



ПОЛИТЕХ

Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

На правах рукописи

Пашичева Светлана Александровна

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

Специальность 05.14.12 – «Техника высоких напряжений»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2021

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

Научный руководитель: – Титков Василий Васильевич
доктор технических наук, профессор, профессор Высшей школы
высоковольтной энергетики Института энергетики ФГАОУ ВО
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого»

Официальные
оппоненты: – Коровкин Николай Владимирович
доктор технических наук, профессор, профессор Высшей школы
высоковольтной энергетики Института энергетики ФГАОУ ВО
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого».

– Ярмаркин Михаил Кириллович
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой
«Электроэнергетическое оборудование электрических станций,
подстанций и промышленных предприятий» ФГОУ «ДПО
Петербургский энергетический институт повышения
квалификации»

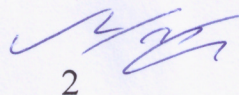
Ведущая организация: – Центр физико-технических проблем энергетики Севера
Филиал Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Федерального исследовательского центра
«Кольский научный центр Российской академии наук» (ЦЭС
КНЦ РАН)

Защита состоится «26» ноября 2021 г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета У.05.14.12 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (195251, г. Санкт-Петербург, ул. Гжатская, д. 27, литера А, аудитория 305).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://www.spbstu.ru/> ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»/

Автореферат разослан _____ 2021 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета У.05.14.12
кандидат технических наук, ассистент



Магазинов С.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 является 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.

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

В настоящий момент объекты энергетики продолжают оснащаться новыми электронными системами, что связано с процессом внедрения цифровых технологий для реализации задачи цифровой трансформации отрасли. 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. Применение устройств защиты от импульсных перенапряжений (УЗИП) – является 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. Несмотря на это 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 ПС 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 сети СН и СОПТ подстанций 35кВ и выше.

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 модели 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. разработка рекомендаций по координации УЗИП и выбору защитных аппаратов для подключения УЗИП в СН и СОПТ;
4. экспериментальное исследование процесса перехода импульсных перенапряжений из сети 10 кВ ПС в сеть 0,4 кВ через трансформатор собственных нужд (ТСН);
5. экспериментальное исследование влияния компоновки щита постоянного тока на уровень перенапряжений в СОПТ.

Методы исследования. Решение поставленных задач производилось с помощью расчетно - экспериментального исследования в специализированной компьютерной программе ЗУМ, программном комплексе Matlab натурных экспериментов на учебно-тренировочном полигоне ПАО «Ленэнерго».

Научная новизна представленной работы заключается в следующем:

1. На основе разработанной каркасной модели ПС 110 кВ оценены уровни перенапряжений в сети СН на примере сети освещения, и проведено расчетно-экспериментальное исследование процесса протекания тока молнии в сети освещения ПС, обоснована необходимость применения УЗИП для определенных типов конструкций сети СН.
2. Подтверждена экспериментально возможность воздействия на РУ-0,4 кВ перенапряжений, переходящих с обмотки высокого напряжения ТСН.
3. Сформулирована проблема организации селективной работы коммутационных аппаратов в цепях с УЗИП на основе анализа схем их подключения.
4. Рекомендованы схемы подключения УЗИП для различных путей воздействия перенапряжений.

Практическая значимость. Разработанные рекомендации по выбору параметров и схем подключения УЗИП в СН и СОПТ подстанций 35 кВ и выше, а также рекомендаций по выбору параметров защитных предохранителей в цепях могут быть использованы проектировщиками при разработке проектных решений по схемам СН и СОПТ.

Достоверность научных положений диссертации обусловлена корректным использованием теории электромагнитных переходных процессов, теоретических основ электротехники, обоснованностью принятых допущений и подтверждением результатов расчетов перенапряжений, реализованных в программе ЗУМ, результатами натурных измерений перенапряжений в сети освещения, а результаты расчетов в программном комплексе Matlab не расходятся с данными, предоставляемыми производителями УЗИП.

Соответствие паспорту специальности.

Объект исследования – сети СН и СОПТ высоковольтных ПС, и предмет исследования – ограничение перенапряжений с помощью УЗИП, соответствуют формуле специальности 05.14.12 «Техника высоких напряжений».

