

На правах рукописи

Шишигин Дмитрий Сергеевич



**МЕТОДЫ ТЕОРИИ ЗАЗЕМЛИТЕЛЕЙ
ДЛЯ АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ
И МОЛНИЕЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОДСТАНЦИЙ**

Специальность: 05.09.05 – Теоретическая электротехника

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» на кафедре «Теоретическая электротехника и электромеханика»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Коровкин Николай Владимирович

Официальные оппоненты: **Ким Константин Константинович**
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Теоретические основы
электротехники» Федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения высшего
образования «Петербургский государственный
университет путей сообщения Императора Александра I»

Кузнецов Дмитрий Владимирович
кандидат технических наук,
генеральный директор общества с ограниченной
ответственностью «Импульспроект», Санкт-Петербург

Ведущая организация: Центр физико-технических проблем энергетики Севера
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Кольского научного центра
Российской академии наук, г. Апатиты

Защита состоится 19 декабря 2017 г. в ___ часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.16 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, Главный учебный корпус, ауд. 284.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «СПбПУ» www.spbstu.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2017 г

Ученый секретарь

Диссертационного совета Д 212.229.16,

к.т.н., доцент



Журавлева Наталия Михайловна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований и степень ее разработанности. При проектировании электрических подстанций (ПС) ставится комплекс задач электромагнитной совместимости (ЭМС) и молниезащиты от прямого удара молнии и набегающих с воздушных линий (ВЛ) волн грозовых перенапряжений. С внедрением микропроцессорных систем управления ПС актуальность этих задач возросла.

Удар молнии в молниеотвод ПС приводит к растеканию тока, который создает импульсное магнитное поле, опасное для микропроцессорной аппаратуры. Сеточные экраны, включающие арматуру, металлические панели и другие металлоконструкции здания, существенно ослабляют магнитное поле. Теория сеточных экранов изложена в работах Д.Н. Шапиро и многих других. Стандарт МЭК 62305-4, который приобрел статус государственного стандарта, дает простое инженерное решение, но не учитывает многие важные параметры. Результаты его анализа актуальны для проектировщиков.

Численные расчеты сеточных экранов наиболее часто проводятся методами теории антенн, но, разработанные для мегагерцового диапазона частот, они избыточны и не учитывают специфику задач молниезащиты. Расчеты обычно проводятся для идеальной земли, хотя заземлитель и способ подключения к заземлителю оказывают существенное влияние на распределение тока и напряженность магнитного поля экрана при прямом ударе молнии. Повышение адекватности расчетов и поиск новых принципов для снижения напряженности импульсных магнитных полей сеточных экранов, связанных с заземлителем, – актуальная задача.

Растекание тока молнии на ПС вызывает в контрольных кабелях кондуктивные помехи, опасные для кабеля и микропроцессорной аппаратуры. Помеха общего типа (напряжение между жилой и экраном) на выходе кабеля с двусторонним заземлением экрана определяется током экрана, как показано в работах Э.Ф. Вэнса. Сильное влияние на ток экрана оказывают не только кондуктивные, но и магнитные связи кабеля с заземлителем и проводниками в воздухе, которые обычно не учитываются. Повышение адекватности расчета кондуктивных помех – актуальная задача.

При ударе молнии в грозозащитный трос, опору ВЛ (с перекрытием изоляции) или прорыве молнии на провода возникают волны перенапряжения, представляющие опасность для изоляции электрооборудования ПС. Исследования этой проблемы находим в работах Д.В. Разевига, Н.И. Гумеровой, Б.В. Ефимова, Ф.Х. Халилова и др. Для расчетов обычно используется теория длинных линий, однако она не позволяет моделировать волновые процессы в проводах совместно с переходными процессами в заземлителях.

Электромагнитные процессы в проводниках, расположенных в воздухе и земле, неразрывны и должны моделироваться совместно, однако сейчас их связи исключаются или предельно упрощаются. Необходимость использования единой расчетной модели проводников ПС и ВЛ в земле и воздухе не вызывает сомнений. Принципиальным вопросом является выбор математических моделей и методов решения. Цепные модели и теория длинных линий, которые предоставляет программа EMTP, непригодны для данной задачи. Электромагнитные модели и конечно-разностные методы с программой FDTD, которые все чаще выбирают исследователи, для сложной 3D системы тонких проводников ВЛ и ПС слишком трудоемки.

Гипотеза диссертационной работы. Математические модели и методы теории заземлителей, разработанные для килогерцового диапазона частот, являются наиболее эффективным подходом к моделированию переходных (волновых) процессов в воздухе совместно с процессами растекания тока в земле при ударах молнии.

Значительный вклад в развитие теории заземлителей внесли В.В. Бургсдорф, Е.С. Колечицкий, А.Б. Ослон, А.И. Якобс, Р.К. Борисов, Н.В. Коровкин, Ю.В. Целебровский, С.Л. Шишигин и многие иностранные ученые, из которых выделим Ф.Р. Dawalibi. Современная теория заземлителей, включающая многозвенную цепно-полевую модель тонкого проводника с учетом взаимных RLC связей и совместное применение методов теории электрических цепей и электромагнитного поля, в целом отвечает задачам диссертационной работы. Развития требуют методы расчета переходных процессов для моделирования волновых процессов с использованием многозвенных цепных схем (вместо длинных линий). В задачах ЭМС помимо стержней необходимо моделировать тонкие пластины.

