборудование 0,4 кВ должно пройти испытания по 3 или 4 степени жесткости.

1.2 Система оперативного постоянного тока

В общем случае система оперативного постоянного тока (СОПТ) на ПС высоких классов напряжения представляет собой совокупность источника питания, включающего в себя аккумуляторные батареи (АБ) и зарядные устройства (ЗУ), щита постоянного тока (ЩПТ), кабельной распределительной сети и потребителей.

Потребителями постоянного тока на ПС являются устройства релейной защиты и автоматики, в т. ч. противоаварийной автоматики, устройства связи, телемеханики, управления, аварийное освещение и т.п.

В соответствии с [20] все потребители оперативного тока делятся на 5 основных категорий в соответствии с требованиями к надежности их питания (Таблица 1.4).

Таблица 1.4 – Категории потребителей оперативного тока

Категория	Последствия потери питания	Потребители
-----------	----------------------------	-------------

А	потеря питания может привести к повреждению первичного оборудования или к человеческим жертвам	релейная защита, противоаварийная автоматика, автоматика управления выключателем, телеотключение и телеуправление, автоматика пожаротушения.
В	потеря питания ведет к увеличению времени ликвидации аварии	АСУ ТП, сигнализация, блоки аварийного освещения, зависимые приводы баковых масляных выключателей и т.п.
С	при потере питания устройства способны выполнить либо ограниченное количество циклов действия, либо имеют альтернативное управление	цепи оперативной блокировки и управления разъединителями, двигатели независимых приводов ВВ, оперативная связь, охранный и пожарная сигнализация оперативная связь, приводы разъединителей и РПН трансформаторов и автотрансформаторов
Д	устройства имеют высокую инерцию изменения состояния при потере питания	Цепи технологического обогрева
Е	допускается значительное снижение мощности в аварийном режиме	Технологическое освещение

Конфигурация СОПТ зависит от выбранных схем распределения питания всех потребителей в соответствии с требуемой надежностью. В [20] предложено разделение схем питания потребителей СОПТ по категориям надежности. На рис. 1.2 показан пример типичной схемы СОПТ, где шины ED и EF обеспечивают категорию питания «А1», а шины ЕС - категорию питания «А2».

Зачастую СОПТ является симметричной, проводники разных полюсов изолированы от заземляющего устройства, что значительно ограничивает уровень помех между ними. В этом случае основное внимание необходимо уделять защите изоляции «L-PE».

Применение экранированных кабелей позволяет снизить уровень помех. Однако исторически на значительном числе существующих объектов ЕНЭС кабельные линии СОПТ выполнены без экранов. На ОРУ 330 кВ и выше такое положение дел приводит к наличию значительных по величине помех 50 Гц относительно земли, величина которых может достигать десятков вольт.

Помимо внешних помех и перенапряжений для СОПТ характерен высокий уровень коммутационных перенапряжения при отключении индуктивных элементов. До внедрения микропроцессорного оборудования число индуктивных элементов в сети было велико: обмотки реле и т.п., в настоящий момент количество подобного оборудования снижается. Развитие перенапряжений связано со срезом тока в индуктивности аппарата, приводящее к выделению энергии, запасенной в ней.

Таблица 1.5 – Требования к помехоустойчивости оборудования, питающегося от СОПТ

Вид помех	Стандарт на метод испытаний на	Степень жесткости испытаний	Испытательный уровень	Примечание
-----------	--------------------------------	-----------------------------	-----------------------	------------

	помехоустойчивость			
Микросекундные импульсные помехи большой энергии (1/50 мкс - 6,4/16 мкс) по схеме: - провод-провод - провод-земля	ГОСТ Р 51317.4.5	-	3 2	2 кВ 1 кВ
Повторяющиеся колебательные затухающие помехи по схеме - провод-провод - провод-земля	ГОСТ Р 51317.4.12	Испытания проводят при частоте 1 МГц (более высокие частоты для испытаний оборудования для подстанций с газовой изоляцией - на рассмотрении)	3	2,5 кВ 1 кВ

Согласно требованиям [21] в состав ЩПТ должны входить устройства защиты от импульсных перенапряжений в цепях СОПТ. Для защиты от перенапряжений в установках постоянного тока могут применяться диоды, УЗИП комбинированного и ограничивающего типов.

Авторами [22,23] рекомендовано в ЩПТ применять диодную защиту, так как диодная защита ограничивает напряжение полюсов сети СОПТ относительно земли на уровне чуть выше напряжения АБ, а при использовании варисторов напряжения на полюсах оказываются значительно большими. Однако стоит отметить, что для изоляции такие перенапряжения допустимы, как и для прошедших испытания микропроцессорных устройств.

В таблице 1.5 представлены требования к помехоустойчивости низковольтных входных и выходных портов питания постоянного тока оборудования, установленного на ПС [32].

1.3 ЭМО на ПС. Положения зонной концепции

Анализ причин повреждений и сбоев работы в цепях управления [4], выполненный на основании данных, полученных на электростанциях и подстанциях Японии, показывает, что молниевые перенапряжения в 72% случаев являются их основной причиной. Причем в 70 % из этих случаев удар молнии приводит к необратимому отказу, такому как повреждение элемента цепи управления. А нарушение условий электромагнитной совместимости в СОПТ в 10 % случаев приводит к ложным срабатываниям устройств релейной защиты и автоматики.

Перенапряжения, связанные с протеканием токов молнии, являются наиболее значимым фактором при обеспечении требований электромагнитной совместимости (ЭМС) на ПС, так как оборудование системы молниезащиты размещается близко к местам прохождения кабельных

трасс. В условиях ПС СОПТ, СН и их потребители находятся в жесткой (класс 3) и крайне жесткой (класс 4) электромагнитной обстановке в соответствии с принятой классификацией [5].

Обеспечение надежного функционирования технических средств (ТС), входящих в СОПТ и СН возможно путем улучшения ЭМО на ПС и повышения помехоустойчивости самих ТС. Для улучшения условий ЭМС при ударах молнии в нормативных документах по молниезащите [6,7] изложены требования, формирующие зонную концепцию защиты.

Согласно этой концепции объект разделяется на зоны молниезащиты (LPZ) в зависимости от подверженности этих зон прямому и непрямоу воздействию тока молнии:

- **LPZ 0A** – зона, каждая часть и внутренняя система которой может быть подвержена воздействию прямого удара молнии (ПУМ) и электромагнитного поля грозовых разрядов.
- **LPZ 0B** – зона, все части и внутренние системы которой защищены от ПУМ внешней молниезащитой, но не защищены от воздействия электромагнитного поля грозовых разрядов.
- **LPZ 1** – зона, в которой ток молнии в проводниках ограничивается путем перераспределения тока по проводникам системы молниезащиты, а применение системы уравнивания потенциалов и УЗИП на границе 1 и 0 зоны позволяют ограничить перенапряжения. Экранирующие свойства строительных конструкций являются фактором снижающим электромагнитное поле.
- **LPZ 2, ..., n** – зона, в которой токи молнии также снижаются в процессе их перераспределения, а перенапряжения ограничиваются путем присоединения всех металлических конструкций к элементам системы уравнивания потенциалов и использования УЗИП на границах зон.

1.3 Параметры и типы УЗИП

УЗИП – устройство, содержащее как минимум один нелинейный элемент, предназначенное для ограничения перенапряжений, возникающих при переходных процессах, и отвода импульсных токов [43].

Вид нелинейного элемента, примененного в конструкции УЗИП, определяет тип УЗИП:

- *УЗИП коммутирующего типа.* Устройство на основе разрядника. Основное преимущество этого типа УЗИП высокая энергоемкость и пропускная способность за счет перехода разряда в дуговую форму при пробое искрового промежутка. Это определяет возможность применения УЗИП коммутирующего типа в электрических цепях, куда может попадать ток молнии величиной до 100 кА, и где допускается время срабатывания защиты ~ 0,1 мкс.
- *УЗИП ограничивающего типа* с нелинейным элементом в виде варистора или диодного разрядника. Преимуществом УЗИП на основе варистора является простота конструкции, относительно низкая стоимость, возможность работы в наносекундном диапазоне. Применяется

в цепях, где возможно появление индуцированных перенапряжений или в цепях с током молнии менее 20 кА.

– *УЗИП комбинированного типа*, содержащее одновременно элементы ограничивающего и коммутирующего типа, которое может коммутировать и ограничивать напряжение в зависимости от характеристик подаваемого напряжения. Основным достоинством таких УЗИП является минимальное время срабатывания в пределах долей наносекунд, что позволяет их использовать для защиты интегральных схем и в высокочастотных цепях. Отличаются малой емкостью и габаритными размерами.

В схеме в зависимости от вида сети защитный элемент УЗИП может быть присоединен между фазами, фазой и землей, фазой и нейтралью, нейтралью и землей, или в любой из перечисленных комбинаций. В сетях трехфазного переменного тока как правило используется схема присоединения УЗИП 3+1 (3 УЗИП между фазами и нейтралью и 1 – между нейтралью и землей) и 4+0 (4 УЗИП, установленные между фазами и землей и нейтралью и землей). Для двухполюсной сети СОПТ используются схемы 1+1 (1 УЗИП установлен между полюсами и 1 – между полюсом и землей) и 2+0 (УЗИП установлен между полюсами и землей). Перечисленные схемы подключения УЗИП представлены на схеме на рис. 1.4.

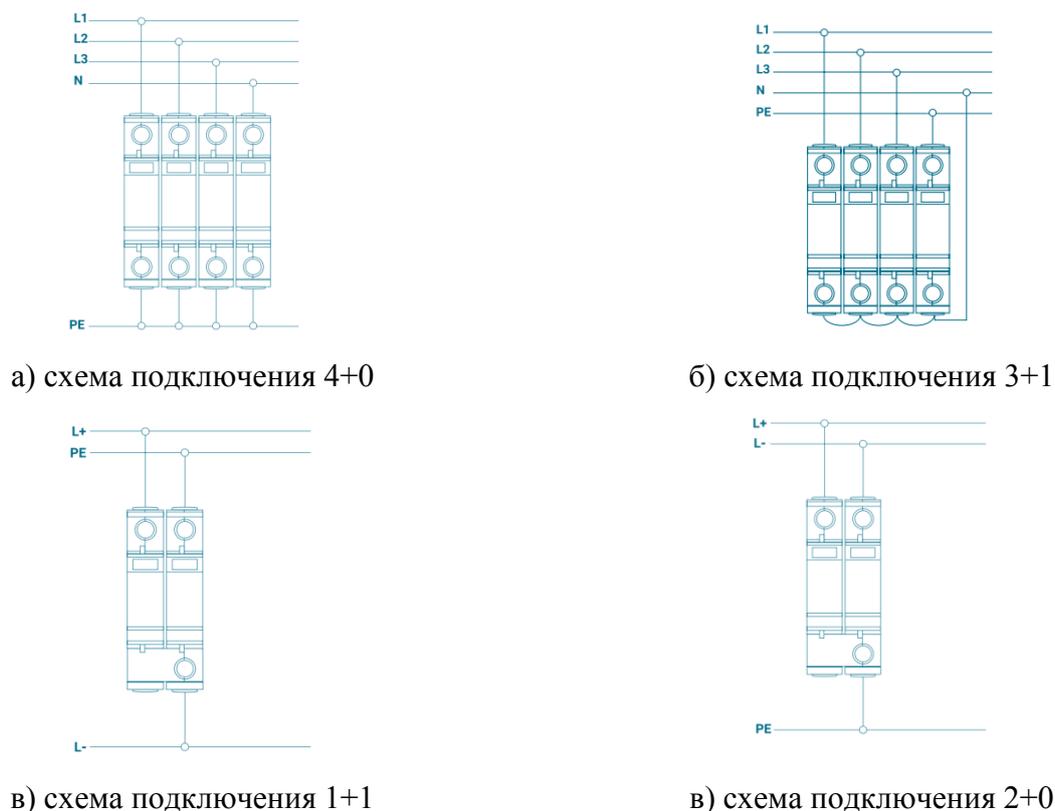


Рис. 1.4 – схемы подключения УЗИП

УЗИП классифицируются производителями по классам испытаний [43]:

– **класс I**: Испытания проводятся с номинальным разрядным током с формой волны 8/20 мкс, импульсным напряжением 1,2/50 мкс и максимальным импульсным током с формой волны

10/350 мкс. УЗИП класса I актуальны для защиты от прямых ударов молнии в систему молниезащиты объекта или воздушную линию электропередач. Устанавливаются на вводе в здание (объект), во вводно-распределительном устройстве (ВРУ) или главном распределительном щите (ГРЩ).