Научные положения диссертации соответствуют п.5 «Исследование атмосферных и внутренних перенапряжений, разработка методов и устройств для ограничения перенапряжений, изучение проблем электромагнитной совместимости» области исследований специальности 05.14.12 «Техника высоких напряжений», так как полученные результаты проведенного расчетно-экспериментального исследования процесса протекания тока молнии в сети освещения ПС, исследования влияния компоновки щита постоянного тока на уровень перенапряжений в СОПТ, экспериментального исследования возможности воздействия на РУ-0,4 кВ перенапряжений, переходящих с обмотки высокого напряжения ТСН позволяют выполнить защиту сетей СН и СОПТ от воздействия перенапряжений с применением УЗИП.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты расчетов каркасной модели ПС 110 кВ для анализа уровней перенапряжений в сети СН на примере сети освещения;
2. Результаты исследования необходимости применения УЗИП для защиты сетей СН и СОПТ на ПС 35 кВ и выше;
3. Рекомендации по выбору параметров и схемы подключения УЗИП для защиты сетей СН и СОПТ на ПС 35 кВ и выше.

Апробация и внедрение результатов работы. Основные положения работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: восьмая международная научно-техническая конференция «Перенапряжения и надёжность эксплуатации электрооборудования» имени академика Н.Н.Тиходеева (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.); международной конференции «21st International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)» (Prague, Czech Republic, 2020 г.).

Публикации. Основные научные и практические результаты диссертационного исследования опубликованы в 9 печатных работах, в том числе 2 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ («Известия НТЦ», «Электроэнергия. Передача и распределение»), 2 – в изданиях, входящих в Scopus («Proceedings - 2020 21st International Scientific Conference on Electric Power Engineering», «E3S Web of Conferences»).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка, состоящего из 56 наименований. Основной текст изложен на 90 страницах, включает 36 рисунков и 28 таблиц. Общий объем диссертации составляет 100 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, сформулированы цели, научная новизна, теоретическая и практическая значимость диссертационной работы.

В первой главе проведен обзор публикаций, описаны типовые схемы сетей СН и СОПТ на ПС 35 кВ и выше. Проанализированы состав потребителей этих сетей, требования к качеству их питания и современные требования электромагнитной совместимости. Выявлена необходимость проведения исследований, позволяющих принять решение о возможности применения УЗИП для защиты сетей СН и СОПТ, выполнить оптимальный подбор параметров УЗИП и выбор схемы их включения с учетом специфики высоковольтных ПС.

Во второй главе решена задача по разработке рекомендаций по применению УЗИП с целью защиты сетей освещения от грозовых перенапряжений. Для чего оценена вероятность появления грозовых перенапряжений и произведен анализ уровней перенапряжений и процессов растекания тока молнии для осветительного оборудования ПС при разных конфигурациях сети. Выделены основные конструкции сетей освещения, которые могут быть подключены к сети СН на ПС 35 кВ и выше. Оценена вероятность появления грозовых перенапряжений с целью обоснования необходимости применения УЗИП в этих сетях. Для расчета перенапряжений в сети освещения была создана каркасная модель заземляющего устройства и металлических конструкций подстанций 110 кВ (рис.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.

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.

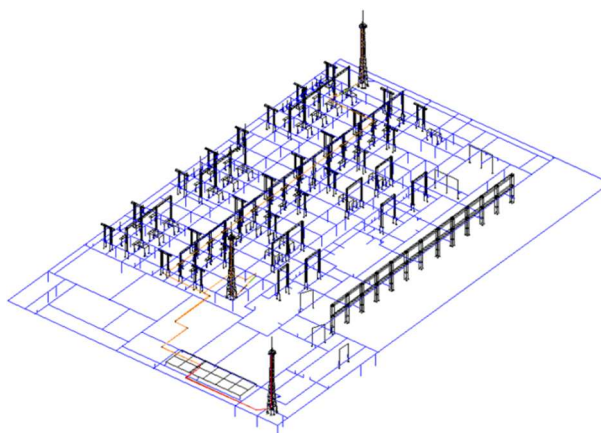


Рисунок 1 – Расчетная модель ПС 110 кВ

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.

Результаты расчет перенапряжений в сети освещения для прожекторной мачты, удалённой от ящика управления освещением (ЯУО) на 50 м по кабельной линии, представлены в таблице 1.

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. В остальных случаях, когда, например, 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), т.е. обеспечивать защиту от синфазных помех.

Таблица 1 – 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

Одной из важнейших задач при выборе типа УЗИП является оценка тока в проводниках КЛ. В таблице 2 представлены результаты расчётов распределения токов в КЛ сети освещения для условий, когда импульсный ток максимален.

Для определения наибольшего возможного значения тока, протекающего через УЗИП, рассматривался случай неэкранированной КЛ без металлической трубы.

Таблица 2 – 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	От мачты	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

Согласно данным таблицы 2 ток в КЛ снижается при увеличении длины и слабо растет с увеличением удельного сопротивления грунта.

