

На правах рукописи

КОСОРУКОВ Антон Владимирович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИНДУКТИРОВАННЫХ ПРИ ПОСЛЕДУЮЩИХ
УДАРАХ МОЛНИИ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ВО ВТОРИЧНЫХ КЛ НА
ОБЪЕКТАХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ**

Специальность 05.14.12 – Техника высоких напряжений

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2013

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный
руководитель –

Титков Василий Васильевич
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет», г. СПб

Официальные
оппоненты –

Фоминич Эдуард Николаевич
доктор технических наук, профессор
Военный институт (инженерно-технический)
федерального государственного казенного военного
образовательного учреждения высшего
профессионального образования «Военная академия
материально-технического обеспечения имени
генерала армии А.В. Хрулева»

Борисов Руслан Константинович
кандидат технических наук, ведущий научный
сотрудник ФГБОУ ВПО «Национальный
исследовательский университет «МЭИ», г. Москва

Ведущая
организация –

**ОАО «Северо-западный энергетический
инжиниринговый центр»
(ОАО «СевЗап НТЦ»)**

Защита состоится «20» декабря 2013 года в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.11 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, главное здание, ауд.118.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан « » _____ 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д
212.229.11
кандидат технических наук,
доцент

_____ Попов М. Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

В настоящий момент в энергосистеме России активно внедряется микропроцессорная (МП) техника, заменяющая устройства релейной защиты и автоматики (РЗА) на электромеханической базе. Новая аппаратура позволяет быстро реагировать на аварийные ситуации, предотвращать их, регистрировать переходные процессы, вести коммерческий учет электроэнергии и автоматизировать управление сложными системами электроснабжения. Однако данные виды оборудования одновременно являются более чувствительными к воздействию электромагнитных помех, которые могут либо вывести из строя микропроцессорную технику, либо привести к сбою в ее работе (генерированию ложных команд, сбросу уставок и т.п.). Кроме того, в подавляющем большинстве случаев, МП оборудование РЗА является неремонтопригодным, что приводит к росту убытков, связанных с заменой терминалов в случаи их повреждения.

Многолетний опыт измерений показывает, что уровень электромагнитных помех, воздействующий на вторичные цепи объектов электроэнергетической системы высок, и для таких объектов характерна тяжелая электромагнитная обстановка. Иными словами, величины перенапряжений, напряженностей полей и других электромагнитных воздействий близки к допустимым (испытательным).

Перенапряжения, развивающиеся в контрольных КЛ при ударах молнии, условно можно разделить на две группы: связанные с увеличением потенциала ЗУ и индуцированные.

В теории расчета заземляющих устройств в последние годы сделан значительный шаг вперед, что отражается в большом количестве публикаций на данную тему и увеличении количества программ для расчета ЗУ. С оценкой индуцированных во вторичных цепях перенапряжений при последующих ударах молнии, обладающих коротким фронтом (0,25 мкс), такого развития не

наблюдается. Тем не менее, на стадии проектирования объектов ЕНЭС согласно стандарту ОАО «ФСК ЕЭС» необходимо производить оценку данного вида электромагнитного воздействия.

Для открытых распределительных устройств (ОРУ) именно данный вид перенапряжений зачастую определяет конфигурацию трасс прокладки КЛ вторичных цепей и тип кабельной канализации. Таким образом, развитие методов расчета индуктированных при последующих ударах молнии перенапряжений во вторичных цепях является актуальной задачей, востребованной проектными организациями.

Степень разработанности проблемы

Решением подобных задач в разные годы занимались Костенко М.В., Разевиг Д.В., Базелян Э.М., Ефимов Б.В., Шишигин С.Л., Коровкин Н.В., Гайнуллин Р.А., Потапов В.В., Садовская Е.Ю., Колечицкий Е.С., Борисов Р.К. и др. Однако данный вид перенапряжений подробно не рассматривались в работах упомянутых авторов или рассматривались с существенным упрощением структуры объекта электроэнергетики. Существующее, рекомендованное нормативной документацией, программное обеспечение для оценки данного вида помех также не учитывает характерные для объектов электроэнергетики конструкции и использует упрощенные модели грунта.

Цели работы

Разработка метода расчета и программного обеспечения, позволяющих выполнять оценку индуктированных при последующих ударах молнии перенапряжений, в условиях характерных для объектов электроэнергетики (наличие заземляющего устройства, металлоконструкций, неоднородной структуры грунта).

Объект исследования

Объект электроэнергетики, открытое распределительное устройство, кабельные линии вторичных цепей.

Предмет исследования

Влияние структуры объектов электроэнергетики на уровень индуктированных при последующих ударах молнии перенапряжений в кабельных линиях вторичных цепей.

Метод исследования

Оценка величины индуктированных перенапряжений предполагает решение двух задач: моделирования связи источника (ток молнии) и приемника помех (кабельная линия), а также расчета переходного процесса в КЛ. Связь источника и приемника помех осуществляется через электромагнитное поле, для расчета которого используется метод конечных разностей во временной области. При расчете переходного процесса в КЛ используется метод бегущих волн.