– **класс II:** Испытания проводятся с номинальным разрядным током, импульсным напряжением с формой волны 1,2/50 мкс и максимальным разрядным током с формой волны 8/20 мкс. Поскольку УЗИП класса II не испытываются импульсом тока 10/350 мкс, то он обеспечивает защиту от индуцированных перенапряжений и может использоваться в качестве второй ступени защиты при применении каскадной схемы защиты объекта.

– **класс III:** Испытания проводятся с комбинированной волной напряжения 1,2/50 мкс и тока 8/20 мкс. УЗИП класса III предназначены для защиты потребителей от остаточных перенапряжений после срабатывания УЗИП первой и второй ступеней защиты, для защиты от коммутационных помех в самой сети, где установлен объект. Устанавливаются непосредственно возле потребителя, который как правило является помеховосприимчивым оборудованием, в случае ПС это электроника общепромышленного назначения: компьютеры, блоки питания устройств связи и т.д.

1.4 Параметры тока молнии

Важнейшими параметрами тока молнии являются амплитуда и время фронта его импульса. Величина амплитуды импульса тока определяет уровень кондуктивных помех, а время фронта – излучаемых.

В нормативах параметры тока молнии стандартизированы в зависимости от вероятности воздействия с параметрами, не превышающими заданные. В соответствии с СО 153-34.21.122-2003 [8], все объекты делятся по уровням молниезащиты в зависимости от последствий, к которым может привести удар молнии:

- уровень I означает, что в результате нарушений в работе объекта возможны тяжелые экологические последствия;
- уровень II соответствует объектам, представляющим опасность для непосредственного окружения;
- уровень III специальные объекты с ограниченной опасностью, нарушения работы которых могут приводить к ограничению ресурсоснабжения потребителей и предприятий, локальным пожарам и взрывам;
- уровень III все остальные объекты.

Параметры тока молнии нормируются от степени молниезащиты [8]. Параметры, приведенные в табл. 1.6, используются при расчетах кондуктивных помех с фронтом 10 мкс, для зон молниезащиты 0А и 0В, где устанавливаются УЗИП класса I. Параметры, указанные в

табл. 1.7, используются при расчетах индуцированных перенапряжений, обладающих малым фронтом.

Таблица 1.6 – Параметры первого импульса тока молнии

Параметр молнии	Уровень защиты		
	I	II	III, IV
Максимум тока I , кА	200	150	100
Длительность фронта T_1 , мкс	10	10	10
Время полуспада T_2 , мкс	350	350	350
Заряд в импульсе $Q_{\text{сум}}^*$, Кл	100	75	50
Удельная энергия в импульсе W/R^{**} , МДж/Ом	10	5,6	2,5

Таблица 1.7– Параметры последующего импульса тока молнии

Параметр молнии	Уровень защиты		
	I	II	III, IV
Максимум тока I , кА	50	37,5	25
Длительность фронта T_1 , мкс	0,25	0,25	0,25
Время полуспада T_2 , мкс	100	100	100
Средняя крутизна a , кА/мкс	200	150	100

Расчетные значения амплитуды импульса тока молнии 200, 150 и 100 кА, приведенные в [8], зависят от только уровня защиты, и они совпадают со значениями, приведенными в международном стандарте [9].

Зависимости тока молнии от времени для III-IV классов молниезащиты с формой импульса описанной уравнением (1.1) и параметрами, приведенными в [9] представлены на рис. 1.5 и рис. 1.6.

$$i = \frac{I}{k} \cdot \frac{\left(\frac{t}{t_1}\right)^{10}}{1 + \left(\frac{t}{t_1}\right)^{10}} \cdot e^{-\frac{t}{t_2}} \quad (1.1)$$

где I – максимум тока; k – коэффициент, корректирующий значение максимума тока; t – время; t_1 – постоянная времени для фронта; t_2 – постоянная времени для спада.

В соответствии с требуемыми уровнями молниезащиты ПС для решения задач ЭМС, при проектировании амплитуду первой компоненты тока молнии принимают 100 кА [9]. Однако, при выборе параметров УЗИП проектировщики часто выполняют расчет параметров УЗИП для

токов молнии с максимальной амплитудой 200 кА, что, вероятно, объясняется влиянием производителей УЗИП, активно оперирующих в своих презентациях и на встречах с потенциальными клиентами максимальными величинами тока молнии [10].

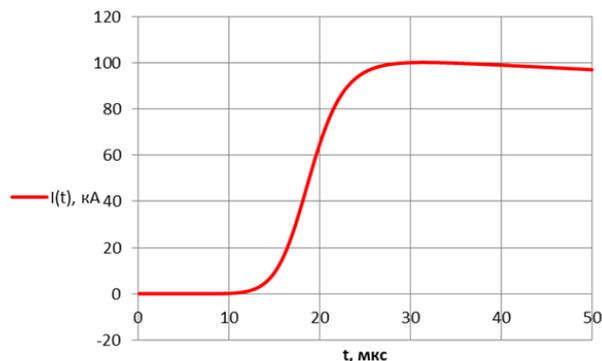


Рисунок 1.5 – Кривая нарастания тока первой компоненты отрицательного разряда согласно МЭК 62305

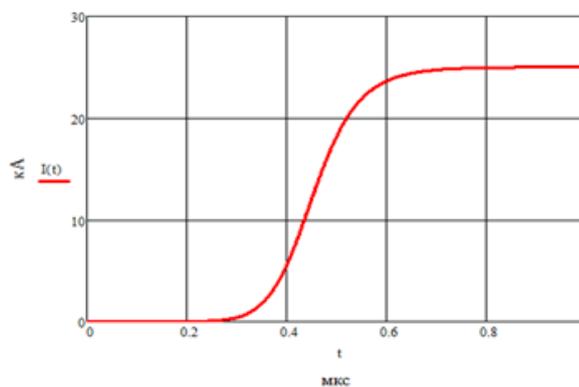


Рисунок 1.6 – Кривая нарастания тока последующей компоненты отрицательного разряда согласно МЭК 62305

Несовершенство действующих нормативов в области молниезащиты, связанное с несоответствием стандартизированных параметров тока молнии современным фактическим данным, изложенным в [11], отсутствием учета многокомпонентности разряда молнии, учета молний обеих полярностей и вероятности поражения ПУМ элементов объекта, признано множеством специалистов [12-15]. Сложившаяся ситуация приводит к принятию избыточных и дорогостоящих технических решений в области ЭМС.

1.5 Подход МЭК к выбору импульсного тока УЗИП класса I

Поскольку ПС 35 кВ и выше оснащаются системой молниезащиты а оборудование на территории ПС расположено в том числе в зоне 0-B, то как правило актуален вопрос применения УЗИП класса I, стоимость которых выше УЗИП других классов.

Ключевым вопросом при выборе УЗИП класса I является оценка амплитудного значения импульсного тока в защищаемой сети. Так как чем выше это значение, тем выше стоимость защитного аппарата. Компоновки ПС и конфигурации сетей СН СОПТ, как было сказано

выше, имеют множество вариантов, таким образом, формулировка единого подхода к защите таких сетей в целом не представляется возможной.

В стандартах [17,18] предложены упрощенные резистивные схемы или оценочные методики для определения доли тока молнии в месте установки УЗИП. Согласно этим методикам производится разделение тока в соотношении 50% тока – на заземляющее устройство (ЗУ) объекта, подверженного ПУМ, а другие 50% должны быть распределены равными частями между металлическими заземленными коммуникациями объекта.

Такие «оценочные расчеты», встречающиеся в рекомендациях заводов-изготовителей УЗИП, не имеют отношения к теории электрических цепей и не учитывают специфику реальных объектов.

Производителям УЗИП выгодно не учитывать такие особенности объектов. Использование рекомендованных ими методик приводит к завышению стоимости закупаемого оборудования.

Более корректными кажутся предложения использовать по крайней мере активно-индуктивные схемы замещения рассматриваемых сетей [16].

В условиях развития цифровизации объектов энергетики количество устанавливаемого электронного оборудования как специального, так и общепромышленного назначения постоянно увеличивается. Указанное оборудование в условиях ПС получает питание от сетей СН и СОПТ.

Так как выполнение полного расчёта переходных процессов для всех сетей (заземления, СН и СОПТ) ПС 35 кВ и выше в рамках проектирования экономически не целесообразно в связи с длительностью такого расчёта и возможной нехваткой исходных данных, необходима разработка стандартизированного подхода, учитывающего наиболее часто встречающиеся конфигурации таких сетей.

Как было показано выше, нормативная документация в её современном состоянии не учитывает специфику объектов энергетики и не позволяет выполнить оптимальный подбор параметров УЗИП.

2 ПРИМЕНЕНИЕ УЗИП ДЛЯ ЗАЩИТЫ СЕТИ ОСВЕЩЕНИЯ ПС

Целесообразность применения УЗИП в сети освещения ПС для защиты от воздействия кондуктивных импульсных перенапряжений обоснована ее конструктивными особенностями – оборудование освещения, может располагаться непосредственно на конструкциях с молниеотводами, на опорах, соединенных ВЛ или КЛ, на кровле зданий и сооружений. Сеть освещения с точки зрения грозозащиты обладает рядом особенностей: значительной протяженностью и низкой электрической прочностью изоляции.

Принципиально можно выделить следующие основные типы сетей освещения:

1. состоящая из опор, соединенных ВЛ (в т.ч. с СИП),
2. состоящая из опор, соединенных КЛ,
3. размещенная на отдельно стоящих опорах (прожекторных мачтах), источник, питания которых соединен с ними по заземляющему устройству,
4. размещенная на отдельно стоящих опорах (прожекторных мачтах), источник питания которых не имеет связи с ними по заземляющему устройству,
5. подсветка, размещаемая на кровле сооружений и зданий.

Сети типа №1-2 характерны для сети освещения ПС до 35 кВ, от РУ НН которых допускается осуществлять электроснабжение потребителей до 1 кВ за пределами ПС. Как правило, такая сеть освещения используется для близлежащей дорожной сети. Также такие наличие подобных сетей характерно для больших по площади объектов энергетики с развитым дорожным хозяйством (электростанции, гидроузлы).

Сеть №3 характерна для ПС 110 кВ и выше (с глухим или эффективным заземлением нейтрали), от которых запрещено осуществлять напрямую снабжение потребителей за пределами заземляющего устройства. Также такая сеть характерна для всех ОРУ.

Сеть №4 характерна для промышленных площадок: карьеров, складов, логистических терминалов и т.п. при питании от РУ СН ПС до 35 кВ включительно.

Сеть №5 характерна для ПС с закрытыми распределительными устройствами (ЗРУ).

Как видно, к сети СН могут подключаться практически все виды сетей. Кроме того, зачастую для освещения подъездных путей к ПС 110-750 кВ возможно использование сети освещения, запитанной от специальной ТП 6/0,4 кВ или разделительного трансформатора, осуществляющих гальваническую развязку с заземляющим устройством ПС, при этом защита такой сети является зоной ответственности проектировщика объекта.