На учебном комплексе ПАО «Ленэнерго» были проведены замеры, позволяющие определить распределение тока между заземлителем и КЛ-0,4 кВ, для проверки расчетной модели ПС-110 кВ. Схема измерений показана на рис. 3. Соотношение напряжений, измеренных осциллографом Fluke 190-504 на шунтах цепи генератора и КЛ, позволило оценить долю тока, протекающего по КЛ.

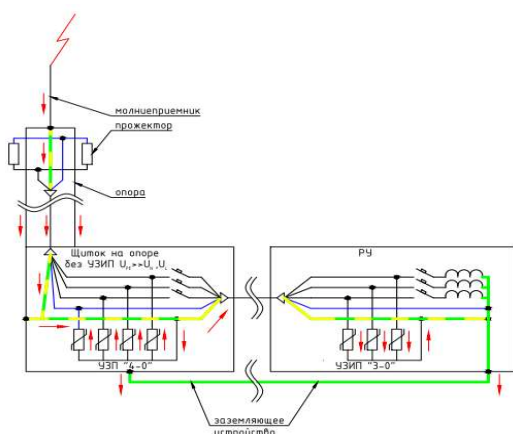


Рисунок 2 – Схема подключения УЗИП

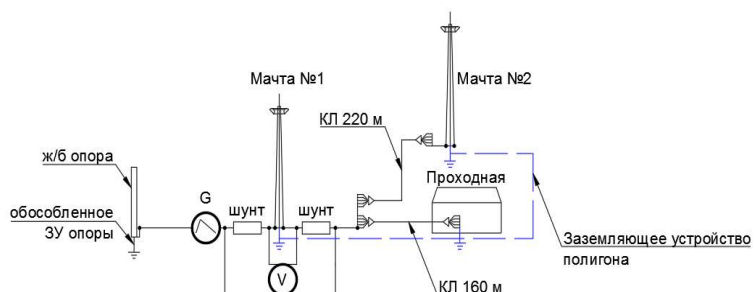


Рисунок 3 – Схема измерений тока молнии, протекающего в КЛ.
G – генератор, V – осциллограф

На рис. 4 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.

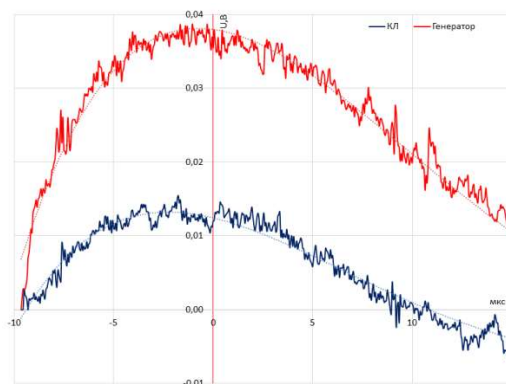


Рисунок 4 – Осциллограммы напряжения на шунтах генератора и КЛ

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.

В третьей 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.

На ЩПТ в ОПУ учебного полигона были отключены выключатели всех подключенных к шинам нагрузок. Схема эксперимента представлена на рис. 5. 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 ЗВУ (т.е. питание ЩПТ осуществляется только от ЗВУ: АБ отключена, нагрузка отключена); при включенных ЗВУ и АБ (нормальная схема работы ЩПТ с резервированием от АБ, нагрузка при этом отключена); при подключенных ЗВУ и АБ последовательно подключалась нагрузка на шины ЩПТ и выполнялась фиксация уровня перенапряжений на шинах ЩПТ.

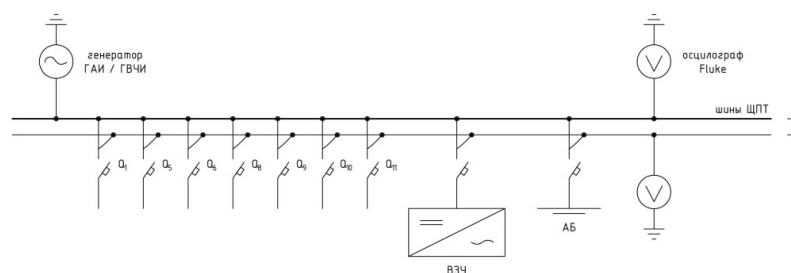


Рисунок 5 – Схема эксперимента

На рис. 6 показано изменение коэффициента передачи по напряжению с полюса на полюс ЩПТ при разных воздействиях по мере подключения присоединений. На рис. 7 показаны амплитуды воздействий в аналогичных условиях.