Возможностей российских компьютерных программ: ОПУ-Проект и EMI analyzer (elsafety.ru), Контур (ezop.ru), ElectricCS-Storm (csoft.ru) и даже мировых лидеров – комплекса программ фирмы SES (sestech.com) и программы EMTP недостаточно для решения задач диссертационной работы. Ставится задача разработки многофункциональной программы с комплексом из трех методов расчета переходных процессов (вместо одного в перечисленных программах), отличающейся быстродействием и интегрированной с САПР. Технологии интеграции программы с САПР находим в работах Н.Н. Полещука. Примеры САД-приложений находим на сайтах csoft.ru, nanocad.ru. Резервы существенного повышения быстродействия показаны в работах Б.Я. Штейнберга, а также достигаются использованием математических библиотек *Intel MKL* и *Alglib*.

Целью работы является расчет переходных (волновых) процессов в проводниках ПС и ВЛ, расположенных в воздухе и земле, а также электромагнитных помех при ударах молнии на основе моделей и методов теории заземлителей в перечисленных задачах ЭМС и молниезащиты ПС.

Для достижения поставленной цели задачи исследования включали:

1. Исследование и развитие численных методов расчета переходных (волновых) процессов в цепных схемах.
2. Разработку компьютерной программы для решения задач диссертационной работы, подтверждающего гипотезу исследования, а также для проведения комплекса расчетов молниезащиты, заземления, ЭМС, предусмотренного стандартами ФСК ЕЭС при проектировании ПС.
3. Расчет сеточных экранов при прямом и близком ударе молнии, включая анализ стандарта МЭК 62305-4 и поиск новых способов снижения напряженности.
4. Расчет кондуктивных помех в контрольных кабелях по действующим методикам и в сеточной 3D модели кабеля, а также анализ способов снижения кондуктивных помех.
5. Моделирование набегающих волн грозовых перенапряжений на ПС при перекрытии изоляции опоры ВЛ, анализ расстановки ограничителей перенапряжений (ОПН) на перенапряжение электрооборудования ПС.

Научная новизна представленной работы заключается в следующем:

1. Расчет переходных (волновых) процессов в проводниках, расположенных в воздухе, выполнен совместно с процессами растекания тока в земле на основе теории заземлителей.
2. Предложена искусственная периодизация импульсной функции без постоянной составляющей, позволяющая расширить область применения частотного метода.
3. Аналитически и численно исследованы условия возникновения осцилляций при расчете переходных процессов по формуле трапеций и предложены способы их устранения.
4. Показано преимущество метода Влаха (практически не используемого в настоящее время) в сравнении с методом дискретных схем и частотным методом в задачах диссертационной работы.
5. Конструкция заземлителя использована для снижения напряженности магнитного поля сеточного экрана при прямом ударе молнии.
6. Установлен эффект запаздывания напряженности магнитного поля сеточного экрана относительно тока молнии, объясняющий погрешности расчетов в частотной области на эквивалентной частоте.

Теоретическая значимость. Показано, что математические модели и методы теории заземлителей являются перспективной методической основой, развитие которых позволяет проводить расчеты электромагнитных процессов и полей в произвольных системах тонких проводников и пластин, расположенных в земле и воздухе, во временной и частотной области (в диапазоне до единиц МГц). Поставлен вопрос о корректности спектра импульса тока молнии с постоянной составляющей. Наличие постоянной составляющей в спектре не соответствует физическим представлениям о природе молнии, как кратковременном, редко повторяющемся (в данном месте) явлении природы. В качестве альтернативы предложена искусственная периодизация импульса без постоянной составляющей.

Практическая значимость. Разработана компьютерная программа для расчета молниезащиты, заземления, ЭМС, отличающаяся функциональностью, быстродействием, интеграцией с САПР, с опытом внедрения в практику проектирования. Установлены недостатки и ограничения стандарта МЭК 62305-4. Результаты расчетов могут быть использованы для совершенствования российских и международных нормативов по ЭМС.

Методология и методы исследования. Основу методологии работы составляют положения теоретической электротехники, теории заземлителей, вычислительной математики, теории программирования. Использованы численные методы расчета электромагнитных процессов и полей. Проводилось компьютерное моделирование с использованием разработанной автором программы.

Основные результаты, выносимые на защиту:

1. Периодизация импульсной функции без постоянной составляющей.
2. Условия возникновения осцилляций в формуле трапеций и способы их устранения.
3. Исследование и применение метода Влаха.
4. Способы снижения магнитного поля сеточного экрана за счет тока заземлителя.
5. Результаты моделирования импульсных магнитных полей сеточных экранов, кондуктивных помех в контрольных кабелях, волн грозовых перенапряжений на ПС.

Достоверность результатов обеспечивается: применением стандартных численных методов электротехники и вычислительной математики; решением модельных задач, расчетом переходных процессов тремя методами, сравнением с экспериментальными и численными результатами других авторов.