2.1 Оценка вероятности появления грозовых перенапряжений

При использовании кабельных линий в сети освещения воздействие грозовых перенапряжений возможно только при ударах молнии в опоры освещения. Количество ударов молнии в отдельно стоящую опору освещения высотой h может быть рассчитано в соответствии с [26] по формуле:

$$N_{\text{оп}} = 9\pi h^2 p \cdot 10^{-6} \quad (2.1)$$

, где среднегодовое число ударов молнии в 1 км^2 поверхности земли p можно принять согласно таблице 2.1:

Таблица 2.1 – Число ударов молнии в 1 км^2 земной поверхности

Число грозочасов $N_{\text{гч}}$	Число ударов молнии, p
10-20	1
20-40	2

40-60	4
60-80	5,5
80-100	7
>100	8,5

По данным [27] число ударов молнии в 1 км² земной поверхности также может быть оценено по выражению:

$$p = 0,05 \cdot N_{гч} \quad (2.2)$$

Вероятность удара молнии в одну из N опор линии освещения за T лет эксплуатации соответственно равно:

$$N_{л} = N \cdot N_{оп} \cdot T \cdot k \quad (2.3)$$

, где k – коэффициент экранирования линии соседними объектами, расположенными на расстоянии до $3h$. Значения k определены в [27] и приведены в Таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Коэффициенты экранирования

Характеристика размещения ВЛ	k
Окружена более высокими объектами	0,25
Окружена объектами той же высоты или ниже	0,5
Отдельно стоящая опора на равнине	1
Опора освещения на равнине и на возвышенности	2

При конкретном проектировании при расчете числа ударов молнии в линию возможно учитывать коэффициент k для каждой опоры отдельно, в этом случае необходимо перейти от умножения к суммированию:

$$N_{л} = \sum_{i=1}^N N_{оп} \cdot T \cdot k_i \quad (2.4)$$

Необходимо также отметить, что число ударов в несколько рядом расположенных опор будет меньшим вследствие того, что зоны стягивания опор перекрываются.

Если речь идет о защите линии с СИП между опорами освещения, то количество ударов молнии в линию за срок эксплуатации определяется по выражению (высота до 30 метров):

$$N_{л} = 0,2p \left(5h - \frac{2h^2}{30} \right) \frac{L}{100} T \cdot k \quad (2.5)$$

, где L – длина линии в км.

Рассмотрим для примера линию из 10 опор протяженностью 400 метров в г. СПб. Количество грозových часов в регионе: 20-40, принимаем 1,0 удар в 1 км² поверхности земли, срок эксплуатации – 30 лет, высота опор от 10 метров до 30.

Результаты расчетов коэффициентов взаимного экранирования (10 опор) и числа ударов молнии для системы освещения с кабельной линией представлены в таблицах 2.3 и 2.4. Видно,

что коэффициент взаимного экранирования между опорами приблизительно соответствует коэффициенту экранирования окружающими строениями аналогичной высоты (таблица 2.2).

Таблица 2.3 – Результаты оценочного расчета коэффициента экранирования опорами друг друга

Высота опоры	Площадь стягивания 1 опоры	Расстояние между опорами	Площадь стягивания 10 опор	Коэффициент взаимного экранирования
10	2827	20	13333	0,47
15	6362	30	30000	0,47
20	11310	40	53331	0,47
25	17671	50	83330	0,47
30	25447	60	119996	0,47

Таблица 2.4 – Результаты расчетов количества ударов молнии в опоры линии освещения в регионе г. СПб

$h, \text{ м}$	k			
	0,25	0,5	1	2
8	0,06	0,13	0,26	0,52
9	0,08	0,16	0,33	0,66
10	0,10	0,20	0,40	0,81
11	0,12	0,24	0,49	0,98
12	0,15	0,29	0,58	1,17
13	0,17	0,34	0,68	1,37
14	0,20	0,40	0,79	1,59
15	0,23	0,46	0,91	1,82
16	0,26	0,52	1,04	2,07
17	0,29	0,58	1,17	2,34
18	0,33	0,66	1,31	2,62
19	0,37	0,73	1,46	2,92
20	0,40	0,81	1,62	3,24
21	0,45	0,89	1,78	3,57
22	0,49	0,98	1,96	3,92
23	0,54	1,07	2,14	4,28
24	0,58	1,17	2,33	4,66
25	0,63	1,26	2,53	5,06
26	0,68	1,37	2,74	5,47
27	0,74	1,47	2,95	5,90
28	0,79	1,59	3,17	6,34
29	0,85	1,70	3,40	6,81
30	0,91	1,82	3,64	7,28

Аналогичные расчеты были выполнены для линии освещения, протяженностью 400 метров, с СИП, высота подвеса которого от 10 до 20 метров. Результаты расчетов показывают, что для линий с СИП удар молнии в линию следует рассматривать в качестве расчетного случая для всех случаев, когда система не экранирована окружающими сооружениями.

В условиях РФ в населенных районах число грозových часов варьируется от 5 до 100 [37], при типичных значениях до 60-80, результаты расчетов могут быть пропорционально пересчитаны, однако в целом вывод о ключевом влиянии ландшафта остается верным.

2.2 Оценка перенапряжений и токов молнии в сети освещения ПС при помощи математической модели

Для расчета перенапряжений были созданы каркасные модели заземляющего устройства и металлических конструкций подстанций 110 кВ, одна из моделей показана на рисунке 2.1. Расчет перенапряжений в импульсном режиме был выполнен с помощью программы ЗУМ, реализующей расчет многозвенной цепно-полевой модели тонкого проводника на базе Autocad-совместимых систем, одновременно применяя методы электромагнитного поля и теории электрических цепей [28, 29]. Методика расчета была разработана Шишигиным С.Л. и Коровкиным Н.В. Согласно этой методике потенциалы и токи элементов методами теории цепей определяются при расчете цепной модели ЗУ. Далее по найденным стекающим токам стержней в модели определяется распределение потенциала и напряженности электрического поля, по найденным продольным токам – напряженность магнитного поля.

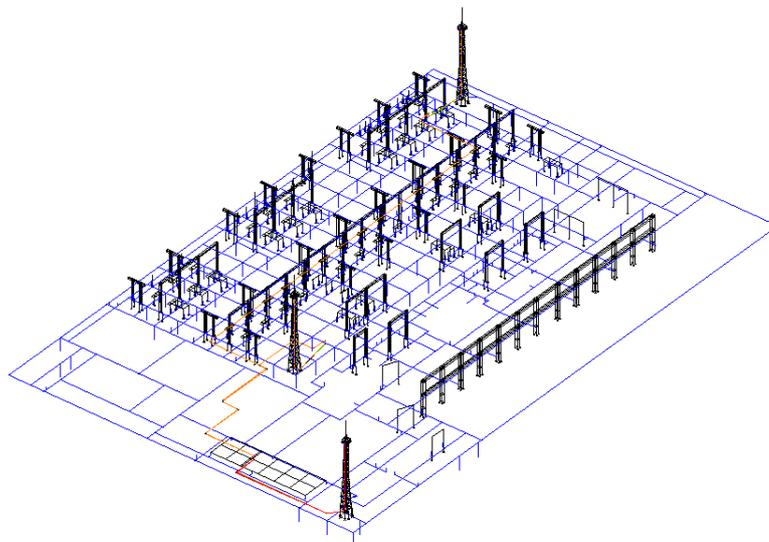


Рисунок 2.1 – Расчетная модель ПС 110 кВ

При расчете перенапряжений учитывалось влияние длины КЛ, наличие или отсутствие металлической трубы для прокладки КЛ. Во всех случаях прожекторная мачта имела

многократные связи по заземляющему устройству с точкой заземления системы управления освещения в здании ПС. Оценка уровня перенапряжений и токов в силовых КЛ была проведена при импульсе тока молнии 10/350 мкс с амплитудой 100 кА, который считается полноценной имитацией тока молнии [6].

Рассматривались различные типы кабельной канализации: экранированная КЛ в металлической трубе (труба по телу мачты и в грунте до входа в кабельное сооружение), неэкранированная КЛ в металлической трубе (наиболее часто кабели сети СН не имеют экранов), неэкранированная КЛ без трубы (часто встречающееся нарушение требований ПУЭ).

В расчётах использовали параметры однофазного кабеля. РЕ-проводник присоединен к щитку (в котором предполагается установка УЗИП) внизу мачты, к прожектору на площадке, а также к щиту со стороны ОПУ. Ёмкость блока питания прожектора принята равной 100 нФ. Кабель со стороны здания отключён, фазный проводник разорван, нулевой проводник заземлён.

Результаты расчет перенапряжений в сети освещения для прожекторной мачты, удалённой от ящика управления освещением (ЯУО) на 50 м по кабельной линии, представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Результаты расчета перенапряжений в сети освещения ПС 110 кВ

Условия прокладки КЛ	Удельное сопротивление грунта ρ , Ом·м	Сопротивление заземления на основной частоте воздействия z , Ом	U, kV						
			Прожектор			Щиток на мачте			ОПУ
			L-PE	N-PE	L-N	L-PE	N-PE	L-N	L-PE
Труба с экраном	100	5,4	3,6	3,8	0,2	3,3	3,4	0,2	<0,2
	250	6,5	4,1	4,3	0,2	3,7	3,9	0,2	
	500	7,8	4,4	4,5	0,2	4,0	4,2	0,2	
	750	8,8	4,5	4,7	0,2	4,2	4,3	0,2	
	1000	9,6	4,6	4,7	0,2	4,3	4,4	0,2	
Труба без экрана	100	5,4	7,6	7,8	0,3	7,0	7,3	0,3	1,0
	250	6,5	10,6	11,0	0,4	10,0	10,3	0,5	1,7
	500	7,8	12,6	13,1	0,5	12,1	12,4	0,6	2,1
	750	8,8	13,5	14,1	0,6	13,2	13,4	0,7	2,4
	1000	9,6	14,1	14,7	0,6	13,8	14,0	0,7	2,5
Без экрана и трубы	100	5,6	64,3	64,5	0,3	56,5	56,9	1,4	7,4
	250	6,8	85,9	86,1	0,3	76,8	77,4	1,5	10,2
	500	8,1	99,6	99,7	0,3	89,6	90,2	1,6	12,2
	750	9,1	105,9	105,9	1,0	95,4	96,1	1,5	13,0
	1000	9,9	109,4	109,3	0,4	98,9	99,5	1,5	13,4

Из результатов расчета видно, что уровень перенапряжений определяется в основном типом кабельной канализации, что соответствует теоретическим представлениям, так как труба

и экран за счёт ёмкостной и индуктивной связи с проводниками КЛ значительно снижают уровень перенапряжений.

В случае, если применяются экранированные КЛ и выполнены требования ПУЭ по использованию металлической трубы при прокладке КЛ, уровень перенапряжений со стороны ЯУО близок к допустимым 4-6 кВ при средней и плохой проводимости грунта. Однако при уменьшении фронта воздействия импульса тока молнии до 1,2 мкс уровень перенапряжений возрастает (рисунок 2.2).

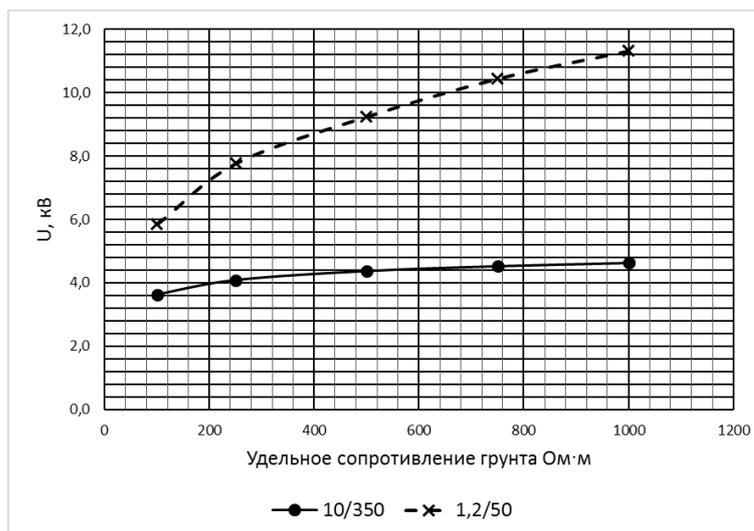


Рисунок 2.2 – Перенапряжения, возникающие в КЛ сети освещения при воздействии импульсов тока с разным фронтом, при использовании экранированного кабеля и металлической трубы при прокладке КЛ

В целом, с учётом запаса по уровню прочности изоляции оборудования можно говорить, что при малом удельном сопротивлении грунта подобная сеть достаточно хорошо защищена от перенапряжений.