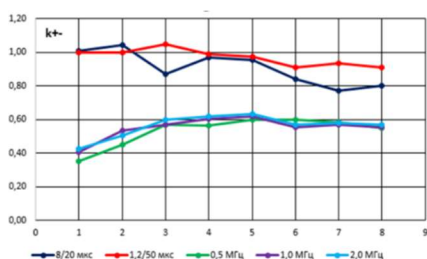


Рисунок 6 – Коэффициент передачи напряжения с полюса на полюс ЩПТ при разных воздействиях по мере подключения присоединений

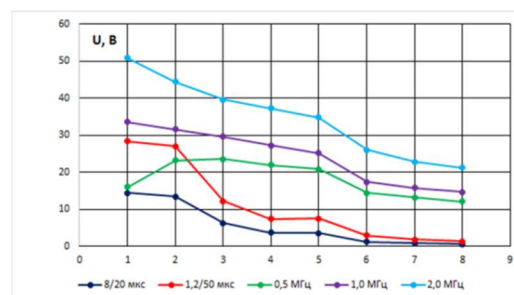


Рисунок 7 – Амплитуды напряжения на полюсах ЩПТ при разных воздействиях по мере подключения присоединений

Видно, что через емкость батареи и ВЗУ импульсные воздействия легко проникают с полюса на полюс ЩПТ. С учетом того, что основные источники помех связаны с СОПТ через ЗУ, то целесообразно подключение УЗИП между полюсами и проводником заземления.

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.

СОПТ на ПС 35 кВ и выше является симметричной, потребители СОПТ на молниеотводах не размещаются, поэтому рекомендовано использование УЗИП, испытанных по классу II, для защиты СОПТ от индуктированных перенапряжений, которые имеют колебательный характер. Из-за наличия ёмкости АБ и симметричности СОПТ рекомендована схема подключения УЗИП 2+0.

В четвертой главе представлены результаты натурального эксперимента, проведенного в условиях учебного комплекса ПАО «Ленэнерго», в котором для трансформаторов разной мощности со схемой соединения обмоток $\Delta/Y0$ были произведены измерения напряжения, передаваемые от первичной обмотки к вторичной для различных форм сигнала. Даны практические рекомендации по выбору характеристик УЗИП и местам их установки с целью защиты сетей собственных нужд ПС 35 кВ и выше от перенапряжений проникающих в сеть 0,4 кВ путем перехода импульсов перенапряжения с высоковольтной обмотки ТСН.

Перенапряжения в сети СН ПС могут возникнуть вследствие удара молнии в ВЛ 6-20 кВ, отходящие от РУ 6-20 кВ ПС, а также в конструкции зданий и сооружений ПС.

В рамках исследования были произведены измерения на трансформаторах ТМГ11-10/0,4 кВ мощностью 250 и 400 кВА со схемой соединения Δ/Y_0 . На рис. 8. показана схема эксперимента. На высоковольтную обмотку трансформатора или все три обмотки сразу при помощи генератора подавали импульсы напряжения, измерения напряжения проводили при помощи осциллографа Fluke 190-504 между выводами обмоток и корпусом трансформатора, а также на шунте в цепи генератора (измерение тока). Применялись генераторы двух типов: апериодических импульсов ГАИ и колебательных затухающих импульсов ГВЧИ. Генератор ГАИ способен выдавать импульсы тока 8/20 мкс (наиболее близки по фронту к стандартному импульсу 10/350 мкс) и напряжения 1,2/50 мкс.

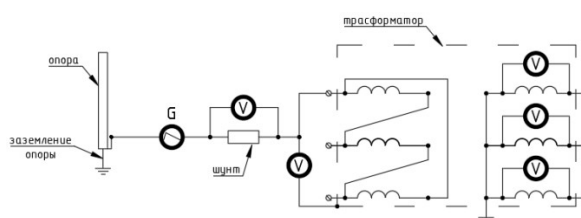


Рисунок 8 – Схема измерений коэффициента передачи импульса перенапряжения с обмотки ВН силового трансформатора к обмотке НН

Из результатов измерений видно, что коэффициент передачи по напряжению с обмотки 10 кВ на обмотку 0,4 кВ трансформатора для апериодического воздействия, характерного для прямых ударов молнии, больше, чем коэффициенты трансформации на промышленной частоте. Таким образом, напряжение на стороне 0,4 кВ оказывается в десятки и сотни раз меньше, чем на стороне 10 кВ, то есть импульс значительно затухает при прохождении трансформаторов (рис. 9).

При воздействии затухающих колебаний коэффициент передачи не превышает 10, а в некоторых случаях даже меньше 1 (напряжение на стороне 0,4 кВ незначительно превышает напряжение на стороне 10 кВ). То есть импульс проходит трансформатор, практически не затухая. Для одного трансформатора отмечен случай резонанса на частоте 1 МГц, при которой напряжение на вторичной обмотке превосходило напряжение на стороне 10 кВ. На рисунках 10–12 показаны зависимости напряжений на обмотке 0,4 кВ относительно земли при воздействии колебательных затухающих импульсов 0,5, 1,0 и 2,0 МГц.