Научная новизна

1. Разработан способ оценки индуктированных перенапряжений в кабельных линиях (КЛ) вторичных цепей при последующих ударах молнии на основе прямого решения уравнений Максвелла относительно составляющих векторов напряженностей электрического и магнитного поля (FDTD метода). В отличие от существующих методов при выполнении оценок грунт может быть описан как среда с неоднородным распределением электрофизических характеристик общего вида (задаются параметры μ , ρ , ϵ), могут быть учтены металлоконструкции сложной топологии, в том числе заземляющее устройство, принято, что скорость распространения электромагнитного поля конечна, возможен учет объемных проводящих тел в воздухе и грунте.
2. Разработанный способ расчета позволил оценить потенциал и сопротивление заземляющих устройств (ЗУ) сложной конфигурации при подаче на них высокочастотных (с фронтом или периодом менее 1 мкс) воздействий, что может быть использовано при решении задач ограничения высокочастотных помех (обеспечение ЭМС), в задачах грозозащиты, а также при проектировании ЗУ электроустановок специального назначения.

Практическая значимость

Разработанный метод расчета позволяют более точно производить оценку перенапряжений при проектировании объекта, что оказывает влияние на конфигурацию трасс вторичных цепей. В работе также показано, что:

1. Разработан программный комплекс для оценки индуктированных перенапряжений при последующих ударах молнии в КЛ вторичных цепей объекта с учетом: конфигурации заземляющего устройства, наличия объемных проводящих тел и двух видов металлических коммуникаций (по проводимости и размерам), сложной структуры грунта.
2. Показано, что применение порталных молниеотводов на ОРУ 110-220 кВ, имеющих мостовую схему, при отсутствии специальных мер по экранированию КЛ вторичных цепей приводит к нарушению требований ЭМС. Рекомендовано применять отдельно стоящие молниеотводы с обособленным заземлением, а также рассмотреть вопрос об изменении нормируемых параметров импульсов тока молнии в сторону снижения амплитуды и увеличения фронта.
3. Показано, что прокладка вдоль трассы КЛ вторичных цепей на небольшой глубине «экранирующих» заземлителей не является эффективной заменой экранов КЛ, а также может послужить причиной увеличения уровня помех.
4. Показана необходимость учета процессов распространения ЭМ возмущения по ЗУ для получения корректных оценок индуктированных перенапряжений в КЛ вторичных цепей.
5. Показано, что обособленное заземление молниеотводов согласно требованиям современной редакции ПУЭ не может обеспечить отсутствие проникновения тока молнии в ЗУ объекта. Для исключения влияния подобного явления на уровень помех необходимо увеличение расстояния между ЗУ РУ и заземляющим устройством молниеотвода.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Новый способ оценки индуктированных при последующих ударах молнии перенапряжений на основе полевого механизма связи источника и приемника помех, позволяющий гибко моделировать структуру грунта и металлоконструкции объекта электроэнергетики, производить учет конечной скорости распространения электромагнитного поля.
2. Новый способ расчета заземляющих устройств при воздействии импульсов тока с короткими (до 1 мкс) фронтами и высокочастотных воздействий.

Степень достоверности результатов

Результаты расчета заземляющих устройств, выполненных в работе, соответствуют теоретическим представлениям и данным экспериментальных исследований. Правильность работы алгоритмов, примененных в диссертации, подтверждены анализом решения модельных задач, имеющих аналитическое решение.

Апробация результатов работы

Основные положения диссертации докладывались на Третьей Российской конференции по молниезащите (СПб, 2012 год) и заседании кафедры «Электроэнергетика, техника высоких напряжений» ФГБОУ ВПО «СПбГПУ» (СПб, 2013 год).

Реализация результатов работы

Результаты работы используются при проектировании подстанций 110-330 кВ и заземляющих устройств опор ВЛ 110-330 кВ ООО «НПФ ЭЛНАП» (г. Санкт-Петербург)

Публикации

По теме диссертации опубликованы 8 печатных работы, из которых 2 в изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура диссертационной работы

Работа состоит из введения, 7 глав, заключения и списка литературы из 44 наименований. Работа включает 99 страниц машинописного текста, 41 рисунок, 8 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение

В связи с внедрением микропроцессорного оборудования в системы управления объектами электроэнергетики проблема обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) является значимой. Воздействиями, приводящими к наибольшему ущербу, являются: индуктированные перенапряжения во вторичных цепях, а также помехи, связанные с ростом потенциала заземляющего устройства (ЗУ). Теория расчета ЗУ в последние годы интенсивно развивается, в области расчета индуктированных при КЗ и ударах молнии перенапряжений такого развития не наблюдается, тем не менее нормативная документация требует проведения расчетов воздействий этого вида. Как правило, последующие удары молнии из-за более короткого фронта создают большие по величине индуктированные перенапряжения во вторичных цепях, чем первые компоненты тока молнии. Таким образом, задача совершенствования методов расчета индуктированных при воздействии импульсов тока с коротким фронтам перенапряжений является актуальной.