В остальных случаях, которые по опыту авторов [38] встречаются часто (отсутствует экран у КЛ, отсутствует металлическая труба), применение УЗИП обосновано. Причём вследствие того, что перенапряжения развиваются при протекании токов в заземляющем устройстве, УЗИП должны быть подключены по схеме L-PE, N-PE (рис. 2.3), т.е. обеспечивать защиту от синфазных помех.

Одной из важнейших задач при выборе типа УЗИП является оценка тока в проводниках КЛ. В таблице 2.6 и на рисунке 2.4 представлены результаты расчётов распределения токов в КЛ сети освещения для условий, когда импульсный ток максимален. При проведении расчётов не учитывали наличие экрана у КЛ и сопротивление УЗИП – все жилы КЛ на прожекторной площадке, в щитке на мачте, а также со стороны здания ОПУ были заземлены.

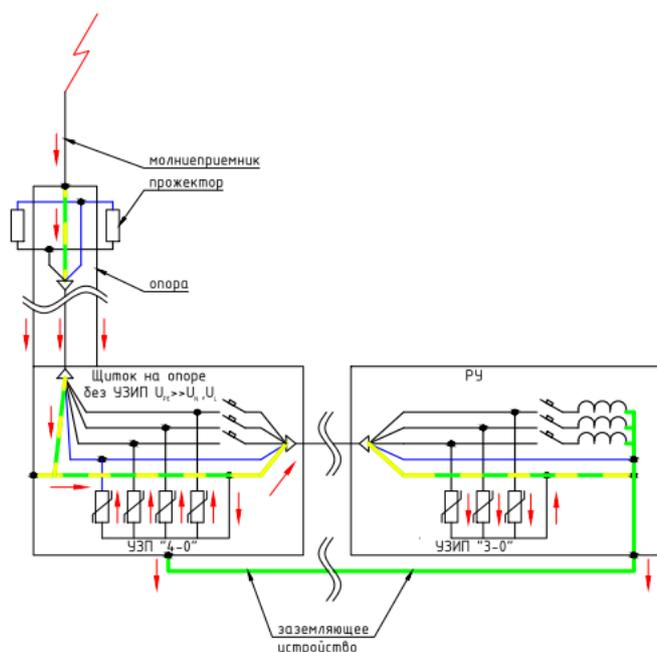


Рисунок 2.3 – Схема подключения УЗИП

Результаты расчётов токов в жилах КЛ приведены для участка мачты (от прожекторной площадки до щитка снизу) и для участка от мачты до ОПУ. Расчёты проведены для КЛ разной длины. Для короткой КЛ определялось влияние фронта импульса тока на величину тока в КЛ. Для определения наибольшего возможного значения тока, протекающего через УЗИП, рассматривался случай неэкранированной КЛ без металлической трубы.

Таблица 2.6 – Результаты расчета тока молнии в сети освещения ПС 110 кВ

Удельное сопротивление грунта ρ , Ом·м	Расстояние от мачты до ЯУО, м							
	50				220			
	Импульс тока, мкс							
	10/350				1,2/50		10/350	
	КЛ в трубе без экрана		КЛ без экрана и трубы		КЛ без экрана и трубы			
	Ток в КЛ, А							
	По мачте ¹⁾	От мачты ²⁾	По мачте	От мачты	По мачте	От мачты	По мачте	От мачты
100	190	956	1153	4500	1278	3528	971	1083
250	200	1045	1184	4739	1335	4613	982	1196
500	210	1089	1198	5191	1383	5156	991	1322
750	214	1100	1203	5225	1406	5415	994	1373
1000	214	1091	1227	5300	1418	5589	997	1402

Примечание: ¹ Ток в КЛ по мачте – расчетная величина тока молнии, протекающего в жиле одной КЛ на участке от прожекторной площадки до щитка внизу мачты;

² Ток в КЛ от мачты – расчетная величина тока молнии, протекающего в жиле одной КЛ на участке от щитка до ЯУО в ОПУ.

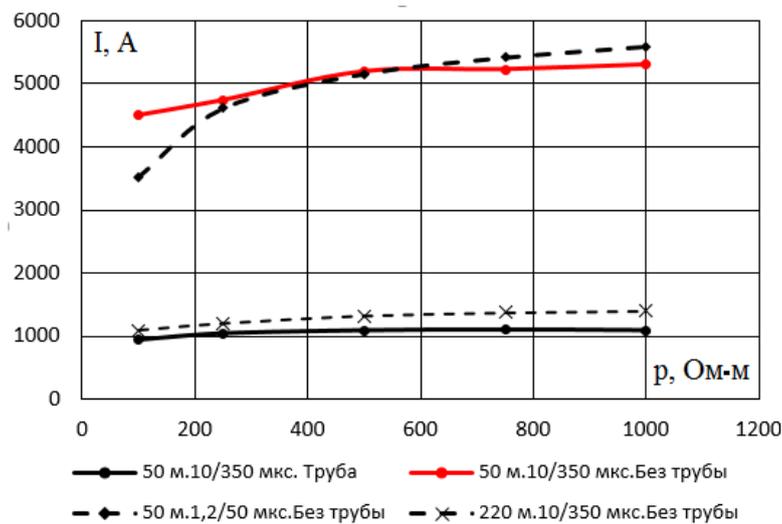


Рисунок 2.4 – Зависимость тока в жилах КЛ от удельного сопротивления грунта для разных импульсов тока и условий прокладки

Согласно данным таблицы 2.6 ток в КЛ снижается при увеличении длины и слабо растет с увеличением удельного сопротивления грунта. С учетом того, что длины КЛ сети освещения на территории объекта в основном не превышают 0,3 км, результаты расчетов из табл. 2.6 можно использовать для весьма грубых и только в условиях плотности сетки заземляющего устройства в условиях ПС 35 кВ и выше, оценок долей токов в жилах КЛ по выражению:

$$\delta = \frac{I_{\text{КЛ}}}{I_{\text{норм}}} = \frac{1}{I_{\text{норм}}} \sum_{i=1}^n \left(\frac{N \cdot l_{\text{расч}} \cdot I_{\text{расч}}}{l_{\text{изм}}} \right) \quad (2.6)$$

, где n – число отходящих КЛ, N – число жил одной КЛ; $l_{\text{расч}}$ – длина КЛ из табл. 2.6; $l_{\text{изм}}$ – длина КЛ на объекте; $I_{\text{КЛ}}$ – ток молнии, протекающий в КЛ (сумма токов всех жил); $I_{\text{норм}}$ – нормативное значение амплитуды импульса тока молнии (для ПС, как правило, 100 кА); $I_{\text{расч}}$ – ток в жиле КЛ из табл. 2.6 с длиной $l_{\text{расч}}$.

2.3 Натурные измерения перенапряжений в сети освещения ПС

На учебном комплексе ПАО «Ленэнерго» позволяющие определить распределение тока между заземлителем и КЛ-0,4 кВ на ПС 110 кВ.

Ожидаемая доля тока, протекающего во всех проводниках (сумма) двух КЛ Полигона, питающих прожекторную мачту при выполнении оценки согласно формуле п.2.2, составляет 17,5% от расчётной амплитуды полного тока молнии.

При проведении измерений на прожекторную мачту подавали импульс напряжения 1,2/50 и апериодического тока 8/20 мкс, фазные и нулевые проводники были заземлены с обеих сторон двух отходящих от мачты КЛ в ЯУО здания проходной и на соседней прожекторной мачте. Второй вывод генератора был заземлён на фундамент опоры, не связанный с заземляющим устройством комплекса. Напряжения измеряли осциллографом Fluke 190-504 на

шунтах цепи генератора и КЛ. Схема измерений показана на рис. 2.5. Соотношение напряжений, соответственно, позволяло оценить долю тока, протекающей по КЛ.

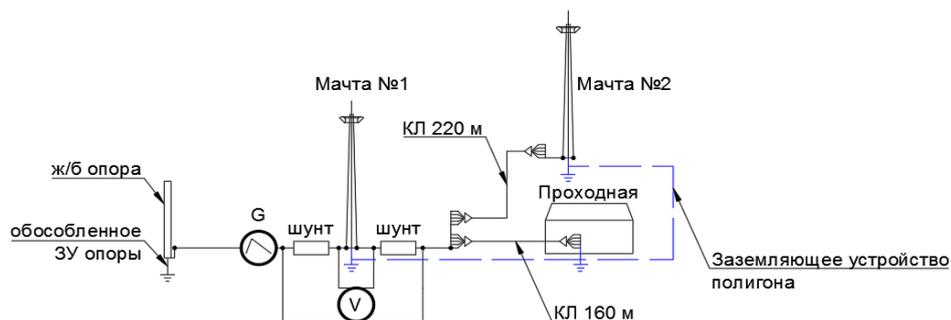


Рисунок 2.5 – Схема измерений тока молнии, протекающего в КЛ.
G – генератор, V – осциллограф

На рис. 2.6 показаны осциллограммы измеренного напряжения на шунтах генератора и КЛ. Амплитуда напряжения импульса напряжения на шунте КЛ составляет приблизительно 33% от амплитуды напряжения на шунте между генератором и мачтой. В случае, если бы импульс тока молнии имел амплитуду 100 кА, по каждой из жил протекал бы импульс тока с амплитудой около 3,5 кА. С учетом реальных параметров сети и при наличии УЗИП амплитуда импульса тока в РЕ и N проводниках была бы несколько выше.

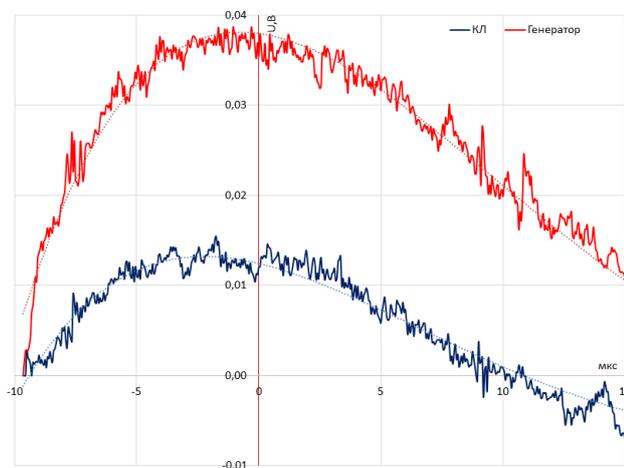


Рисунок 2.6 – Осциллограммы напряжения на шунтах генератора и КЛ

В итоге, можно говорить о том, что даже в самых худших условиях на ОРУ 110 кВ применение УЗИП с импульсным током выше 10 кА нецелесообразно. На ПС более высокого класса напряжения сеть заземления может быть более редкой, однако и длины КЛ сети освещения значительно возрастают. Таким образом, сделанный вывод актуален и для ОРУ более высокого класса напряжения.

3 ПРИМЕНЕНИЕ УЗИП ДЛЯ ЗАЩИТЫ СОПТ ПС

Применение средств защиты от импульсных перенапряжений в цепях СОПТ и составе ЩПТ необходимо согласно требованиям [21]. Применение защитных устройств в сети СОПТ

должно обеспечивать защиту аналоговых входов МП аппаратуры от воздействия синфазных («провод-земля») и противофазных («провод-провод») микросекундных импульсов большой энергии.

В исследовании [33] показано, что на оборудование РЗА, прошедшее испытания по 3 и 4 степени жесткости согласно [31], в условиях эксплуатации на отечественных ПС, могут воздействовать перенапряжения, превышающие уровень его помехоустойчивости. Для защиты оборудования в таких случаях рекомендуется применять УЗИП, ограничивающие напряжения и токи во входных цепях аппаратуры.

В настоящей главе на основании натурных измерений, проведенных на учебном полигоне ПАО «Ленэнерго», представлены результаты экспериментального исследования влияния конфигурации СОПТ на уровни перенапряжений в ЩПТ и сформулированы рекомендации по защите СОПТ от перенапряжений при помощи УЗИП.

Актуальность исследуемого вопроса заключается в том, что от надежности СОПТ зависит надежность питания ответственных потребителей собственных нужд, а также в повышенных требованиях к качеству электроснабжения и соблюдению требований ЭМС для МП-устройств.