Апробация результатов. Основные положения диссертационной работы докладывались (автором лично) и обсуждались на международных и российских конференциях в том числе: EMC 2015 (Dresden, Germany), IEEE EEEIC 2017 (Milan, Italy), 4 и 5 Росс. конференциях по молниезащите (Санкт-Петербург 2014, 2016 гг), Межд. конференции «Ком-

пьютерное моделирование» (Санкт-Петербург 2013 г), Межд. конференции «Разработка ПО, SECR-2013» (Москва), XII Всеросс. совещании по проблемам управления (Москва 2014), 2 и 3 Всеросс. НТК «Техно – ЭМС» (Москва 2015, 2016 гг), 9 Всеросс. форуме студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и инновации в технических университетах» (Санкт-Петербург 2015 г), 7 и 8 Межд. НТК «ИНФОС» (Вологда 2013, 2015 гг), Всеросс. НТК «Вузовская наука региону» (Вологда 2014 г), Межд. конференции студентов и аспирантов «Молодые исследователи – региону» (Вологда 2011-2014 гг), Научной сессии студентов и аспирантов (Вологда, 2012-2014 г), Всеросс. конкурсе компьютерных программ (Вологда 2011), а также научных семинарах кафедры ТЭЭ СПбПУ Петра Великого, 23 Государственного морского проектного института, ООО «Стример».

Публикации. Основные научные и практические результаты диссертационной работы опубликованы в 30 печатных работах, в том числе 6 в изданиях, рекомендованных ВАК, 4 в изданиях, входящих в Scopus, и одном Свидетельстве о регистрации компьютерной программы.

Внедрение результатов. Результаты диссертационной работы внедрены в практику проектирования ОАО «Ленгидропроект», ООО «Гипрошахт», ООО «ЭМС-проект», ООО «Квадрозлектро» (все Санкт-Петербург), ООО «Интер Энерго» г. Москва. Диссертационная работа поддержана грантами: №11435р/17212 (конкурс УМНИК 2013 г.), №12520р/23918 (конкурс СТАРТ-1 2014 г.), №1381ГС2/23918 (конкурс СТАРТ-2 2015 г.) Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 123 наименования, и 3 приложений. Общий объем работы – 137 страниц, число рисунков – 65, число таблиц – 10.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе дан обзор современной теории заземлителей, показаны возможности существующих компьютерных программ.

Во второй главе выполнено исследование основных численных методов расчета переходных процессов при импульсных воздействиях.

Частотный метод. При использовании быстрого преобразования Фурье предполагается, что импульсная функция $f(t)$, заданная на интервале T , повторяется периодически. Проблема в том, что спектр импульса тока молнии затухает медленно, что потребует множества гармоник (сотен и тысяч) при расчете.

Для улучшения спектра П.Н. Матхановым предложено продолжить импульс до $2T$

$$f_2(t) = \begin{cases} f(t), & 0 \leq t \leq T, \\ f(T) - f(t-T), & T < t \leq 2T. \end{cases}$$

Однако этот способ не подходит для расчета волновых процессов и электромагнитного экранирования в цепных моделях из-за наличия постоянной составляющей. Действительно, при частоте $f=0$ цепная модель чисто активная и переходных процессов не наблюдается. Электромагнитное экранирование вызывают вихревые токи, но при частоте $f=0$ они не создаются.

В диссертационной работе предложена периодизация импульсной функции $f(t)$ с периодом $4T$ (рисунок 1)

$$f_4(t) = \begin{cases} f_2(t), & 0 \leq t \leq 2T, \\ f_2(2T) - f_2(t-2T), & 2T < t \leq 4T, \end{cases}$$

где нет постоянной составляющей, основная гармоника доминирует, нет четных гармоник, высшие гармоники быстро затухают. Число отсчетов требуется на порядок меньше, чем без периодизации исходной функции $f(t)$.

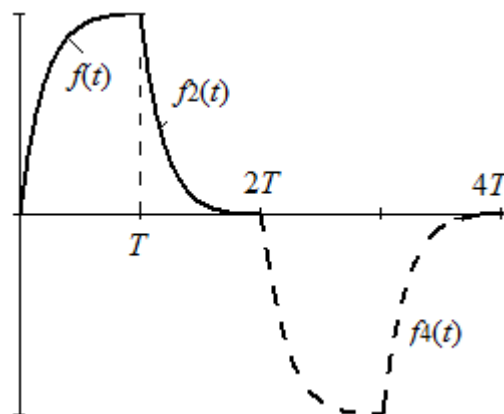


Рисунок 1 – Импульсная функция $f(t)$ и ее продолжение: $f_2(t)$ с периодом $2T$, $f_4(t)$ с периодом $4T$

Метод дискретных схем (МДС). Шаговые алгоритмы интегрирования дифференциальных уравнений для индуктивности и емкости по формуле трапеций сводятся к расчету дискретных резистивных схем (рисунок 2).