При прямом ударе молнии в отходящие ВЛ 6-20 кВ из-за малой прочности изоляции следует ожидать развитие грозových перенапряжений на всех трех фазах, при этом коэффициент передачи колебательных воздействий приблизительно равен 1-2.

Таким образом, ключевым вопросом при оценке опасности воздействия перенапряжений, переходящих с одной обмотки на другую является обоснование возможности развития именно колебательных перенапряжений.

Колебательная составляющая напряжения при ударах молнии возникает из-за отражений в схеме, а также из-за наличия нелинейных элементов с нелинейными устройствами, в качестве которых могут выступать: изоляция при пробое, защитные аппараты. Развитие колебательных процессов можно считать расчетным случаем для сетей среднего напряжения. При этом в случае коэффициента передачи по напряжению равному 1 величина перенапряжений на стороне 0,4 кВ будет соответствовать остающемуся напряжению защитных аппаратов по стороне среднего напряжения.

С учетом того, что остающееся напряжение для ОПН 6 кВ, как правило, превышает 16 кВ можно говорить, что переход перенапряжений через обмотки трансформаторов может представлять опасность, однако, только в случае близких ударов молнии, так как временные параметры изменения напряжения должно происходить за времена порядка мкс.

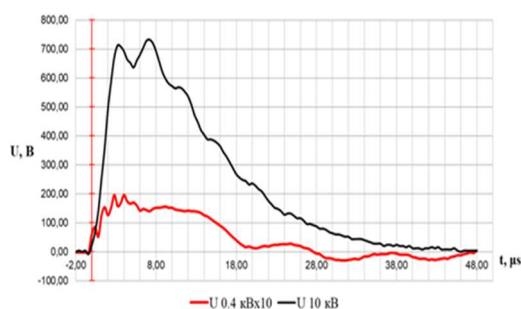


Рисунок 9 – Напряжение на обмотках трансформатора 10/0,4 кВ при подаче импульса 1,2/50 мкс на обмотку 10 кВ (напряжение на обмотке 0,4 кВ увеличено в 10 раз)

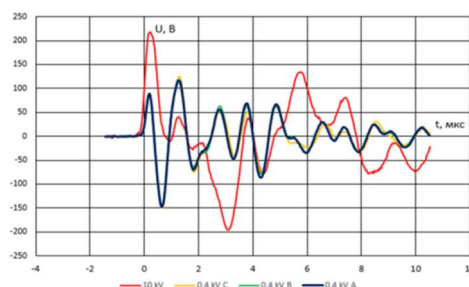


Рисунок 10 – Напряжение обмотках трансформатора 10/0,4 кВ при воздействии колебательного затухающего импульса 0,5 МГц

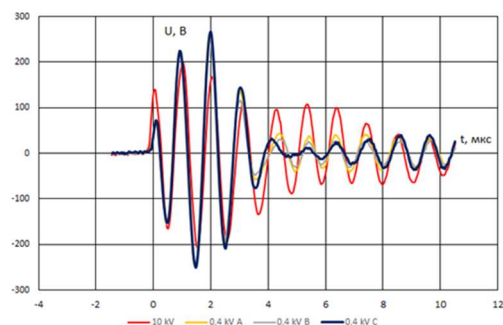


Рисунок 11 – Напряжение обмотках трансформатора 10/0,4 кВ при воздействии колебательного затухающего импульса 1,0 МГц

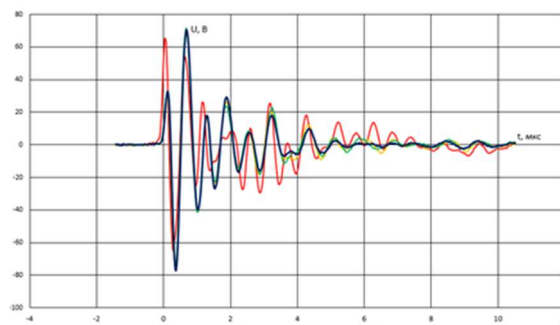


Рисунок 12 – Напряжение обмотках трансформатора 10/0,4 кВ при воздействии колебательного затухающего импульса 2,0 МГц

На рис. 13. приведены типичные осциллограммы напряжения в РУ 10 кВ при близком ударе в ВЛ и наличии на шинах РУ ОПН с наибольшим длительно допустимым рабочим напряжением 12,7 кВ. В процессе расчетов варьировалась величина сопротивления заземляющего устройства РУ ПС (4, 10, 30, 100 Ом). После удара молнии напряжение растет,