На ЩПТ в ОПУ учебного полигона были отключены выключатели всех подключенных к шинам нагрузок. Импульс подавался непосредственно на шину «+» ЩПТ. Далее выполнялся ряд измерений потенциала на шинах «+» и «-» щита при контроле отсутствия «земли» при выполнении всех операций коммутационными аппаратами:

- при включении АБ (т.е. питание ЩПТ осуществляется только от АБ, при этом нагрузка не подключена);
- при включении ВЗУ (т.е. питание ЩПТ осуществляется только от ВЗУ: АБ отключена, нагрузка отключена);
- при включенных ВЗУ и АБ (нормальная схема работы ЩПТ с резервированием от АБ, нагрузка при этом отключена);
- при подключенных ВЗУ и АБ последовательно подключалась нагрузка на шины ЩПТ и выполнялась фиксация уровня перенапряжений на шинах ЩПТ

Результаты измерений при подаче апериодических и затухающих колебательных импульсов на полюс ЩПТ показаны в таблицах 3.1 и 3.2.

На рис. 3.1 показано изменение коэффициента передачи по напряжению с полюса на полюс ЩПТ при разных воздействиях по мере подключения присоединений.

На рис. 3.2 показаны амплитуды воздействий в аналогичных условиях.

Увеличение количества потребителей приводит к резкому снижению амплитуды напряжения на ЩПТ, что говорит о хорошей защищенности сети от перенапряжений. Особенно данная тенденция характерна для импульсных воздействий.

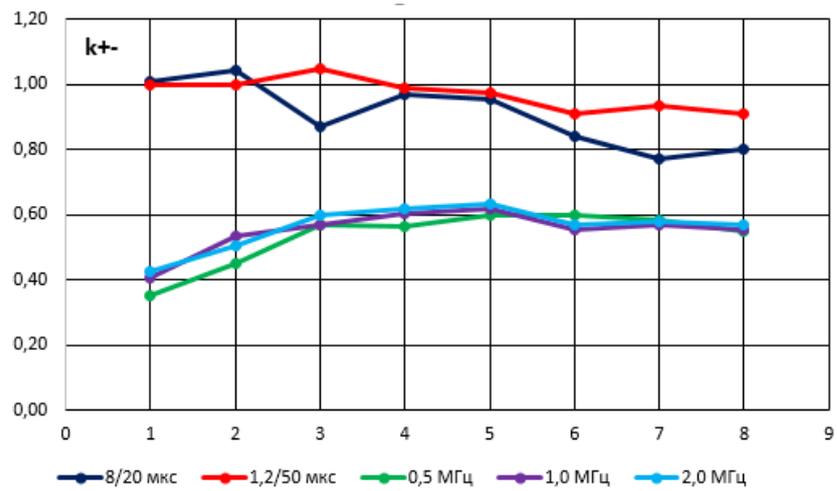


Рисунок 3.1 – Коэффициент передачи напряжения с полюса на полюс ЩПТ при разных воздействиях по мере подключения присоединений

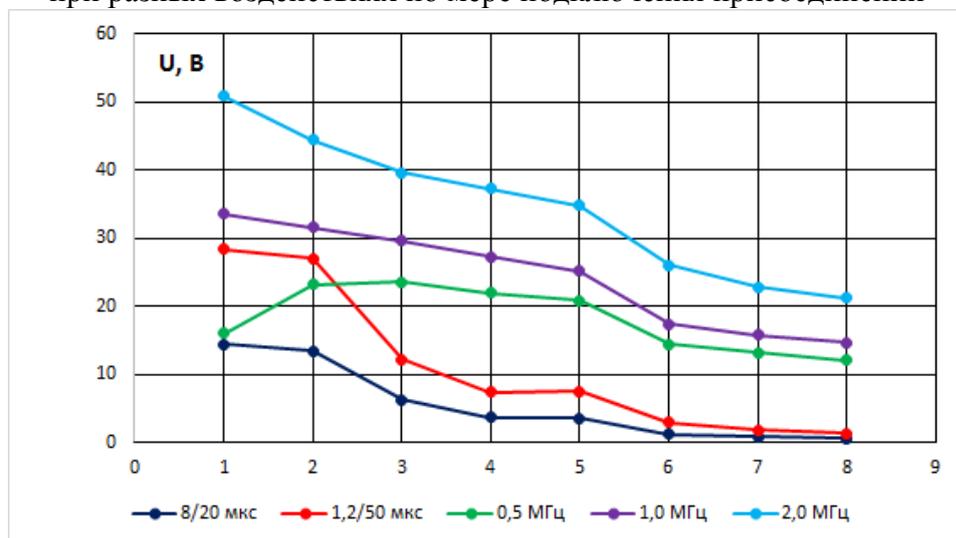


Рисунок 3.2 – Амплитуды напряжения на полюсе ЩПТ при разных воздействиях по мере подключения присоединений

Таблица 3.1 – Результаты измерений амплитуд токов и напряжений при подаче аperiodического импульса на шины ЦПТ

№	Iген., А	U "+", В	U "-", В	Подключенные КЛ
8/20 мкс				
1	4,0	15,2	15,6	АБ
2	4,3	15	13,8	ВЗУ
3	4,0	14,4	14,5	ВЗУ + АБ
4	3,7	13,4	14	вкл. Q11- питание соленоида включения ввода 35 кВ Т2
5	2,1	6,2	5,4	вкл. Q10- питание ШВП1 1 сек. КРУ 35 кВ
6	2,1	3,6	3,48	вкл. Q9- питание ШВП1 1 сек. КРУ 10 кВ
7	2,1	3,52	3,36	вкл. Q8- питание ШВП2 2 сек. КРУ 10 кВ
8	1,9	1,24	1,04	вкл. Q6- питание резервных комплектов РЗА и 2ЭМО выкл. 110 кВ
9	1,9	0,78	0,6	вкл. Q5- питание основных комплектов РЗА и ЭМВ, 1ЭМО выкл. 110 кВ
10	1,6	0,6	0,48	вкл. Q1- питание центральной сигнализации
1,2/50 мкс				
1	3,7	30,4	30,4	АБ
2	3,5	29,6	27,8	ВЗУ
3	4,3	28,4	28,4	ВЗУ + АБ
4	3,7	27	27	вкл. Q11- питание соленоида включения ввода 35 кВ Т2
5	3,7	12,2	12,8	вкл. Q10- питание ШВП1 1 сек. КРУ 35 кВ
6	2,9	7,4	7,32	вкл. Q9- питание ШВП1 1 сек. КРУ 10 кВ
7	2,7	7,52	7,32	вкл. Q8- питание ШВП2 2 сек. КРУ 10 кВ
8	1,9	2,9	2,64	вкл. Q6- питание резервных комплектов РЗА и 2ЭМО выкл. 110 кВ
9	2,7	1,8	1,68	вкл. Q5- питание основных комплектов РЗА и ЭМВ, 1ЭМО выкл. 110 кВ
10	1,9	1,32	1,2	вкл. Q1- питание центральной сигнализации

Таблица 3.2 – Результаты измерений амплитуд токов и напряжений при подаче колебательного затухающего импульса на шины ЩПТ

№	Iген., А	U "+", В	U "-", В	Подключенные КЛ
0,5 МГц				
1	0,34	13,6	8,2	АБ
2	0,64	23	10	ВЗУ
3	0,68	16	5,6	ВЗУ + АБ
4	0,6	23,2	10,4	вкл. Q11- питание соленоида включения ввода 35 кВ Т2
5	0,68	23,6	13,4	вкл. Q10- питание ШВП1 1 сек. КРУ 35 кВ
6	0,64	22	12,4	вкл. Q9- питание ШВП1 1 сек. КРУ 10 кВ
7	0,64	20,8	12,4	вкл. Q8- питание ШВП2 2 сек. КРУ 10 кВ
8	0,6	14,4	8,6	вкл. Q6- питание резервных комплектов РЗА и 2ЭМО выкл. 110 кВ
9	0,44	13,2	7,7	вкл. Q5- питание основных комплектов РЗА и ЭМВ, 1ЭМО выкл. 110 кВ
10	0,42	12	6,6	вкл. Q1- питание центральной сигнализации
1,0 МГц				
1	0,64	38	20,8	АБ
2	0,6	31	14,4	ВЗУ
3	0,56	33,6	13,6	ВЗУ + АБ
4	0,6	31,6	16,8	вкл. Q11- питание соленоида включения ввода 35 кВ Т2
5	0,6	29,6	16,8	вкл. Q10- питание ШВП1 1 сек. КРУ 35 кВ
6	0,64	27,2	16,4	вкл. Q9- питание ШВП1 1 сек. КРУ 10 кВ
7	0,6	25,2	15,6	вкл. Q8- питание ШВП2 2 сек. КРУ 10 кВ
8	0,38	17,4	9,6	вкл. Q6- питание резервных комплектов РЗА и 2ЭМО выкл. 110 кВ
9	0,4	15,8	9	вкл. Q5- питание основных комплектов РЗА и ЭМВ, 1ЭМО выкл. 110 кВ
10	0,38	14,6	8,1	вкл. Q1- питание центральной сигнализации
2,0 МГц				
1	0,32	60	36,8	АБ
2	0,28	49	22	ВЗУ
3	0,28	50,8	21,6	ВЗУ + АБ
4	0,36	44,4	22,4	вкл. Q11- питание соленоида включения ввода 35 кВ Т2
5	0,32	39,6	23,6	вкл. Q10- питание ШВП1 1 сек. КРУ 35 кВ
6	0,32	37,2	23	вкл. Q9- питание ШВП1 1 сек. КРУ 10 кВ
7	0,32	34,8	22	вкл. Q8- питание ШВП2 2 сек. КРУ 10 кВ
8	0,4	26	14,8	вкл. Q6- питание резервных комплектов РЗА и 2ЭМО выкл. 110 кВ
9	0,26	22,8	13,2	вкл. Q5- питание основных комплектов РЗА и ЭМВ, 1ЭМО выкл. 110 кВ
10	0,28	21,2	12,1	вкл. Q1- питание центральной сигнализации

4 ПРИМЕНЕНИЕ И КООРДИНАЦИЯ ЗАЩИТНОЙ АППАРАТУРЫ В СЕТИ С УЗИП

В процессе эксплуатации УЗИП могут подвергаться нерасчетным воздействиям: большим по величине амплитуды импульсам тока молнии, длительному повышению напряжения промышленной частоты, кратковременному значительному повышению напряжения при включении и отключении нагрузок с реактивным сопротивлением. Такие события могут привести к выходу УЗИП из строя.

Если речь идет о быстром развитии дефекта, то для решения задачи отключения тока КЗ используется обычная защитная коммутационная аппаратура.

Данная глава посвящена вопросу выбора и координации предохранителей для защиты УЗИП. Учитывая, что УЗИП является дополнительным элементом в сетях СН и СОПТ этот вопрос является актуальным с точки зрения обеспечения надежности этих сетей.

4.1 Координация УЗИП, защитного предохранителя и кабеля по энергетической стойкости

При протекании импульсного тока и тока короткого замыкания в цепи УЗИП происходит нагрев кабеля, плавкого предохранителя и УЗИП. Нагрев этот характеризуется величиной интеграла Джоуля:

$$I^2t = \int i^2 dt \quad (5.1)$$

Для координации по энергетической стойкости УЗИП, защитного предохранителя и кабелей в аварийных процессах необходимо, чтобы энергетическая стойкость кабелей, УЗИП и предохранителей электроустановки превышала расчетные значения импульса молнии и характеристики интеграла Джоуля.

Для этого должно выполняться условие:

$$J_{\text{пр}}, J_{\text{узип}}, J_{\text{FU}} > J_{\text{имп}} \quad (5.2)$$

где $J_{\text{пр}}$ – величина интеграла Джоуля стойкости токопроводящих жил кабеля, J_{FU} – величина интеграла Джоуля стойкости защитного устройства, $J_{\text{узип}}$ – величина интеграла Джоуля стойкости УЗИП, $J_{\text{имп}}$ – величина интеграла Джоуля импульса тока молнии.