1. Обзор проблемы

В начале главы изложены общие сведения о проблеме электромагнитной совместимости. Приведены основные понятия, используемые в практике проектирования: электромагнитная обстановка и ее классификация, степени жесткости испытаний, также указаны критерии обеспечения ЭМС. Особое внимание уделено характерным проблемам ЭМС на объектах электроэнергетики. Отмечено, что рассмотрение вопроса об ограничении индуктированных перенапряжений при ударах молнии тесно связано с проектированием конфигурации трасс вторичных КЛ. Причем оценка данного вида воздействия важна для объектов всех классов напряжения с ОРУ.

Далее речь идет о нормированных параметрах импульса тока молнии, величинах испытательных воздействий и способах ограничения индуктированных перенапряжений.

В главе приведен общий алгоритм расчета перенапряжений. Отмечено, что при столь коротком фронте импульса тока молнии (0,25 мкс) необходимо учитывать связь источника и приемника помех при помощи излучения, а также рассматривать ЗУ объекта как систему с распределенными параметрами. Кроме того, в условиях объекта электроэнергетики программные средства для расчета перенапряжений должны позволять моделировать сложную структуру грунта (вертикальные и горизонтальные неоднородности), а также объемные проводящие тела. В главе описаны различные способы учета экранирования КЛ кабельными сооружениями.

Далее приведен краткий обзор свойств современных программных средств, показано, что они не учитывают или учитывают упрощенно отмеченные свойства объектов электроэнергетики.

В завершении высказаны общие требования к программе расчета перенапряжений при последующих ударах молнии, основные из которых: взаимодействие с инженерными графическими приложениями, простота ввода исходных данных и ограничение по продолжительности расчета.

2. Методика расчета импульсных полевых помех

В данной главе пошагово описан предложенный способ оценки перенапряжений в КЛ вторичных цепей при последующих ударах молнии. Алгоритм основан на последовательном решении двух задач: расчет электромагнитного поля источника помехи (моделирование связи источника и приемника) и расчет переходного процесса в КЛ.

Расчет электромагнитного (ЭМ) поля, наиболее сложная часть задачи, производится с помощью FDTD метода (метод конечных разностей во временной области). В работе последовательно описаны особенности FDTD метода, основой которого является специфическое расположение компонент векторов напряженностей электрического и магнитного поля. Все компоненты сдвинуты относительно друг друга на половину длины ребра элементарного объема (ячейка Yee, рис.1), на которые разбита расчетная область.

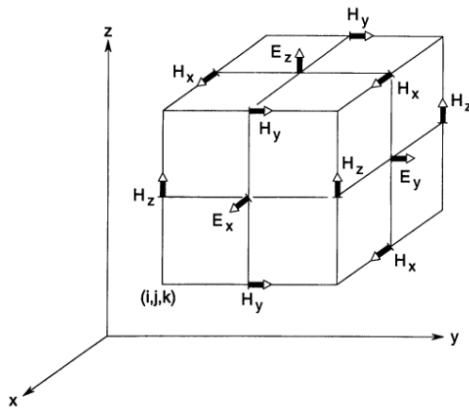


Рис. 1 Ячейка Yee

Такое расположение векторов позволяет дискретизировать систему уравнений Максвелла и перейти к ее явному решению. При этом метод остается устойчивым при выполнении критерия Куранта. В условиях объекта электроэнергетики характерный шаг по пространству, позволяющий описывать

заземляющее устройство, составляет 0,25-0,5 м, что приводит к необходимости использовать шаг расчета по времени равный 0,5-1 нс. Ниже приведено выражение для вычисления величин E_x и H_x :

$$E_x|_{i,j+0,5,k+0,5}^{n+0,5} = C_{ax} E_x|_{i,j+0,5,k+0,5}^{n-0,5} + C_{bx} \left(H_z|_{i,j+1,k+0,5}^n - H_z|_{i,j,k+0,5}^n + H_y|_{i,j+0,5,k}^n - H_y|_{i,j+0,5,k+1}^n \right) \quad (2.1)$$

$$H_x|_{i-0,5,j+1,k+1}^{n+1} = H_x|_{i-0,5,j+1,k+1}^n + D_{bx} \left(E_y|_{i-0,5,j+1,k+1,5}^n - E_y|_{i-0,5,j+1,k+0,5}^n + E_z|_{i-0,5,j+0,5,k+1}^n - E_z|_{i-0,5,j+1,5,k+1}^n \right) \quad (2.2)$$

В данных выражениях верхние индексы определяют момент вычисления величины, например, индекс n означает момент $n \cdot dt$, где n – целое число шагов цикла, а dt – шаг расчета по времени. Нижние индексы определяют точку в пространстве, в которой находится вычисляемая величина, например, индексы i, j, k соответствуют точке пространства с координатами $i \cdot dx, j \cdot dy, k \cdot dz$, где dx, dy, dz – длины ребер ячейки Yee. Как видно, для вычисления величины компонента вектора E или H используются ее значения на предыдущем шаге расчета по времени и значения, окружающих ее на грани компонент вектора другой природы, вычисленные на полшага по времени ранее.