что приводит к увеличению проводимости ОПН. С уменьшением сопротивления ЗУ время заряда емкости трансформатора снижается в то время как длительность тока, протекающего через ОПН растет (рис. 14). Как только напряжение снижается до величин, меньших чем наибольшее рабочее напряжение ОПН, характер процесса изменяется. Параметры последующих колебаний зависят от длительности импульса, расстояний между РУ 6-20 кВ ПС и опорами с повреждениями изоляции, величин сопротивления заземляющего устройства РУ 6-20 кВ ПС и опор и т.п. Если учесть, что перенапряжения могут переходить на сторону низкого напряжения практически не ослабляясь, то их предельный уровень будет соответствовать остающимся напряжениям на ОПН высоковольтной обмотки трансформатора, то есть может превышать испытательные напряжения для оборудования 0,4 кВ.

При этом следует учитывать, что характер воздействия не будет импульсным. Вследствие относительно высокой длительности воздействия энергетические параметры УЗИП в большей степени соответствуют классу 1.

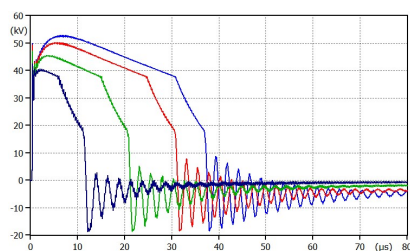


Рисунок 13 – Напряжение на обмотках трансформатора 10 кВ при близком ударе молнии (темно синий – 100 Ом, зеленый – 30 Ом, красный – 10 Ом, синий – 4 Ом)

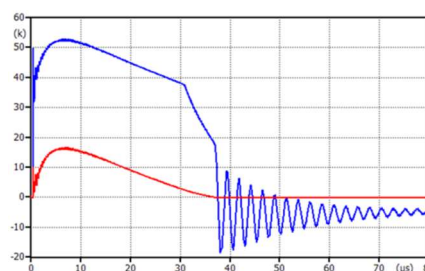


Рисунок 14 – Напряжение на обмотках трансформатора 10 кВ (синий) и ток через ОПН (красный) при сопротивлении ЗУ – 4 Ом

Таким образом, переход перенапряжений в сеть 0,4 кВ из сетей 6, 10 кВ возможен. Для всех РУ СН, высоковольтная сеть которых проходит по открытым территориям или может подвергаться воздействиям индуктированных перенапряжений, рекомендуется защищать обмотки трансформаторов 0,4 кВ с помощью УЗИП класса 1 с импульсным током равным:

$$I_{imp} = \frac{U_{остВН}}{Z} \quad (1)$$

, где $U_{остВН}$ – остающееся напряжение ОПН со стороны высокого напряжения при наименьшем токе, Z – сопротивление заземляющего устройства на высокой частоте.

В пятой главе описана проблема селективности защитных аппаратов, приведены рекомендации по выбору номинальных токов предохранителей в цепи УЗИП и рассмотрены возможные схемы их включения.

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

использовать предохранители, обладающие стойкостью к протеканию импульсного тока (плавкие вставки типа gG) и низким индуктивным сопротивлением.

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

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

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:

$$J_{\text{пр}}, J_{\text{узип}}, J_{\text{FU}} > J_{\text{имп}} \quad (3)$$

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.

Формула для расчета допустимой величины интеграла Джоуля имеет вид:

$$J_{\text{пр}} = k^2 \cdot S^2 \quad (4)$$

где S – минимально допустимая площадь поперечного сечения проводников заземляющего устройства, k – коэффициент, значение которого зависит от материала проводника, его начальной и конечной температур.

В таблице 3 представлены результаты расчета интеграла Джоуля для кабелей в цепи УЗИП (начальная температура 45⁰С).

Таблица 3 – Допустимая величина интеграла Джоуля (А²·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

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.

При срабатывании УЗИП через него протекает импульсный, а в случае УЗИП коммутирующего типа (разрядник) и сопровождающий ток, приблизительно равный току КЗ (см. рис. 15). 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).

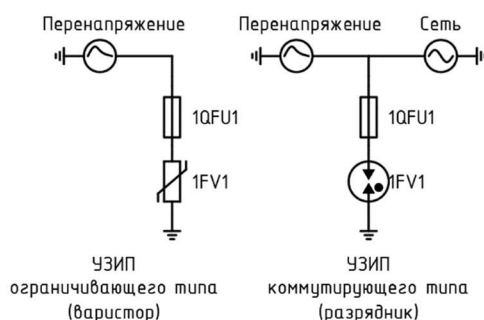


Рисунок 15 – Источники тока при работе УЗИП

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. Наиболее неблагоприятный случай с точки зрения нагрева плавкого предохранителя соответствует протеканию импульсного тока вплоть до момента перехода тока от сети через ноль, и затем еще полпериода за счет питания только от сети.