Предельные температуры для всех типов токопроводящих жил, находящихся в контакте с материалами изоляции, приведены в [39].

Минимально допустимая площадь поперечного сечения S проводников заземляющего устройства, согласно требованиям [37] и [40], определяется по формуле:

$$S = \frac{I \cdot \sqrt{t}}{k} \quad (5.3)$$

, где I – действующее значение тока короткого замыкания, протекающего по проводнику, t – время отключения короткого замыкания, k – коэффициент, значение которого зависит от материала проводника, его начальной и конечной температур. Коэффициент k равен:

$$k = \sqrt{\frac{Q(B+20)}{\rho_{20}} \ln \left(1 + \frac{\theta_2 - \theta_1}{B + \theta_1} \right)} \quad (5.4)$$

, где Q – объемная теплоемкость материала проводника [Дж/($^{\circ}\text{C} \cdot \text{мм}^3$)]; B – величина обратная температурному коэффициенту сопротивления при 0°C для проводника [$^{\circ}\text{C}$]; ρ_{20} – удельное электрическое сопротивление проводника при 20°C [Ом·мм]; θ_2 и θ_1 – конечная и начальная температура проводника [$^{\circ}\text{C}$]. Параметры для материалов жил кабеля представлены в таблице 5.2 [40]. Начальную температуру принимаем равной 45°C , конечную – 400°C .

Таблица 4.1 – Параметры материалов

Материал	$B, ^{\circ}\text{C}$	$Q, \text{Дж}/(^{\circ}\text{C} \cdot \text{мм}^3)$	$\rho_{20}, \text{Ом} \cdot \text{мм}$
Медь	234,5	0,00345	$17,241 \cdot 10^{-6}$
Алюминий	228	0,0025	$28,264 \cdot 10^{-6}$

Формула для расчета допустимой величины интеграла Джоуля имеет вид:

$$J_{\text{пр}} = k^2 \cdot S^2 \quad (5.4)$$

В таблице 4.2 представлены результаты расчета интеграла Джоуля для кабелей в цепи УЗИП (начальная температура 45°C).

Таблица 4.2 – Допустимая величина интеграла Джоуля ($\text{А}^2 \cdot \text{с}$), которую токопроводящие жилы кабелей способны выдержать без повреждения

Материал изоляции	Материал проводника	Сечение, мм^2								
		1,5	2,5	4	6	10	16	25	35	50
ПВХ	Медь	0,039	0,110	0,281	0,632	1,755	4,493	10,969	21,499	43,875
	Алюминий	0,017	0,048	0,123	0,278	0,771	1,974	4,820	9,446	19,278
СПЭ	Медь	0,061	0,168	0,431	0,970	2,695	6,900	16,846	33,018	67,383
	Алюминий	0,027	0,074	0,189	0,426	1,182	3,027	7,390	14,484	29,559

4.2 Выбор предохранителя в соответствии с величиной тока короткого замыкания и импульсного тока

Наиболее остро задача выбора предохранителей для подключения УЗИП стоит в случае использования защитных аппаратов 1-го класса, так как энергия импульса, у данного класса аппаратов больше.

Диапазон величины преддугового интеграла Джоуля для предохранителей класса gG указан в [41]. Количество тепла прямо пропорционально квадрату тока и длительности нагрева.

При срабатывании УЗИП через него протекает импульсный, а в случае УЗИП коммутирующего типа (разрядник) и сопровождающий ток, приблизительно равный току КЗ (см. рис. 4.1). Таким образом, используемый для подключения УЗИП защитный коммутационный аппарат, должен с одной стороны обеспечивать работу УЗИП, пропуская импульс тока при воздействии перенапряжений (ограничение номинального тока аппарата снизу), с другой – отключать ток КЗ при повреждении УЗИП в соответствии с принципом селективности (ограничение сверху).

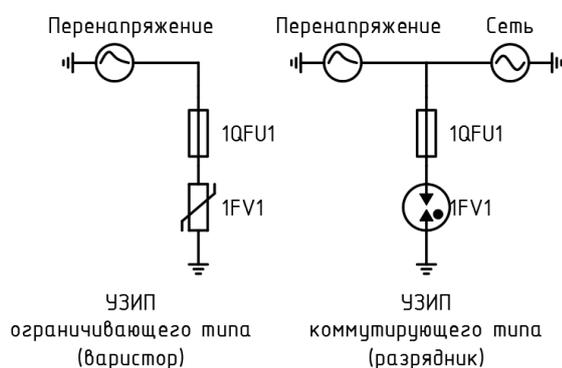


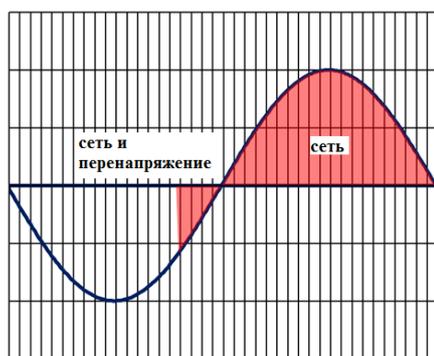
Рисунок 4.1 – Источники тока при работе УЗИП

В случае, если применяется УЗИП коммутирующего типа, ток КЗ может протекать через плавкий предохранитель с момента срабатывания устройства и до момента перехода тока через ноль после прохождения импульса.

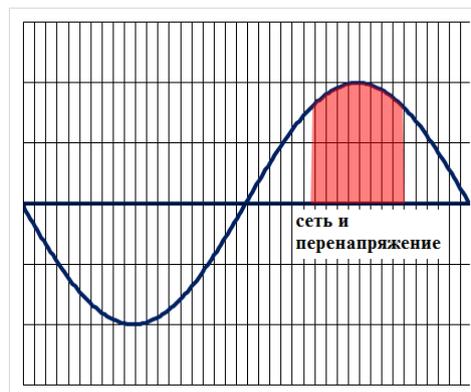
При проектировании для УЗИП коммутирующего типа целесообразно рассматривать оба варианта энергетических воздействий на предохранитель:

1. Выделение энергии в наихудших условиях, соответствующих рисунку 4.2 а.
2. Выделение энергии только за период воздействия импульса согласно рис. 4.2 б.

В случае применения УЗИП ограничивающего типа период выделения энергии соответствует только времени протекания импульсного тока, аналогично рис. 4.2 а, только без влияния сопровождающего тока.



а)



б)

Рисунок 4.2 – Варианты выделения энергии УЗИП: а) наиболее тяжелый случай выделения энергии УЗИП коммутирующего типа; б) выделение энергии УЗИП коммутирующего типа за период воздействия импульса

Таким образом для УЗИП коммутирующего типа по итогам предварительного расчета имеются 2 варианта номинального тока, УЗИП ограничивающего типа – один вариант.

Расчеты вариантов, в зависимости от токов КЗ и амплитуд воздействий могут быть выполнены заранее, до рассмотрения конкретных проектов. Результаты расчетов номиналов плавких вставок предохранителей, выполненных в программе *Mathlab* представлены на рисунках 4.3 – 4.6.

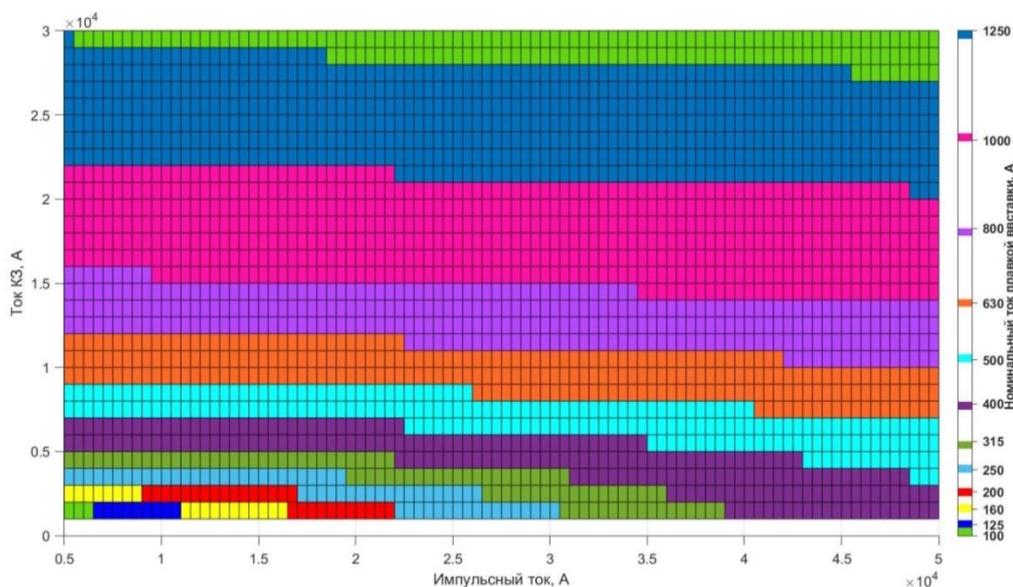


Рисунок 4.3 – К выбору параметров плавкой ставки предохранителей в худшем случае выделения энергии при протекании импульсного тока 10/350 мкс

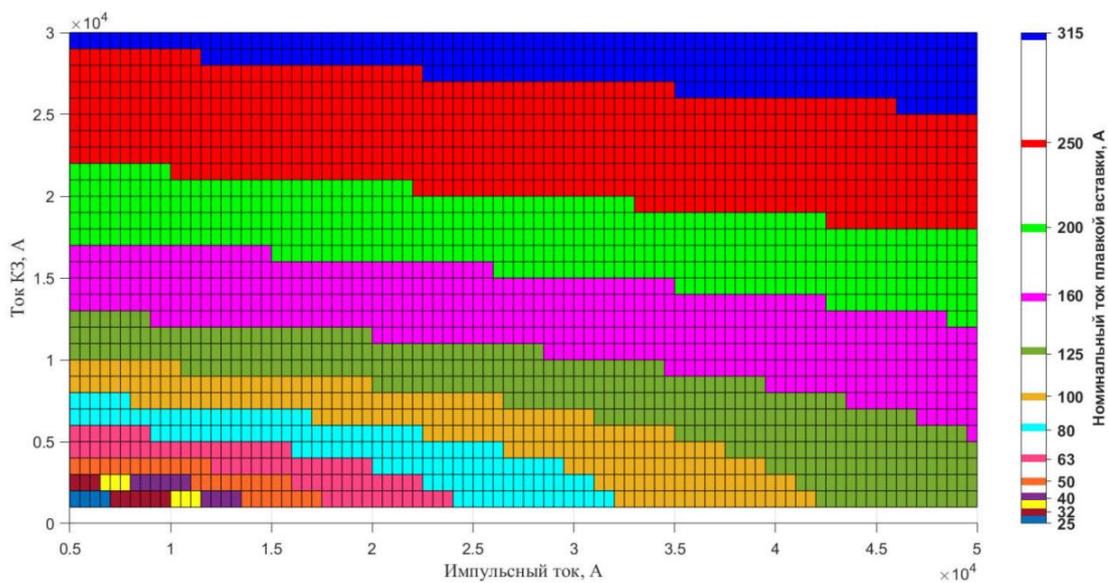


Рисунок 4.4—К выбору параметров плавкой ставки в случае выделения энергии за период воздействия импульса 10/350 мкс с учетом влияния тока КЗ