Константы C_a, C_b и D_b характеризуют параметры среды в точках пространства и направлениях, соответствующих вычисляемой в данном выражении величине. Выражения для их расчета в случае кубической ячейки Yee с ребром длиной Δ приведены ниже:

$$C_a = \left(1 - \frac{\sigma \cdot dt}{2\varepsilon}\right) \cdot \left(1 + \frac{\sigma \cdot dt}{2\varepsilon}\right) \quad (2.3)$$

$$C_b = \left(\frac{dt}{\varepsilon\Delta}\right) \cdot \left(1 + \frac{\sigma \cdot dt}{2\varepsilon}\right) \quad (2.4)$$

$$D_b = \frac{dt}{\mu\Delta} \quad (2.5)$$

Метод позволяет гибко моделировать среды при помощи задания параметров μ , ρ и ε в каждой точке пространства, в которой производится вычисление компонент векторов. Таким образом, среда может обладать самым общим распределением параметров, в том числе, анизотропным.

Моделирование тонких проводников, выполняется путем обнуления компоненты напряженности электрического поля вдоль трассы таких коммуникаций и изменения параметров среды вокруг нее. На рис. 2 показаны компоненты векторов при вычислении которых используются искусственно измененные параметры среды при различных соотношениях шага сетки Δ и эквивалентного радиуса проводника a .

Особое внимание уделено моделированию «открытой» границы (границы, которая не создает отраженных волн). При всех методах моделирования, величина отражения от границы составляет сотые доли процента, что приводит к появлению увеличивающей уровень перенапряжений погрешности (создается запас). В данной работе при моделировании границы используются условия Мура 1-го порядка.

Результатом расчета ЭМ поля является величина напряженности электрического поля, приложенная к участку КЛ, которая моделируется в задаче расчета переходного процесса источником ЭДС, включенным в рассечку. Величина напряженности E перед передачей в задачу расчета переходного процесса обрабатывается, т.к. шаги расчета по пространству и скорости распространения воздействий в задачах расчета поля и переходного процесса различны. Расчет переходного процесса производится при помощи

метода бегущих волн с учетом затухания воздействия. Каждый источник ЭДС создает две волны: прямую и обратную (рис. 3), распространяющиеся в различных направлениях вдоль КЛ.