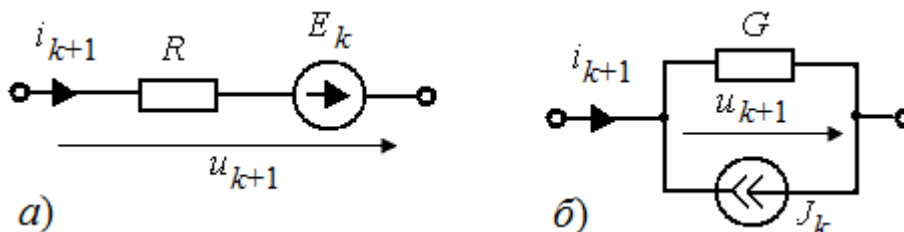


Рисунок 2 – Дискретные схемы замещения индуктивности (а) и емкости (б) на k -м шаге

Проблема в том, что формула трапеций приводит к осцилляциям при решении жестких задач, что показано аналитически. Напряжение на индуктивности осциллирующее независимо от шага интегрирования при импульсе тока с линейным фронтом или биэкспоненциальной формы. Линейная комбинация формулы трапеций с неявной формулой Эйлера с весами 0.85/0.15, предлагаемая в работах F.L.Alvarado и руководстве к программе ЕМТР, ослабляет, но не устраняет осцилляции. Корректного применения формулы трапеций для расчета напряжения индуктивности удалось добиться при описании тока

гладкой функцией Хейдлера и малом шаге, исключая заметные перегибы функции в узлах. Гладкость функции для описания тока индуктивности и напряжения на емкости, малый шаг интегрирования – необходимые условия применения формулы трапеций. В задачах диссертационной работы эти условия не гарантируются. Например, при ударе молнии в опору с перекрытием изоляции возникает волна с коротким фронтом, при численных расчетах имеющая линейный фронт с длительностью, равной шагу интегрирования.

Метод Влаха. И. Влах и К. Сингхал получили семейство формул численного обратного преобразования Лапласа. Исследование показало, что максимальную точность дают формулы 26-27 порядка, далее точность снижается из-за арифметических погрешностей операций с числами разного порядка. В шаговых алгоритмах целесообразно использовать формулу 3 порядка с одним вычислением операторной функции на шаге

$$f(t) = \operatorname{Re}((5\sqrt{2}j - 2) \cdot F(s)) / t, \quad s = (2 + \sqrt{2}j) / t, \quad t > 0. \quad (1)$$

Операторное сопротивление катушки sL и проводимость конденсатора sC становятся комплексными величинами (s задано) и моделируются дискретными схемами аналогично МДС (рисунок 2), где $R = sL$, $G = sC$, $E_k = Li_k$, $J_k = Cu_k$, $s = (2 + \sqrt{2}j) / h$, h – длина шага. Операторные изображения источников тока находим с учетом запаздывания на t_k . Проводится расчет операторной (комплексной) схемы на каждом шаге. Переход к оригиналам происходит по (1). Шаговый алгоритм с двумя вычислениями операторной функции на шаге (с формулой Влаха 7 порядка) был признан избыточным. Далее под методом Влаха понимается шаговый алгоритм с формулой (1).

Метод Влаха наиболее эффективен для задач диссертационной работы, поскольку позволяет рассчитывать волновые процессы, когда применение формулы трапеций вызывает осцилляции, что показано как для ВЛ (рисунок 3), так и заземлителей при воздействии импульсов с коротким фронтом. Использование описанных мер устраняет колебания, но увеличивает трудоемкость.

Третья глава посвящена разработке компьютерной программы. Исследованы основные технологии интеграции с САПР – COM, ObjectARX и NET, а также обмен данными в формате dxf. Разработано ObjectARX- приложение для AutoCAD. Интеграция с

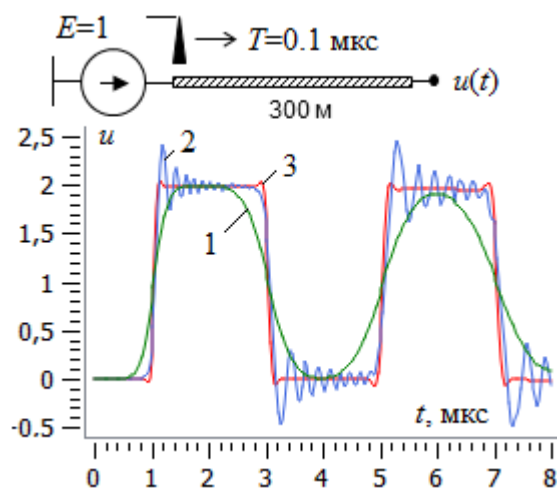


Рисунок 3 – Напряжение в конце линии по: 1- неявной формуле Эйлера, 2- формуле трапеций, 3- методу Влаха

САПР значительно повышает эффективность геометрического моделирования, включающего построение геометрических моделей, визуализацию и анимацию 2D, 3D научной графики. Создана база данных типовых объектов ПС и ВЛ. Сложная геометрическая задача построения зон защиты молниеотводов по всем российским стандартам молниезащиты и стандарту МЭК 62305 решена стандартными средствами AutoCAD.