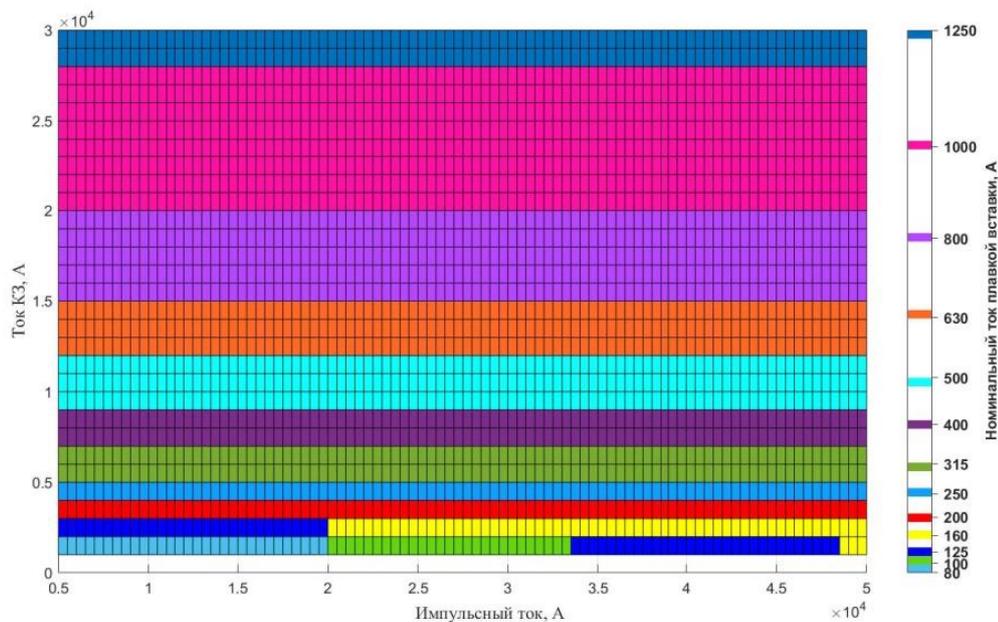


Рисунок 4.5 – К выбору параметров плавкой ставки в худшем случае выделения энергии при протекании импульсного тока 8/20 мкс

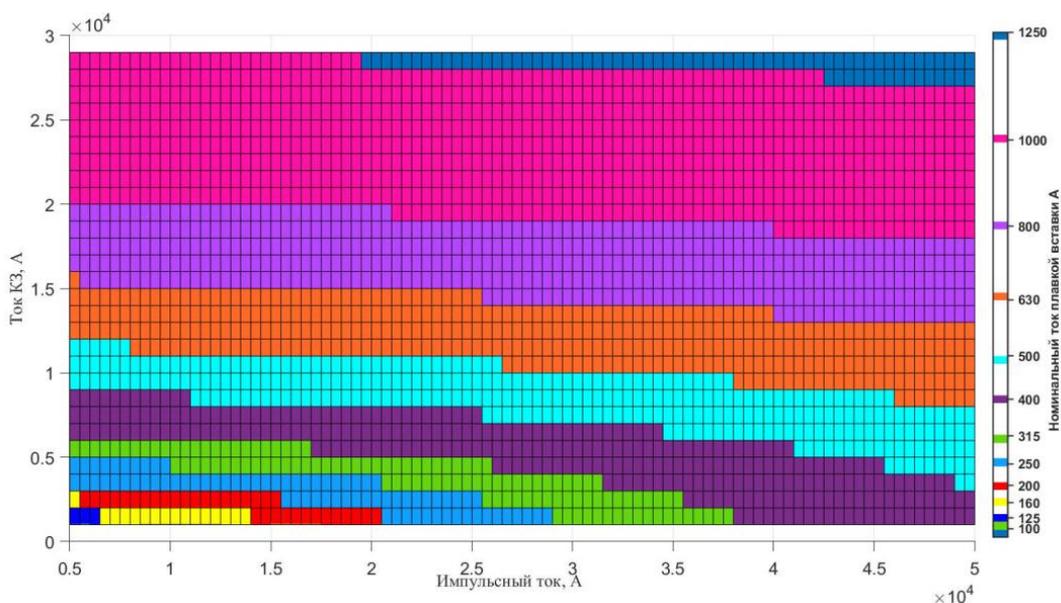


Рисунок 4.6 – К выбору параметров плавкой ставки в случае выделения энергии за период воздействия импульса 8/20 мкс с учетом влияния тока КЗ

Приведенные результаты расчетов могут быть использованы при проектировании для выбора номинального тока предохранителя в цепи УЗИП.

Для сетей малой мощности, в силу естественных причин решение двух задач: защиты от грозовых перенапряжений и селективного отключения тока КЗ, часто требует компромисса, основанного на принципе минимизации возможных ущербов.

4.3 Схемы подключения УЗИП. Проблемы селективности

При выборе защитных коммутационных аппаратов сети воздействие импульсных токов, как правило, не учитывается. В силу того, что источник перенапряжений по-разному может быть расположен относительно источника напряжения сети энергетическая нагрузка на защитные коммутационные аппараты, устанавливаемые в цепи УЗИП класса 1, оказывается зачастую выше, чем, например, у вводного аппарата. Даже при малых токах КЗ требуется применение предохранителей с номинальными токами до 315 А, в то время как большинство потребителей малой мощности защищаются от КЗ защитными аппаратами со значительно меньшими номинальными токами.

Наиболее часто такая ситуация складывается при применении УЗИП коммутирующего типа, см. рис. 4.2. Таким образом, при малых номинальных токах вводных выключателей обеспечение согласованности их характеристик с параметрами защитных аппаратов УЗИП невозможно. Это естественное положение вещей, являющееся следствием несоизмерности мощностей источника электроснабжения и молнии.

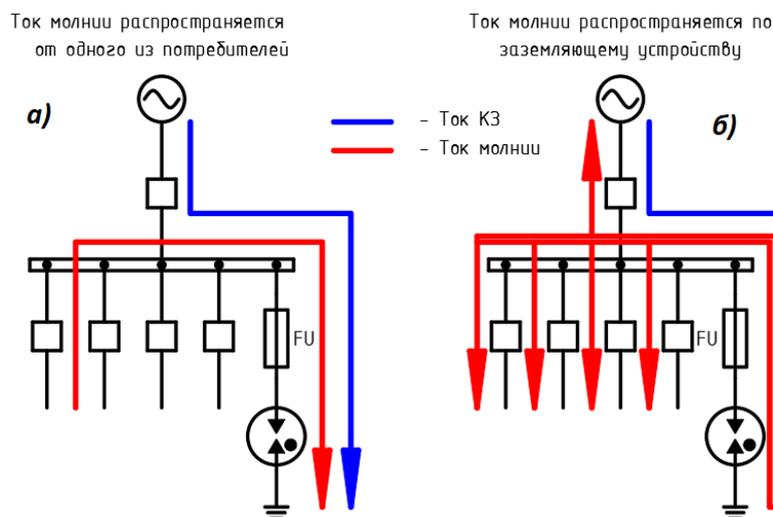


Рисунок 4.7 – Токи в схеме при работе УЗИП (а – источник перенапряжений вблизи от одного из потребителей; б – источник перенапряжений соединен с РУ по заземляющему устройству)

Если при установке УЗИП в РУ рекомендуемый предохранитель имеет больший номинальный ток, чем вышестоящий коммутационный аппарат, то следует реализовывать один из вариантов подключения, представленных на рисунке 5.9.

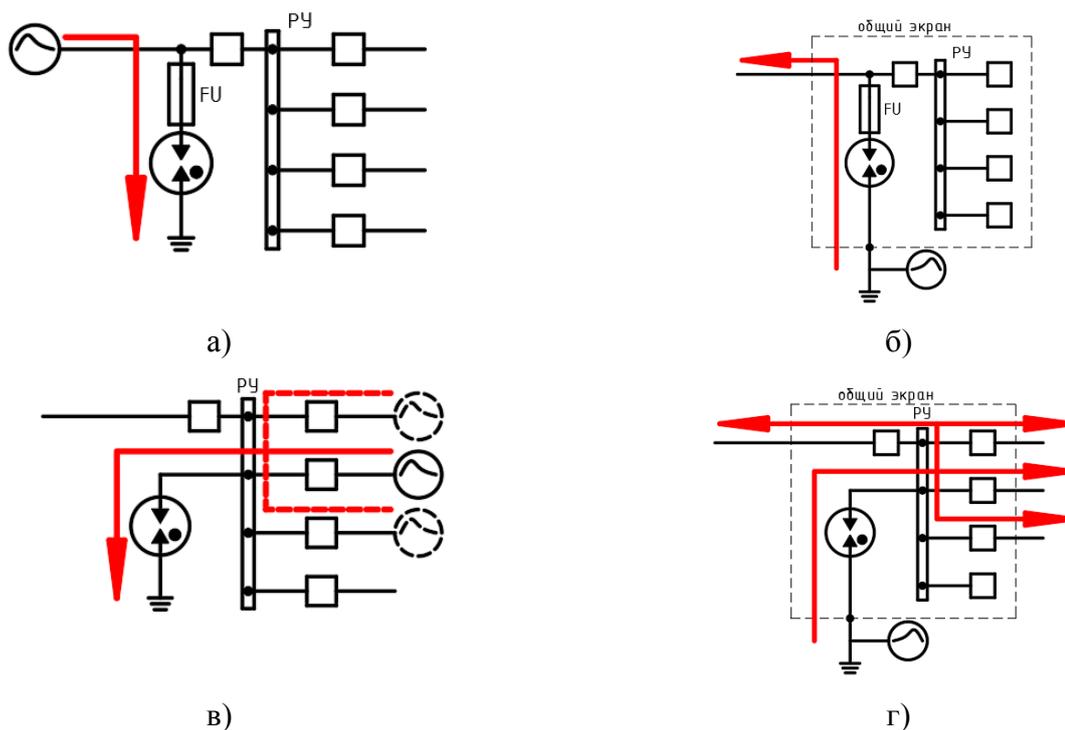


Рисунок 4.8 – Установка УЗИП: а – до вводного коммутационного аппарата на питающей линии при воздействии перенапряжений со стороны питающей линии; б – до вводного коммутационного аппарата на питающей линии при воздействии перенапряжений со стороны заземляющего устройства и одной отходящей от объекта протяженной линии ввода питания, в случае, если остальные линии являются короткими и размещаются в экранируемом объеме, а вводной коммутационный аппарат нормально находится в положении «включен»; в – на

шины без защитных коммутационных аппаратов при воздействии (или возможности такого воздействия) перенапряжений со стороны нескольких линий, отходящих от РУ; г – на шины без защитных коммутационных аппаратов при воздействии перенапряжений со стороны заземляющего устройства и наличии более одной отходящей от объекта линии

Выбор приемлемой схемы подключения возможен на основе анализа конкретной сети.

Подключение УЗИП без защитных коммутационных аппаратов, в связи с невозможностью обеспечить их селективную работу, к сетям с малой мощностью потребления часто является оправданным шагом, однако может повлечь погашение РУ или отключение потребителей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нормативная документация в её современном состоянии не учитывает специфику объектов энергетики и не позволяет выполнить оптимальный подбор параметров УЗИП. В рамках выполнения исследования получены следующие результаты, позволяющие определить основные подходы к выбору параметров и мест установки УЗИП на этапе проектирования сетей СОПТ и СН ПС 35 кВ и выше:

1. Определены типичные конструкции систем освещения, а также условия, при которых для их защиты целесообразно использование УЗИП.

2. Расчетно-экспериментальным методом показано, что системы освещения ПС, размещенные на конструкциях с молниеотводами выполненные с применением экранированных КЛ достаточно хорошо защищены от перенапряжений. В случаях использования неэкранированных КЛ целесообразно защищать сети освещения при помощи УЗИП класса I с импульсным током до 10-12 кА, установленных по схеме 4+0. Системы подсветки зданий ПС, размещенные на кровле при отсутствии экранирования, можно защитить от перенапряжений с помощью УЗИП класса I с импульсным током до 5 кА, установленными по схеме 4+0.

3. Экспериментально показано, что для защиты СОПТ ПС возможно использовать УЗИП класса 2, включенный по схеме 2+0, причем их энергетические нагрузки будут весьма малы, так как основной путь проникновения перенапряжений полевой (индуктированные перенапряжения) и сеть СОПТ является симметричной.