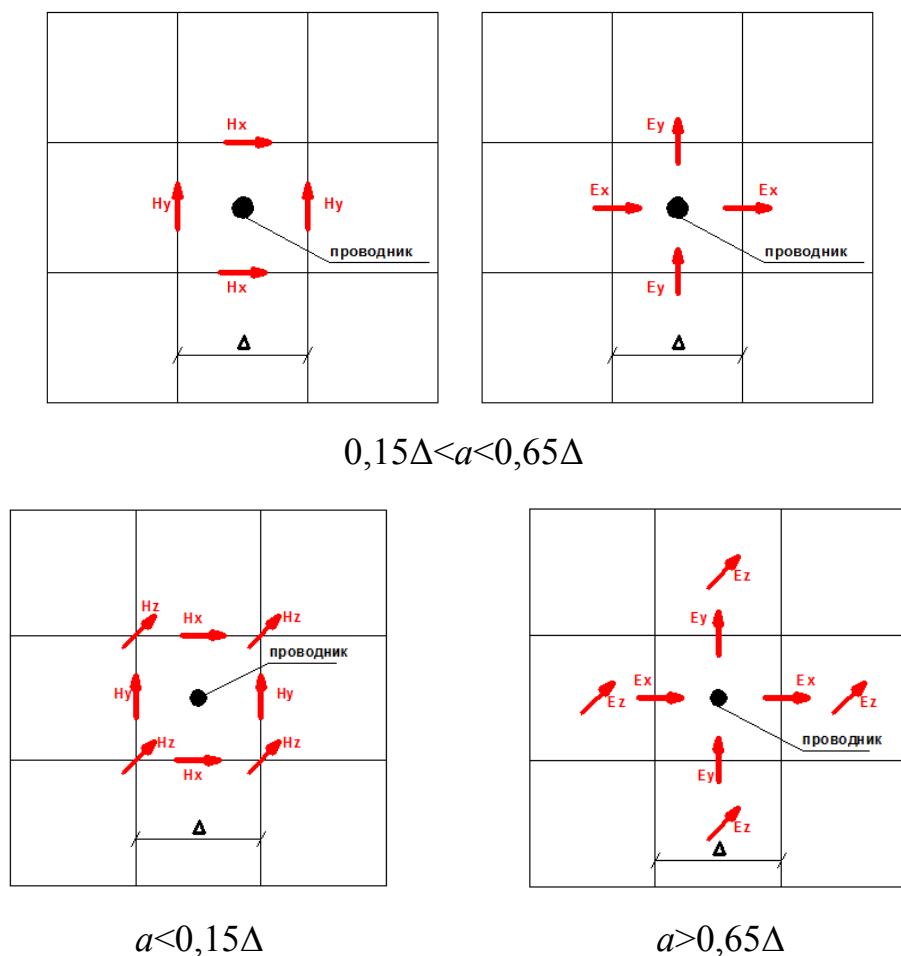


Рис. 2. Изменение параметров среды вокруг проводников

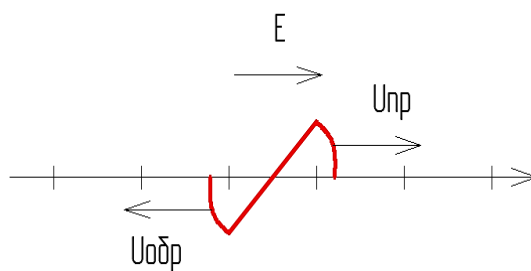


Рис. 3. Воздействия внешней напряженности электрического поля на КЛ

Выражения для вычисления величины прямой и обратной волн в точке i и момент времени t приведены ниже:

$$\begin{aligned}
 U_{\text{пр}}(i, t) &= E \cdot dl \cdot 0,5 + U_{\text{пр}}(i - 1, t - 1) \cdot e^{-\alpha dl} \\
 U_{\text{обр}}(i, t) &= -E \cdot dl \cdot 0,5 + U_{\text{обр}}(i + 1, t - 1) \cdot e^{-\alpha dl} \quad (2.6)
 \end{aligned}$$

где α – коэффициент затухания, dl – длина участка КЛ в задаче расчета переходного процесса (шаг расчета по пространству), E – суммарная напряженность, воздействующая на участок КЛ в момент вычисления, которая получена методом интерполяции во времени из полевой задачи.

Кроме того, отмечено, что при данном способе расчета ЭМ поля возможно измерять токи (вычисление циркуляции вектора H) и напряжения (интегрирование E по пространству от точки вычисления до зоны нулевого потенциала) в схеме ЗУ. Такое свойство можно использовать при расчете ЗУ при воздействии импульсов тока с фронтом менее или близким к 1 мкс и ВЧ сигналов. Подобные задачи также встречаются при решении проблем ЭМС (величины помех, вызванных протеканием ВЧ составляющей тока короткого замыкания, должны быть оценены на стадии проектирования объекта согласно СТО ОАО «ФСК ЕЭС»), а также при обеспечении грозозащиты и расчете электроустановок специального назначения.

В завершении главы описаны основные моменты программной реализации предложенного способа расчета перенапряжений. Также произведен расчет нескольких простейших схем, на примере которых показано, что расчет распространения электромагнитного поля производится корректно.

3. Расчет индуктированных при последующих ударах молнии перенапряжений в КЛ вторичных цепей для мостовой схемы ОРУ 110 кВ

В главе описаны результаты расчетов перенапряжений во вторичных цепях ОРУ 110 кВ, выполненного по схеме мост, при последующих ударах молнии. Данная схема является наиболее часто используемой в энергосистеме для РУ 110 кВ. Расчеты производятся при помощи программного комплекса, алгоритм которого приведен в главе 2. Конструкция ОРУ – типовая. При расчете принято, что КЛ экранированы и проложены в наземном ж/б кабельном лотке. Рассматривались стандартные 4 трассы КЛ и удар молнии в порталый молниеотвод (рис.4). Также был произведен расчет с варьированием размеров расчетной области.

Установлено, что:

1. Перенапряжения, в КЛ превышают максимальные испытательные. Причем в случае близко расположенных к стойкам с молниеотводом КЛ испытательное напряжение превышено в 2,8 раза.
2. Столь жесткая электромагнитная обстановка требует принятия дополнительных технических мероприятий по экранированию КЛ. В качестве мер экранирования возможно применять прокладку в стальных, гальванически цельно связанных, коробах или трубах, что является плохим решением с технологической точки зрения.
3. Оптимальным вариантом может стать использование отдельно стоящих молниеотводов, которые также могут быть применены также и для освещения ПС. В этом случае площадь территории, занятой ОРУ возрастет, однако одновременно будет решена и проблема перенапряжений, вызванных подъемом потенциала ЗУ.
4. Так как рассмотренные параметры грунта были довольно благоприятными (чем ниже удельное сопротивление грунта, тем ниже уровень перенапряжений), то можно сказать, что условия ЭМС нарушаются на многих объектах энергосистемы, особенно в случае установки микропроцессорных устройств РЗА на старых ПС при техническом перевооружении. Отметим, что на большинстве ПС верхний слой грунта, в котором лежит горизонтальный заземлитель, обладает большим удельным сопротивлением, что связано с выполнением строительной подготовки перед установкой основного оборудования. Строительная подготовка выполняется из песка и имеет удельное сопротивление порядка 1-3 кОм·м.
5. Учитывая распространенность данной схемы можно говорить о том, что защита от воздействия с данными параметрами потребует значительных капиталовложений. Кроме того, изменение конфигурации системы молниезащиты или типа кабельной канализации в условиях работы энергообъекта маловероятны. Таким образом, экономически целесообразно