Исследованы и реализованы методы повышения быстродействия. Алгоритмическая оптимизация кода по пути уменьшения числа обращений к медленной оперативной памяти за счет быстрой кэш памяти (исключение кэш-промахов) увеличивает быстродействие в несколько раз, что показано на примере умножения матриц. Использование математической библиотеки *Intel Math Kernel Library* с низкоуровневой оптимизацией и многопоточностью повышает быстродействие матричных операций в десять и более раз по сравнению с математическим пакетом *AlgLib* с алгоритмической оптимизацией кода.

В дополнение к эффективным численным методам, рассмотренным в Главе 2, эти средства на 1-2 порядка повышают быстродействие по сравнению с российскими аналогами. Расчет системы проводников с 7000 элементами, что достаточно для большинства ПС, при импульсном воздействии (МДС, 40 временных шагов, учет всех *RLC* связей) длится 2 минуты на стандартном компьютере. Высокая производительность программы – необходимое условие решения задач диссертационной работы со сложными геометрическими моделями и эффективной работы проектировщиков.

В четвертой главе решены задачи, подтверждающие гипотезу диссертационного исследования и необходимые для разработки раздела ЭМС проекта ПС.

Напряженность магнитного поля, создаваемого током молнии в зданиях с микропроцессорной аппаратурой, нормируется. Сетка, арматура, металлическая обшивка и металлоконструкции здания играют роль сеточного экрана, ослабляющего внешнее поле. Исследование проведено в частотной и временной области.

При прямом ударе молнии сеточный экран (рисунок 4) играет роль клетки Фарадея, где токи, протекающие по разным сторонам экрана, ослабляют магнитное поле друг друга. Уменьшение шага сетки приводит к практически линейному уменьшению напряженности, что согласуется с данными МЭК 62305-4 (далее МЭК). Увеличение диаметра стержней, замена стальных на медные проводники позволяет снизить напряженность, но не более чем на 30%.

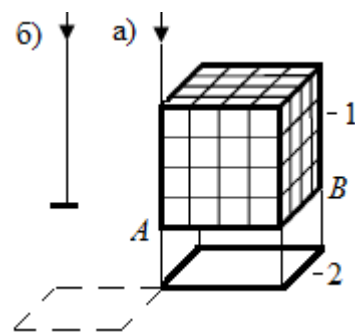


Рисунок 4 – Сеточный экран (1) 10x10x10 м с шагом сетки w , заземлителем (2) при: а) прямом, б) близком ударе молнии. Канал молнии – проводник длиной 100 м согласно МЭК 62305-4

Заземлитель и точки заземления экрана способны существенно изменить распределение тока и напряженности внутри экрана. Пусть удар молнии наиболее вероятен в один из углов экрана (из-за наличия молниеотвода, например). Ток, в основном стекая через точку А (рисунок 4), создает магнитное поле, которое слабо компенсируется токами с противоположной стороны экрана. «Разземление» экрана в точке А приводит к выравниванию тока и снижению напряженности (при незначительном, на 2-5% повышении потенциала экрана). Изменим форму заземлителя (показано пунктиром, рисунок 4). Продольные токи заземлителя теперь протекают встречно токам экрана, что приводит к усилению напряженности вне экрана и уменьшению внутри. Для медного и стального экрана, при вариации шага сетки показано, что напряженность может быть снижена до 7 раз в центре экрана (рисунок 4) и до 1.5 раз на расстоянии шага сетки от стены.

При близком ударе молнии сеточная конструкция здания играет роль электромагнитного экрана, принцип действия которого основан на ослаблении внешнего поля вихревыми токами. В стандарте МЭК коэффициент экранирования $SF=20 \log(8.5/w)$, дБ определяется только шагом сетки w . В диссертационной работе исследована зависимость SF от материала (медь, сталь), диаметра и формы стержней (цилиндр, тонкая пластина), размеров экрана, длины канала молнии в частотной и временной области. Достоверность результатов подтверждена сравнением с результатами экспериментов и расчетами по программе FEKO (Maksimowicz T., Aniserowicz K.) и других исследователей.

С увеличением размера экрана коэффициент SF существенно возрастает (рисунок 5), поэтому формула МЭК применима только для экранов с размерами 15-20 м. Не шаг сетки, как в формуле МЭК, а число контуров с вихревыми токами (величина тока) определяют SF . При переработке стандарта МЭК для расчета SF вместо $1/w$ рекомендуется использовать параметр a/w , где a – линейный размер экрана. Вариант подобной эмпирической формулы предложен в диссертационной работе.

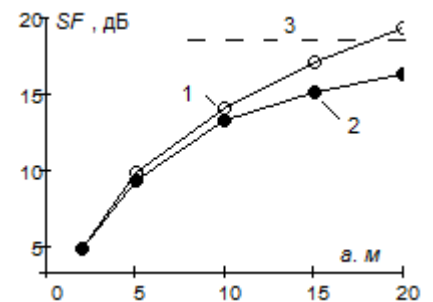


Рисунок 5 – SF сеточного экрана кубической формы со стороной a на частоте 25 кГц: 1 – в центре экрана, 2 – на расстоянии w от поверхности экрана, 3 – МЭК; $w=1$ м

При расчете стальных экранов во временной области установлен и объяснен эффект существенного запаздывания максимума напряженности по сравнению с максимумом тока для первого импульса тока молнии. По этой причине расчеты на эквивалентной частоте тока молнии занижают максимум напряженности на 15-20%. В медных экранах напряженность повторяет форму тока молнии. Коэффициент экранирования двойного

экрана существенно меньше суммы составляющих (в дБ), что объясняется сильным взаимным влиянием токов экранов.