Указанный расчетный случай для УЗИП коммутирующего типа является весьма жесткими, что приводит к завышению номинального тока предохранителя и на практике может противоречить принципу селективности. Вследствие этого, при проектировании для УЗИП коммутирующего типа целесообразно рассматривать оба варианта энергетических воздействий на предохранитель.

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

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 *Matlab* представлены на рисунках 16 – 19. Приведенные результаты расчетов могут быть использованы при проектировании для выбора номинального тока предохранителя в цепи УЗИП.

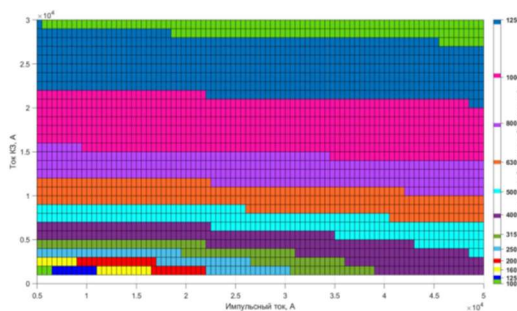


Рисунок 16 – К выбору параметров плавкой ставки предохранителей в худшем случае выделения энергии при протекании импульсного тока 10/350 мкс

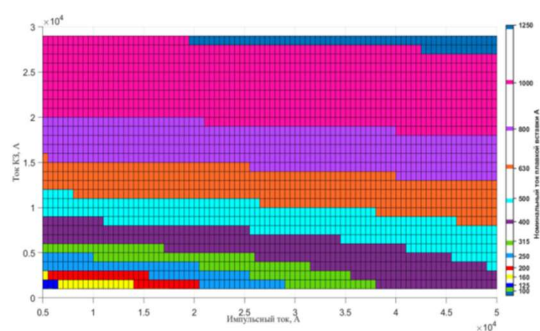


Рисунок 17 – К выбору параметров плавкой ставки в случае выделения энергии за период воздействия импульса 10/350 мкс с учетом влияния тока КЗ

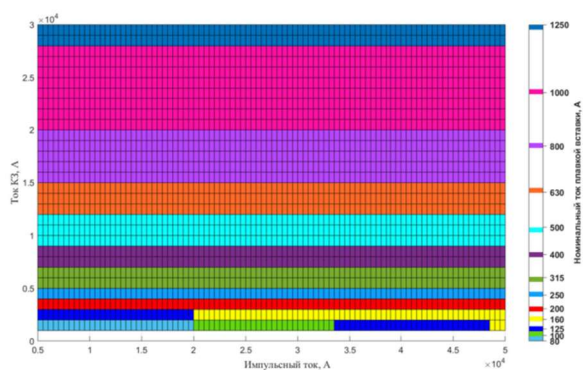


Рисунок 18 – К выбору параметров плавкой ставки в худшем случае выделения энергии при протекании импульсного тока 8/20 мкс

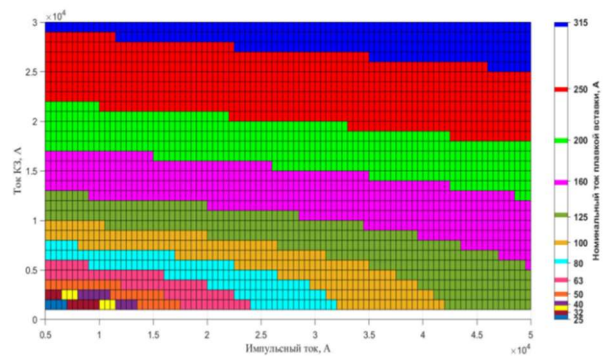


Рисунок 19 – К выбору параметров плавкой ставки в случае выделения энергии за период воздействия импульса 8/20 мкс с учетом влияния тока КЗ

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. 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. Таким образом, при малых номинальных токах вводных выключателей обеспечение согласованности их характеристик с параметрами защитных аппаратов УЗИП невозможно.

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 рисунках 20 – 23.