изменить политику технического регулирования в данной сфере, изменив нормируемые параметры воздействия для малых по размеру электроустановок в сторону снижения амплитуды и увеличения фронта.

6. Уменьшение размеров расчетной области на четверть привело к увеличению амплитуды напряжения на КЛ №1 на 7,1% (рис. 6). Это объясняется увеличением влияния погрешности, связанной с отражением от границы. Тем не менее, изменение мало, кроме того, приводит к росту вычисляемой амплитуды, то есть не может вызвать принятие технически необоснованного решения о достаточности применяемых средств защиты.

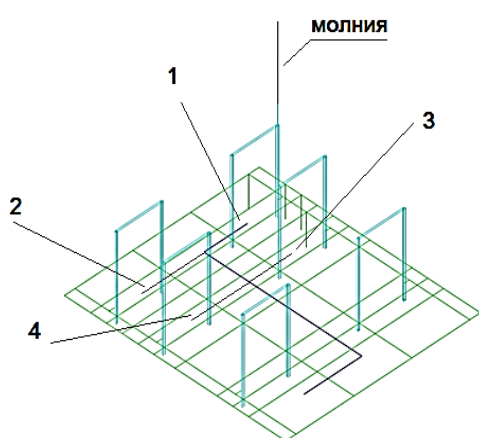


Рис.4 Расчетная схема

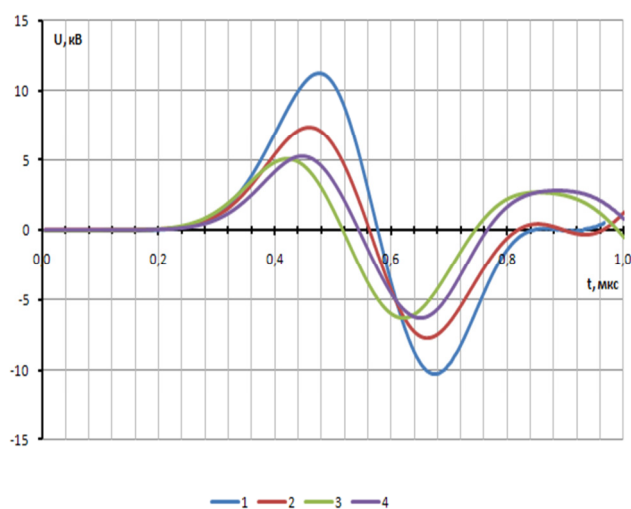


Рис. 5. Зависимости напряжения на конце КЛ со стороны ОПУ от времени для разных кабельных трас

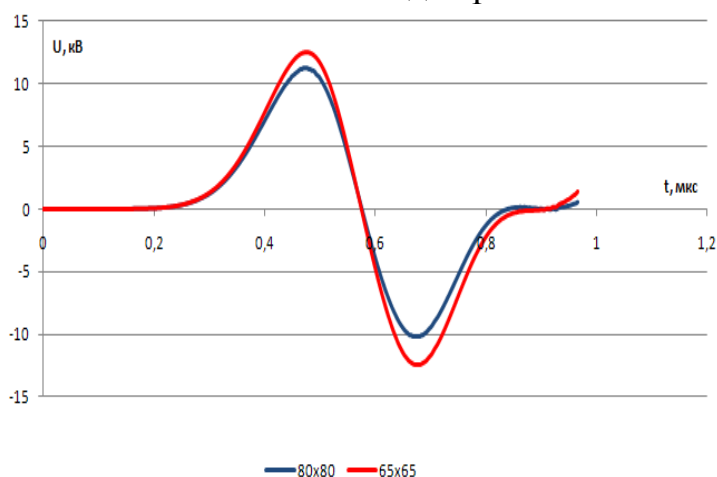


Рис. 6 Зависимости напряжения на конце КЛ со стороны ОПУ от времени при различных размерах расчетной области (65x65 м и 80x80 м)

4. Оценка влияния горизонтальных заземлителей, проложенных вдоль трассы КЛ вторичных цепей, на уровень индуцированных перенапряжений при последующих ударах молнии

В данной главе произведен анализ влияния конфигурации горизонтального заземлителя на уровень перенапряжений во вторичных цепях при последующих ударах молнии. В том числе рассмотрено и влияние на уровень перенапряжений дополнительных, прокладываемых на малой глубине вдоль кабельных трасс, «экранирующих» заземлителей. Данное техническое мероприятие в настоящий момент применяют некоторые проектные организации, в том числе и как альтернативу кабельному экрану.