Заземление экрана практически не влияет на величину SF при близком ударе молнии, однако такая задача «в чистом виде» не возникает на ПС. Здесь ток молнии через заземлитель растекается по металлоконструкциям здания, которые играют роль клетки Фарадея и электромагнитного экрана одновременно. Только включение всех проводников, расположенных в земле и воздухе, в единую модель позволяет корректно рассчитать магнитное поле, а выбор заземлителя и точек подключения к заземлителю позволяет снизить напряженность.

Кондуктивная помеха (напряжение между жилой и экраном) на выходе кабеля с двусторонним заземлением (рисунок 6) равна $U_k = Z_t \cdot I$, где Z_t – передаточное сопротивление экран-жила, l – длина кабеля, I – ток экрана. Эта формула допускает упрощенное моделирование ка-

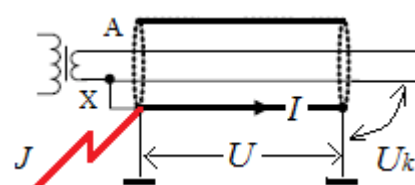


Рисунок 6– Контрольный кабель

беля проводником с диаметром экрана и передаточным сопротивлением, равным омическому сопротивлению экрана $Z_t = R_0$ при первом импульсе тока молнии. Расчет тока экрана требует учета не только кондуктивных, но и магнитных связей всех проводников в земле и воздухе, по которым растекается ток молнии. На модельной задаче показано, что за счет шунтирующего действия параллельных проводников можно снизить ток экрана (кондуктивную помеху) в несколько раз. Расчеты, выполненные с 3D моделью кабеля (рисунок 6), подтвердили обоснованность рассмотренной методики расчета кондуктивных помех. Результаты расчетов согласуются с экспериментальными данными ООО «ЭЗОП».

Грозовые перенапряжения. Удар молнии в опору или грозозащитный трос ВЛ опасен для электрооборудования ПС в случае обратного перекрытия гирлянды изоляторов опоры, когда напряжение на изоляции $U = U_{оп} - U_{пр}$ превышает допустимое, где $U_{оп}$ – напряжение опоры в месте крепления гирлянды изоляторов, $U_{пр}$ – напряжение провода. Заземлитель является основным фактором, определяющим напряжение опоры. Напряжение провода (через магнитные связи) зависит от тока молнии, протекающего по тросу. Использование 3D модели ВЛ и ПС (рисунок 7), включающей заземлители и проводники в воздухе, обеспечивает адекватное определение условий перекрытия изоляции.

При перекрытии изоляции возникает волна перенапряжения с крутым фронтом, которая распространяется по проводам, далее по шинам ПС до силового трансформатора. В результате отражений от трансформатора и вновь от пораженной опоры волновые процессы носят колебательный характер (рисунок 8).

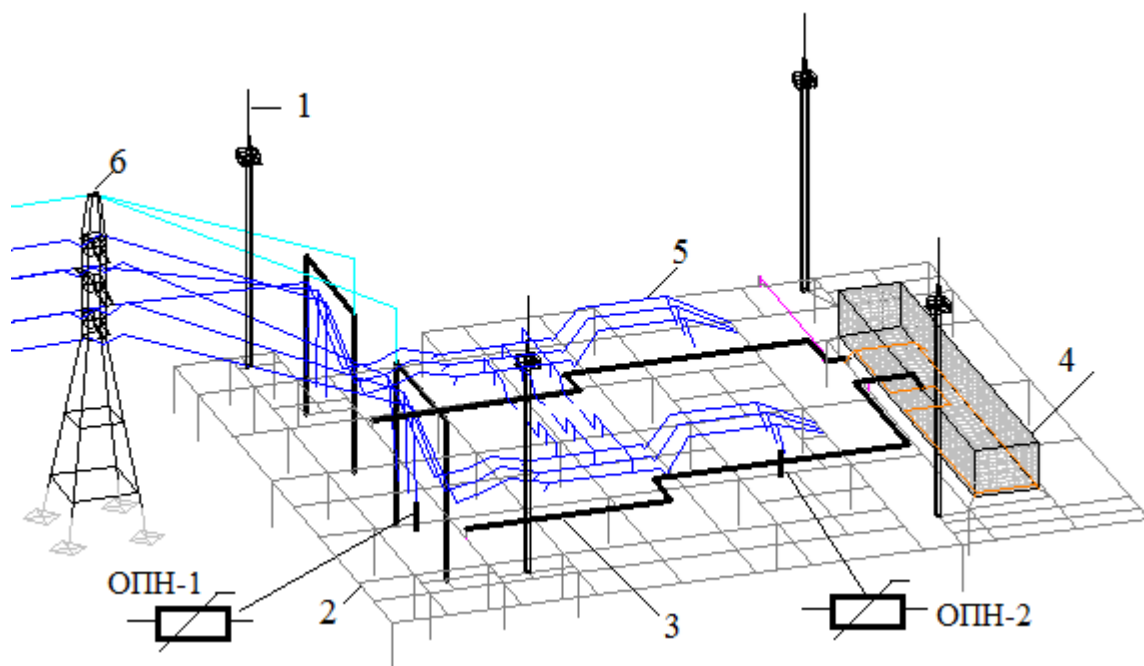


Рисунок 7 – Расчетная модель ПС: 1– молниеотводы, 2– заземлитель, 3– контрольный кабель, 4– общестанционный пункт управления, 5– шины, 6– опоры ВЛ; электрооборудование (не показано) моделируются емкостями согласно РД 153-34.3-35.125-99