4. Сформулирована проблема организации селективной работы коммутационных аппаратов в цепях с УЗИП. Показана невозможность обеспечения селективности при определенных конфигурациях сети. Рекомендованы схемы подключения УЗИП для различных путей воздействия перенапряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СТО 56947007-29.240.044-2010. Методические указания по обеспечению электромагнитной совместимости на электросетевых объектах ЕНЭС. – М.: ОАО «ФСК ЕЭС», 2010. – 147 с.
2. СТО 56947007-29.240.043-2010. Руководство по обеспечению электромагнитной совместимости вторичного оборудования и систем связи электросетевых объектов. – М.: ОАО «ФСК ЕЭС», 2010. – 25 с.
3. Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2018 №204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года».
4. Ametani, A., Motoyama, H., Suga, N., Ohkawara, K., & Yamakawa, H. (2009). Electromagnetic disturbances of control circuits in power stations and substations experienced in Japan. IET Generation, Transmission & Distribution, 3(9), 801–815 pp.
5. СО 34.35.311-2004 Методические указания по определению электромагнитных обстановки и совместимости на электрических станциях и подстанциях. – М.: Издательство МЭИ, 2004. – 69 с.
6. ГОСТ Р МЭК 62305-1-2010 «Менеджмент риска. Защита от молнии. Часть 1. Общие принципы».
7. ГОСТ Р МЭК 62305-2-2010 «Менеджмент риска. Защита от молнии. Часть 2. Оценка риска».
8. СО 153-34.21.122-2003 Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций. – М.: ЦПТИ ОРГРЭС, 2004. – 31 с.
9. IEC 62305-1. Protection against lightning –Part 1:General principles. – Geneva: IEC Central Office, 2006. – 144 с.
10. Зоричев А. Зоновая концепция. Молниезащита // Информационно-справочное издание «Новости ЭлектроТехники» №27 и 28. – 2004.
11. Lightning Parameters for Engineering Applications // CIGRE. Working Ggroup C4 407. № 549. August. 2013. 117 p.
12. Предложения по совершенствованию стандартов молниезащиты, заземления, электромагнитной совместимости / С. Л. Шишигин // Энергетик. – 2017. . – № 2. – С. 31-32.
13. Параметры разряда молнии во внутренней молниезащите / Э. М. Базелян, А. В. Борисов, А. И. Федоров // Известия Российской академии наук. Энергетика. - 2015. – № 6. – С. 79-89
14. Российские нормативы по молниезащите. Проблемы и перспективы/ И. Полетаев, А. Ротанов// «Новости ЭлектроТехники» №1 и 2, 2020. – С.60-64
15. Э.М. Базелян. Нормирование молниезащиты в России. Основные проблемы и пути совершенствования. // Третья Российская конференция по молниезащите: Сборник докладов / - СПб, 2012. – с. 372–382

16. Базелян Э.М. Параметры разряда молнии во внутренней молниезащите/ Борисов А.В., Фёдоров А.И. // Известия наук. Энергетика. – 2015. – №6. – С.79-89
17. ГОСТ Р 51992-2011 (МЭК 61643-1:2005) «Устройства защиты от импульсных перенапряжений низковольтные. Часть 1. Устройства защиты от импульсных перенапряжений в низковольтных силовых распределительных системах. Технические требования и методы испытаний».
18. ГОСТ Р МЭК 61643-12-2011 «Устройства защиты от импульсных перенапряжений низковольтные. Часть 12. Устройства защиты от импульсных перенапряжений в низковольтных силовых распределительных системах. Принципы выбора и применения».
19. Э.М. Базелян Выбор УЗИП. Оценка токов молнии// Информационно-справочное издание «Новости ЭлектроТехники» № 2(92) . – 2015. – С. 2-3
20. СТО 56947007-29.120.40.262-2018. Руководство по проектированию систем оперативного постоянного тока (СОПТ) ПС ЕНЭС. Типовые проектные решения. – М.: ОАО «ФСК ЕЭС» . – 2018. – 133 с.
21. СТО 56947007-29.120.40.041-2010. Системы оперативного постоянного тока подстанций. Технические требования (с изменениями от 14.12.2012, 28.01.2015),. – М.: ОАО «ФСК ЕЭС» . – 2015. – 20с.
22. Гусев Ю.П., Тимонин И.А. Защита микропроцессорных устройств релейной защиты от перенапряжений в системах оперативного постоянного тока // Известия вузов. Электромеханика. 2013, №1. – С. 84-85.
23. Гусев Ю.П., Монаков Ю.В., Чо Г.Ч. Предотвращение срабатываний дискретных входов микропроцессорных релейных защит при замыканиях на землю в системах оперативного постоянного тока // Энергоэксперт. – 2011, № 5.
24. СТО 56947007-29.240.40.263-2018. Системы собственных нужд подстанций. Типовые проектные решения. – М.: ОАО «ФСК ЕЭС», 2018. – 37 с.
25. СТО 56947007-29.240.10.248-2017. Нормы технологического проектирования подстанций переменного тока с высшим напряжением 35-750 кВ (НТП ПС) – М.: ОАО «ФСК ЕЭС» . – 2017. – 135 с.
26. 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.
27. РД 34.21.122-87. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений. – М.: Энергоатомиздат. – 1989. –. 31 с.

28. Shishigin, D.S., Shishigin, S.L. Numerical modeling in EMC problems of electric power substations when lightning strikes // Conference Proceedings - 2017 17th IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 1st IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe, IEEEIC / I and CPS Europe 2017 – Milan, Italy, 2017. – P.1-5.
29. Shishigin, D.S. AutoCAD application for LPS, grounding and EMC problems / D.S. Shishigin, S.L. Shishigin, N.V. Korovkin // EMC 2015 Joint IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and EMC Europe. – Dresden, Germany, 2015. – P.834-838.
30. ГОСТ Р 51317.4.5-99 (МЭК 61000-4-5-95) Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к микросекундным импульсным помехам большой энергии. Требования и методы испытаний. – М. : ИПК Издательство стандартов. – 2000. – 31 с.
31. ГОСТ Р 51317.4.12-99 (МЭК61000-4-12-96). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к колебательным затухающим помехам. Требования и методы испытаний. – М.: ИПК Издательство стандартов. – 2000. – 34 с.
32. ГОСТ Р 51317.6.5-2006 (МЭК 61000-6-5:2001) Устойчивость к электромагнитным помехам технических средства, применяемых на электростанциях и подстанция. Требования и методы испытаний. – М.: Стандартинформ. – 2007. – 26 с.
33. Кузнецов М.Б. и др. Входные цепи устройств РЗА. Проблемы защиты от импульсных перенапряжений // Новости ЭлектроТехники. – 2006. – № 6(42)
34. Сиротинский Л.И. Техника высоких напряжений. часть 3-я. Волновые процессы и внутренние перенапряжения в электрических системах. – М: Госэнергоиздат, 1959г. – 369 с.
35. Кадомская К.П., Лавров Ю.А., Рейхердт А.А. Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них: Учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 319 с.
36. Гринёв А.С. Особенности передачи грозových импульсов перенапряжения через силовые трансформаторы 6-35/0,4 кВ со схемой соединения обмоток «треугольник-звезда с выведенной нейтралью» // Современные научные исследования. – 2014. Выпуск 2-2014. – URL:<http://e-koncept.ru/2014/54739>.
37. Правила устройства электроустановок. 7-е и 6-е издание. – СПб.:
38. П.Н. Карпов О применении УЗИП для защиты сетей освещения / Косоруков А.В., Н.Б. Кутузова, С.А. Пашичева, В.В. Титков // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2020. – № 4 (61) . – С. 78-83.
39. ГОСТ 31996-2012. Кабели силовые с пластмассовой изоляцией на номинальное напряжение 0,66; 1 и 3 кВ. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2013. – 35 с.
40. ГОСТ Р МЭК 60949-2009. Расчет термически допустимых токов короткого замыкания с учетом неадиабатического нагрева. – М.: Стандартинформ, 2009. – 12 с.

41. ГОСТ ИЕС 60269-1-2016. Предохранители низковольтные плавкие. Часть 1. Общие требования. – М.: Стандартиформ, 2017. – 64 с.
42. СО 34.35.311-2004. Методические указания по определению электромагнитных обстановки и совместимости на электрических станциях и подстанциях. – М.: Издательство МЭИ, 2004. – 69 с.
43. ГОСТ Р 51992-2011. Устройства защиты от импульсных перенапряжений низковольтные. Часть 1. Устройства защиты от импульсных перенапряжений в низковольтных силовых распределительных системах. Технические требования и методы испытаний. – М.: Стандартиформ, 2012. – 55 с.
44. Техника высоких напряжений / Л.Ф. Дмоховская, В.П. Ларионов, Ю.С. Пинталь и др.; под ред. Д.В. Разевига. М., «Энергия», 1976. – 488 с.
45. Александров, Г.Н. Молния и молниезащита / Г.Н. Александров. – СанктПетербург.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – 280 с.
46. Базелян Э.М. Физика молнии и молниезащиты / Э.М. Базелян, Ю.П. Райзер. – Москва. Физмалит, 2001. – 320 с.
47. Актуальные проблемы защиты высоковольтного оборудования подстанций от грозовых волн, набегających с воздушных линий / Б.В. Ефимов, Ф.Х. Халилов, А.Н. Новикова, Н.И. Гумерова, Ю.М. Невретдинов // Труды Кольского научного центра РАН. – 2012. – № 8. – С.7-25.
48. Гумерова, Н.И. Численные методы анализа переходных процессов в электроэнергетике: учебное пособие / Н. И. Гумерова, Б. В. Ефимов – СПб.: Издво Политехн. ун-та, 2008. – 156 с.
49. Гайворонский, А.С. Модель ориентировки лидера молнии и ее инженерные применения / А.С. Гайворонский, К.В. Карасюк // I Росс. конф. по молниезащите: материалы конф. – Новосибирск, 2007. – С.79-84.
50. Колечицкий, Е.С. Основы расчета заземляющих устройств: учебное пособие / Е.С. Колечицкий. – М.: Изд. МЭИ, 2001. – 48 с
51. Коровкин, Н.В. Расчетные методы в теории заземления. Научнотехнические ведомости СПбГПУ / Н.В. Коровкин, С.Л. Шишигин // Изд-во СПбГПУ. Вып.1(166). – 2013. – С.74-79
52. Шишигин С.Л. Математические модели и методы расчета заземляющих устройств / С.Л. Шишигин // Электричество. – 2010. – №1. – С.16-23.
53. Зоричев А.Л. УСТРОЙСТВА ЗАЩИТЫ ОТ ИМПУЛЬСНЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ Выбор типа, класса, схемы и места установки // Информационно-справочное издание «Новости ЭлектроТехники» № 3(87). – 2014. – С. 52-54.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДОКЛАДА

Публикации в научных журналах из списка ВАК

1. П.Н. Карпов О применении УЗИП для защиты сетей освещения / Косоруков А.В., Н.Б. Кутузова, С.А. Пашичева, В.В. Титков // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2020. – № 4 (61) . – С. 78-83.

Прочие работы по теме диссертации

2. A. Kosorukov SPD in illumination system of HV air insulated substation / P. Karpov, N. Kutuzova, S. Pashicheva, V. Titkov // E3S Web of Conferences. – Vol.164 . 03020 (2020)
3. Еремич Я.Э. Характеристики сетей 6-35 кВ, необходимые для решения проблем ЭМС электроэнергетики, техносферы и биосферы / Пашичева С.А. , Халилов Ф.Х. // Труды Кольского научного центра РАН. 2016. – №15-13. – С. 84-96
2. Еремич Я.Э. Проблемы электромагнитной совместимости сетей высокого, сверхвысокого и ультравысокого напряжения, техносферы и биосферы / Пашичева С.А. , Халилов Ф.Х. // Труды Кольского научного центра РАН. 2017. – №1-14 . – С. 57-66.
3. Еремич Я.Э. К вопросу электромагнитной совместимости и надежности элементов в сетях 6-35 кВ / Пашичева С.А. , Халилов Ф.Х. // Труды Кольского научного центра РАН. 2017. – №1-14. – С. 67-76.
4. Еремич Я.Э. Проблемы электромагнитной совместимости сетей высокого напряжения. Вопросы стандартизации / Пашичева С.А. , Халилов Ф.Х. , Ефимов Б.В. // Труды Кольского научного центра РАН. – 2017. – №8-15. – С. 70-77.
5. Еремич Я.Э. Защита нейтрали трансформаторов 6-35 кВ / Пашичева С.А. , Халилов Ф.Х., Карпов А.С. // Труды Кольского научного центра РАН. – 2016. – №1-12 (35) . – С.38-48.