В расчетной области были размещены КЛ и молниеотвод, расстояние между которыми оставалось всегда неизменным, а также ЗУ, конфигурация которого изменялась. Во всех случаях молниеотвод имел обособленное, в трактовке главы 4.2 7-го издания ПУЭ, заземление. Был произведен расчет максимальной величины напряженности электрического поля вдоль трассы КЛ. Данная величина коррелирует с уровнем перенапряжений, а с другой стороны такой подход позволил не учитывать влияние параметров конструкции КЛ. В результате расчетов установлено:

1. Экранирующая способность различных конфигураций ЗУ приблизительно одинакова. По сути это означает, что экранирующие свойства дополнительных заземлителей, которые заземлены в одной или двух точках и проложены под КЛ на малой глубине, не оказывают заметного влияния на уровень перенапряжений.
2. Величина помех определяется соотношением объема проводящего материала «вблизи от КЛ» и проводников ЗУ, обеспечивающих отвод тока молнии в грунт. Чем больше заземленных проводников (при заземлении на удалении от молниеотвода до 30 м) около КЛ по отношению к объему проводящего материала в грунте, тем выше оказался уровень помех. Таким образом, проводники заземляющего устройства являются источником помех. Для объяснения данного результата был произведен дополнительный расчет,

в котором по закону полного тока была выполнена оценка тока в ближайших к молниеотводу заземлителях. Суммируя мгновенные значения токов в заземлителях, можно сделать вывод, что, несмотря на «обособленное» заземление молниеотвода, до 50-70% тока молнии попадает в ЗУ, так как его проводимость гораздо выше, чем у окружающего грунта. Точную оценку выполнить затруднительно, так как речь идет об измерении токов в разных точках пространства, а ток от молниеотвода растекается во многих направлениях, т.е. «втекает» в проводники горизонтального заземлителя во многих точках. Однако столь большая доля тока в заземляющем устройстве определяет качественную картину развития процесса.

В случае присоединения молниеотвода к ЗУ напряженность электрического поля вблизи от КЛ при удельном сопротивлении грунта превышающем 500 Ом·м оказывается значительно более высокой (в 2 раза большей). Для выполнения условий ЭМС следует избегать присоединения молниеотводов к ЗУ. Таким образом, при расчете перенапряжений во вторичных КЛ при последующих ударах молнии, в случае, если КЛ располагается в непосредственной близости от молниеотвода, необходимо учитывать процессы распространения тока молнии по заземляющему устройству.

5. Оценка перенапряжений, связанных с подъемом потенциала заземляющего устройства при импульсных воздействиях, расчет зависимости сопротивления ЗУ от времени при подаче импульсов тока с малым фронтом

Современные программные средства по расчету ЗУ не позволяют учитывать конечную скорость распространения ЭМ поля в грунте, что важно при воздействиях с короткими фронтами (ВЧ перенапряжения в КРУЭ и ОРУ), а также моделировать сложную структуру грунта. Применение FDTD метода позволяет учесть данные обстоятельства и более точно моделировать объекты электроэнергетики. В данной главе произведен показательный расчет зависимости сопротивления лучевого заземлителя опоры ВЛ от времени.

Варьировалось удельное электрическое сопротивление верхнего слоя грунта. При этом величина стационарного сопротивления ЗУ (сопротивление за фронтом импульса) увеличилась (рис. 7), что соответствует теоретическим представлениям.

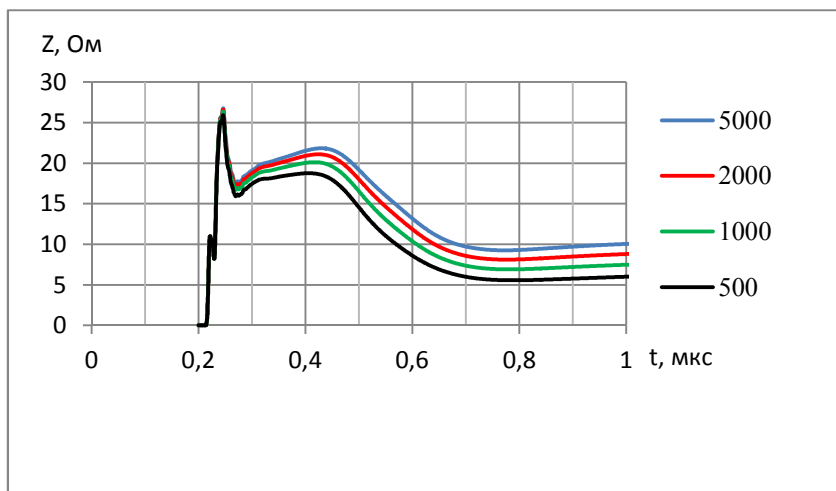


Рис. 7. Зависимость сопротивления ЗУ от времени при варьировании удельного сопротивления верхнего слоя грунта

При увеличении диэлектрической проницаемости верхнего слоя грунта, стационарное сопротивление не изменялось, однако сопротивление в первые моменты времени после подачи воздействия снизилось (рис. 8). Таким образом, величина диэлектрической проницаемости должна учитываться при расчете заземляющих устройств, однако в большинстве современных программ данная величина не вводится в качестве исходных данных.