Установка ограничителя перенапряжений (ОПН) уменьшает перенапряжения (рисунок 8). Рассмотрены варианты установки ОПН вблизи силового трансформатора и у портала (по отдельности и совместно). Результаты расчетов согласуются с известными данными, что подтверждает возможность применения теории заземлителей в задачах, где она ранее не использовалась.

На модельной задаче показано, что при неизменной длине проводников от ОПН до защищаемого аппарата, перенапряжение существенно возрастает с увеличением длины проводника от шины до ОПН (шлейфа). По этой причине установка ОПН под порталом с длиной шлейфа 10 м (рисунок 7) неэффективна.

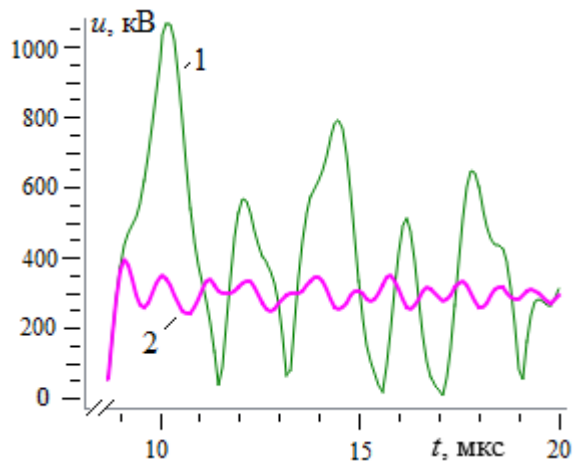


Рисунок 8 – Напряжение на силовом трансформаторе (относительно заземлителя) при первом ударе молнии в опору ВЛ: 1– без ОПН, 2–с ОПН в 10 м от силового трансформатора (включая 3.5 м шлейф ОПН)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Переходные электромагнитные процессы в проводниках в воздухе и земле (через индуктивные и гальванические связи) неразрывны, поэтому должны рассчитываться совместно. Математические модели и методы теории заземлителей являются наиболее

эффективным подходом к решению комплекса задач молниезащиты и ЭМС, что получило подтверждение при решении задач диссертационной работы.

2. Принципиальным вопросом является выбор метода расчета переходных (волновых) процессов в цепных схемах. Метод Влаха, практически не используемый в настоящее время, обладает преимуществом перед частотным методом и МДС в задачах диссертационной работы.

3. Проблема частотного метода в стандартной реализации заключается в медленном затухании высших гармоник в спектре импульса тока молнии, а наличие постоянной составляющей, как представляется, не имеет физического смысла. Предложено искусственное продолжение импульса, исключающее постоянную составляющую, без четных гармоник, с доминированием первой гармоники, что ускоряет вычисления и расширяет область применения частотного метода.

4. Импульсные токи, описываемые негладкими функциями (с линейным фронтом, биэкспонента), протекающие по индуктивности, а также аналогичные функции напряжения на емкости вызывают осцилляции при использовании МДС с формулой трапеций. Переход к гладким функциям (функция Хейдлера), более мелкое дробление элементов ($l < \lambda/50$, где λ – длина волны), уменьшение шага устраняют проблему, но увеличивают трудоемкость. Расчеты по МДС следует контролировать по методу Влаха.

5. Разработана компьютерная программа, способная на современном уровне геометрического моделирования (рисунок 7) и визуализации результатов в AutoCAD, с высоким быстродействием решать комплекс задач молниезащиты, заземления и ЭМС электрических подстанций и аналогичных объектов.

В Приложении А рассчитаны полюса и вычеты формул Влаха. **В Приложении Б** дано описание разработанной программы. **В Приложении В** представлены акты о внедрении результатов диссертационной работы (5 шт.).

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в научных журналах из списка ВАК

1. Шишигин, Д.С. Методы расчета переходных процессов на электрических подстанциях при ударах молнии / Д.С. Шишигин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2017. – №7. – С.324-333.
2. Шишигин, Д.С. Шаговые алгоритмы расчета волновых процессов в задачах грозозащиты электрических подстанций / Д.С. Шишигин, С.Л. Шишигин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2017. – Т. 10. – № 2. – С. 75-84.