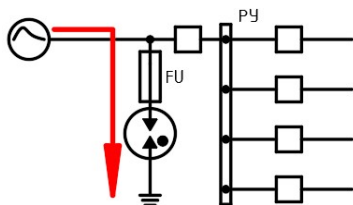


Рисунок 20 – Установка УЗИП до вводного коммутационного аппарата на питающей линии при воздействии перенапряжений со стороны питающей линии

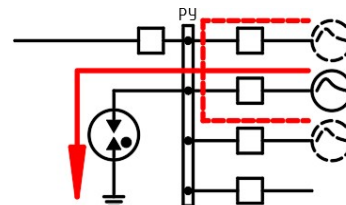


Рисунок 21 – Установка УЗИП на шины без защитных коммутационных аппаратов при воздействии (или возможности такого воздействия) перенапряжений со стороны нескольких линий, отходящих от РУ

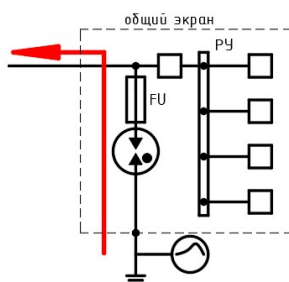


Рисунок 22 – Установка УЗИП до вводного коммутационного аппарата на питающей линии при воздействии перенапряжений со стороны заземляющего устройства и одной отходящей от объекта протяженной линии ввода питания, в случае, если остальные линии являются короткими и размещаются в экранируемом объеме, а вводной коммутационный аппарат нормально находится в положении «включен»

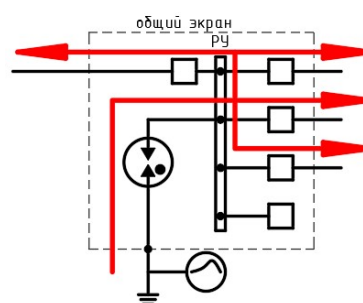


Рисунок 23 – Установка УЗИП на шины без защитных коммутационных аппаратов при воздействии перенапряжений со стороны заземляющего устройства и наличии более одной отходящей от объекта линии

Выбор приемлемой схемы подключения возможен на основе анализа конкретной сети.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе исследования были решены следующие научные задачи:

1. Проанализирован состав оборудования, потребителей и схем СН и СОПТ, современных тенденций изменения требований по электромагнитной совместимости и состава потребителей СН и СОПТ. Отмечено, что ряд потребителей СН не подвергается испытаниям воздействиями, характерными для условий высоковольтной ПС, а перенапряжения в сети СОПТ могут привести к ложным срабатываниям устройств РЗиА. Таким образом, применение УЗИП для защиты оборудования СН и СОПТ на ПС 35 кВ и выше обосновано и рекомендовано некоторыми отраслевыми нормативными документами.
2. На основе разработанной модели ПС 110 кВ были оценены уровни перенапряжений в сети СН на примере сети освещения, и проведено расчетно-экспериментальное исследование процесса протекания тока молнии в сети освещения ПС, обоснована необходимость применения УЗИП для определенных типов конструкций сети СН.
3. В результате экспериментального исследования влияния компоновки щита постоянного тока на уровень перенапряжений в СОПТ установлено, что импульсные воздействия переходят с полюса на полюс ЩПТ через емкость батареи и ВЗУ, однако, увеличение количества

потребителей приводит к резкому снижению амплитуды импульсных перенапряжений на шинах ЩПТ.

4. Экспериментальное исследование процесса перехода импульсных перенапряжений из сети 10 кВ ПС в сеть 0,4 кВ через ТСН подтвердило возможность воздействия на РУ 0,4 кВ перенапряжений, переходящих с обмотки высокого напряжения ТСН.

5. Анализ схем подключения УЗИП показал невозможность обеспечения селективности при определенных конфигурациях сети. На основе этого анализа сформулирована проблема организации селективной работы коммутационных аппаратов в цепях с УЗИП.

В рамках выполнения исследования получены следующие практические 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 II, включенными по схеме 2+0. Энергетические нагрузки на УЗИП в СОПТ будут весьма малы, так как основной путь проникновения перенапряжений полевой.

4. Рекомендованы схемы подключения УЗИП для различных путей воздействия перенапряжений.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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.

2. А. В. Косоруков Устройство защиты от импульсных перенапряжений в сети НН КТП / Н. Б. Кутузова, С. А. Пашичева, В. В. Титков // Известия НТЦ Единой энергетической системы– 2020. – № 2 (83). – С. 114-119.

Прочие работы по теме диссертации

3. 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). DOI:10.1051/e3sconf/202016403020
4. A. Kosorukov The features of lightning protection of low-voltage system of air insulated high voltage substation by surge protective device Proceedings/ N. Kutuzova, S. Pashicheva, V. Titkov, P. Toman, P. Tukeev// 21st International Scientific Conference on Electric Power Engineering, EPE 2020. –9269273 (2020). DOI:10.1109/EPE51172.2020.9269273
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.

Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве:

[1–4] – участие в разработке расчетной модели, подготовке расчетных программ, проведении натурных экспериментов на учебном полигоне, анализе и оценке полученных результатов, [5–9] – подготовка обзора литературы по исследуемой проблеме, анализ и оценка полученных результатов.