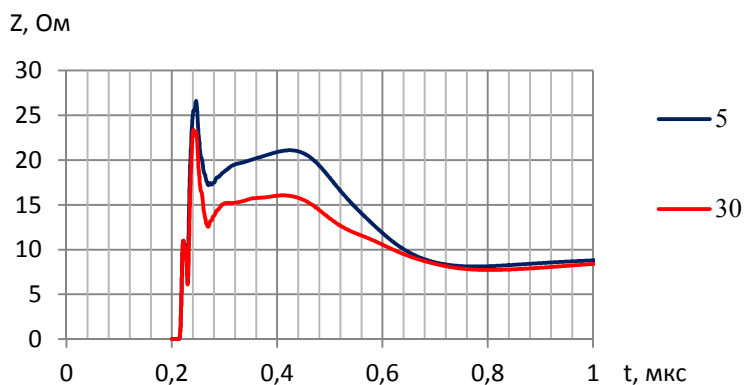


Рис. 8. Зависимость сопротивления ЗУ от времени при варьировании диэлектрической проницаемости верхнего слоя грунта

6. Проблемы и перспективы развития исследований перенапряжений в КЛ вторичных цепей, индуцированных при ударах молнии

В главе обозначены проблемы развития способов оценки индуцированных перенапряжений при последующих ударах молнии, основные из них: отсутствие данных о реальных уровнях воздействия, сложность организации экспериментальных исследований на действующих объектах.

7. Заключение

В заключении перечислены основные результаты по каждой из глав, основным из которых является разработка способа оценки индуцированных перенапряжений в кабельных линиях (КЛ) вторичных цепей при последующих ударах молнии на основе прямого решения уравнений Максвелла, что выполнено впервые. Указанный способ позволил более детально моделировать сложную структуру объекта электроэнергетики и производить расчет ЗУ при подачи высокочастотных и импульсных, с коротким фронтом, воздействий.

Список основных публикаций по теме диссертации

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Титков В.В., Косоруков А.В. Оценка влияния конфигурации заземляющего устройства на уровень помех во вторичных цепях при последующих разрядах молнии//Научно-технический журнал «Электро» №6, 2012. С.41-45.
2. Косоруков А.В. Титков В.В. Расчет перенапряжений в кабельных линиях вторичных цепей при последующих ударах молнии// Научно-технические ведомости СПбГПУ №4(159), 2012. С.73-76.

В сборнике докладов конференции:

3. Гуменова Н.И., Ефимов Б.В., Косоруков А.В., Селиванов В.Н. Расчетная оценка влияния локальных импульсных сопротивлений основного и защитного оборудования на надежность грозозащиты подстанций./ Сборник докладов десятой российской научно-технической конференции по электромагнитной совместимости технических средств и электромагнитной безопасности ЭМС – 2008: Санкт-Петербург, 2008, с. 67-69.
4. Косоруков А.В. Титков В.В. Применение FDTD метода при оценке влияния конфигурации заземляющего устройства на перенапряжения во вторичных цепях при последующих ударах молнии/ Сборник докладов третьей российской конференции по молниезащите: Санкт-Петербург, 2012, с. 181-190.

В иных научно-технических изданиях

5. Гуменова Н.И., Ефимов Б.В., Косоруков А.В. Анализ рекомендаций по выбору комплекса грозозащитных мероприятий с учетом реальных характеристик энергосистемы./ Сборник научных трудов. Моделирование переходных процессов и установившихся режимов высоковольтной сети. - Апатиты: Изд. Кольского научного центра РАН, 2008, с. 87-95.
6. Косоруков А.В., Гуменова Н.И. Влияние локальных импульсных сопротивлений основного и защитного оборудования на надежность

грозозащиты подстанций./ XXXVI неделя науки СПбГПУ. – СПб: Изд. Политехнического университета, 2008, с. 4-5.

7. Косоруков А.В. Анализ влияния импульсного сопротивления заземления опор ВЛ и аппаратов ПС на грозозащищенность оборудования./ Сборник научных трудов. Моделирование переходных процессов и установившихся режимов высоковольтной сети. - Апатиты: Изд. Кольского научного центра РАН, 2009, с. 71-77

Общий объем работ по теме диссертации – 40 печатных страниц, из которых соискателю принадлежит 31 страница.