3. Шишигин, Д.С. К выбору технологии интеграции прикладного программного обеспечения с САПР / Д.С. Шишигин // Труды СПИИРАН. – 2016. – №4(47). – С.211-224.
4. Шишигин, Д.С. AUTOCAD приложение для расчета молниезащиты и заземления объектов электроэнергетики / Д.С. Шишигин // Автоматизация в промышленности. – 2014. – № 9. – С. 28-32.
5. Шишигин, С.Л. Расчет кондуктивных помех и нагрева экрана контрольного кабеля / С.Л. Шишигин, А.В. Черепанов, Д.С. Шишигин // Электротехника. – 2017. – №10. – С.82-87.
6. Шишигин, С.Л. Расчет зон защиты стержневых молниеотводов методом наведенного заряда / С.Л. Шишигин, В.Е. Мещеряков, Д.С. Шишигин // Электричество. – 2015. – №8. – С. 4-9.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013613343 ZYM / С.Л. Шишигин, Д.С. Шишигин – Зарег. Реестре программ для ЭВМ 02 апреля 2013.

Прочие работы по теме диссертации

8. Shishigin, D.S. Numerical modeling in EMC problems of electric power substations when lightning strikes / D.S. Shishigin, S.L. Shishigin // IEEEIC/I and CPS Europe 2017 – Milan, Italy. – 2017.– P.1-5.
9. Shishigin, D.S. AutoCAD application for LPS, grounding and EMC problems / D.S. Shishigin, S.L. Shishigin, N.V. Korovkin // EMC 2015. – Dresden, Germany. – 2015. – P.834-838.
10. Grounding and shielding in EMC problems of electric power substations / N.V. Korovkin, O.V. Frolov, S.L. Shishigin, D.S. Shishigin, // EMC Europe 2013, Brugge, Belgium. – 2013. – P.863-866.
11. Шишигин, С.Л. Расчет кондуктивных помех и нагрева экрана контрольного кабеля / С.Л. Шишигин, А.В. Черепанов, Д.С. Шишигин // 5 Российская конф. по молниезащите: Сб. мат-лов конф., СПб. – 2016. – С.367-372.
12. Шишигин, Д.С. Моделирование волновых процессов в линиях при ударах молнии / Д.С. Шишигин, С.Л. Шишигин // 5 Российская конф. по молниезащите: Сб. мат-лов конф. – СПб. – 2016. – С.358-362.
13. Шишигин, Д.С. Программное обеспечение для задач молниезащиты, заземления, ЭМС / Д.С. Шишигин // Труды II Всероссийской НТК «Техно-ЭМС 2015». М.: Грифон. – 2015. – С.32-34.

14. Шишигин, Д.С. Исследование шаговых алгоритмов расчета переходных процессов при импульсных воздействиях / Д.С. Шишигин // Наука и инновации в технических университетах: Мат. 9 Всерос. форума студентов, аспирантов и молодых ученых. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та. – 2015. – С.62-63.
15. Шишигин, С.Л. Математические модели и методы в задачах заземления и ЭМС / С.Л. Шишигин, В.Е. Мещеряков, Д.С. Шишигин // 4 Межд. конф. по молниезащите: Сб.мат-лов конф. – СПб. – 2014. – С.128-135.
16. Шишигин, Д.С. Разработка программного обеспечения для расчета молниезащиты, заземления и ЭМС, интегрированного в AutoCAD / Д.С. Шишигин, С.Л. Шишигин // 4 Межд. конф. по молниезащите: Сб.мат-лов конф. – СПб. – 2014. – С.135-141.
17. Шишигин, Д.С. Программные и аппаратные средства ускорения матричных операций / Д.С. Шишигин // Вузовская наука – региону: Мат-лы всерос. науч.техн. конф. Вологда: ВоГУ. – 2014. – С.84-86.
18. Шишигин, Д.С. AUTOCAD приложение для расчета молниезащиты и заземления объектов электроэнергетики. XII Всероссийское совещание по проблемам управления / Д.С. Шишигин // М., Институт проблем управления РАН. – 2014. С.9374-9380.
19. Шишигин, Д.С. Разработка AutoCAD приложения для расчета заземления и молниезащиты электрических подстанций / Д.С. Шишигин // Конференция «Разработка ПО 2013». [Электронный ресурс]. URL: http://2013.secr.ru/2013/files/045_shishigin.pdf
20. Шишигин, Д.С. Программа расчета заземления и молниезащиты электрических подстанций в AutoCAD и ее применение / Д.С. Шишигин // Компьютерное моделирование 2013. Мат. межд. науч.-техн. конф. – СПб: СПбГПУ. – 2013. – С. 290-294.
21. Шишигин, Д.С. Ускорение вычислений в задачах расчета заземлителей. Материалы 7 ежегодной сессии аспирантов и молодых ученых / Д.С. Шишигин // Вологда: ВоГУ.– 2013. – С. 87-90.
22. Шишигин, Д.С. Расчет и визуализация электромагнитных полей электрических подстанций в AutoCAD / Д.С. Шишигин // Молодые исследователи – регионам: материалы всероссийской научной конференции. – Вологда: ВоГТУ, 2012. – Т.1. – С.116-118.
23. Шишигин, Д.С. Современные технологии автоматизированного проектирования в электроэнергетике / Д.С. Шишигин // Материалы V ежегодной научной сессии аспирантов и молодых ученых по отраслям наук: Технические науки. Экономические науки. – Вологда: ВоГТУ, 2011. – С.45-49.