

На правах рукописи

Куклин.

Куклин Дмитрий Владимирович

**Оптимизация заземлителей опор линий электропередачи для повышения
грозоупорности электрических сетей в районах с высоким удельным
сопротивлением грунта**

Специальность 05.14.12 - Техника высоких напряжений

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Апатиты - 2017

Работа выполнена в Центре физико-технических проблем энергетики Севера Федерального государственного бюджетного учреждения науки Кольского научного центра Российской академии наук

Научный **Ефимов Борис Васильевич**

руководитель: доктор технических наук, профессор, директор Центра физико-технических проблем энергетики Севера Федерального государственного бюджетного учреждения науки Кольского научного центра Российской академии наук

Официальные **Фоминич Эдуард Николаевич**

оппоненты: 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», профессор кафедры электроснабжения, электрооборудования и автоматики

Гайворонский Александр Сергеевич

кандидат технических наук, доцент, заместитель директора филиала АО «Научно-технический центр Федеральной Сетевой Компании Единой Энергетической системы» - Сибирский научно-исследовательский институт энергетики.

Ведущая **ОАО «Научно-исследовательский институт по передаче**
организация: электроэнергетики постоянным током высокого напряжения» (ОАО «НИИПТ»)

Защита состоится «22» июня 2018 г. в 16 часов в ауд. 118 на заседании диссертационного совета Д 212.229.11 в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Автореферат разослан «_____» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук,
доцент



Попов М.Г.

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1.1. Актуальность и степень разработанности темы исследования. Одной из основных причин аварийных отключений воздушных линий являются грозовые перенапряжения. Величина перенапряжений, в свою очередь, напрямую зависит от электрических характеристик заземления, одной из функций которого является эффективный отвод тока молнии в землю. Особенно остро проблема заземления проявляется в районах с высоким удельным сопротивлением грунта, величина которого в заметной степени определяет надежность работы электрической сети даже в условиях низкой грозовой активности.

Длины волн токов и напряжений при грозовых воздействиях могут быть сопоставимы с размерами заземлителя. В таких случаях заземлители не являются сосредоточенными вследствие волнового характера процессов в них. Однако в существующих руководящих указаниях по расчету заземляющих устройств на линиях электропередачи и грозозащите электрических сетей используется стационарное сопротивление заземления, а импульсные характеристики учитываются лишь приближенно, преимущественно с точки зрения искрообразования. Иными словами, используемых данных недостаточно для определения наиболее предпочтительных в отношении молниезащиты конструкций заземлителей.

В существующих работах, посвященных исследованию импульсных характеристик заземлителей, приводятся результаты расчетов для заземлителей с разной суммарной длиной проводников, что позволяет оценить эффект от добавления тех или иных проводников, но не дает ответа на вопрос о возможности уменьшения сопротивления только за счет изменения пространственного расположения проводников (но без увеличения их суммарной длины). Недостатком существующих работ является также то, что для расчета или измерения электрических характеристик заземлителей используются токи определенной формы и не исследуется влияние статистического распределения параметров тока молнии.

Таким образом, изучение импульсных характеристик заземлителей с учетом волновых процессов в них, а также исследование зависимости этих характеристик от конструкции заземлителя и параметров грунта являются актуальными задачами. Необходимо выбрать критерий эффективности заземлителя с точки зрения грозоупорности линии, а также определить, какие конструкции заземлителей наиболее эффективны для определенных грунтов (рассматривая различные конструкции заземлителей при фиксированной суммарной длине проводников). Нужны также измерительные средства, необходимые для подтверждения метода расчета. Кроме того, важно определить корректный способ измерений электрических характеристик заземления конкретной установки на частотах грозовых воздействий.

1.2. Цель работы и задачи исследования. Целью работы является теоретическое и экспериментальное исследование импульсных характеристик заземлителей опор линий электропередачи, а также разработка методики выбора конструкций заземлителей, эффективных в микросекундном диапазоне времен, характерном для токов молнии, при различных параметрах однородного и неоднородного грунтов с детальным рассмотрением заземлителей в грунтах с высоким удельным сопротивлением.

Для достижения поставленной цели проведены исследования по следующим направлениям:

1. Анализ существующих математических методов, применяемых для расчета электрических характеристик заземлителей.

2. Выбор метода, учитывающего волновые процессы в заземлителях, расположенных в однородных и неоднородных грунтах, а также экспериментальная проверка выбранного метода.

3. Разработка программного обеспечения, предназначенного для расчета процессов, связанных с распространением электромагнитного поля в объеме, охватывающем заземлители и заземленные объекты.

4. Анализ волновых процессов в заземлителях и опорах линий электропередачи, связанных с высокочастотными составляющими токов молний.

5. Разработка методики, позволяющей сравнивать конструкции заземлителей опор линий электропередачи с учетом их импульсных характеристик путем сопоставления значений вероятности перекрытия изоляции.

6. Разработка рекомендаций по измерениям импульсных сопротивлений заземлителей.

1.3. Основные методы научных исследований. В работе применены экспериментальные и расчетные методы исследования. При расчетах использованы основные положения теории электромагнитного поля, теория вероятностей, вычислительная математика. Расчеты электромагнитных процессов в заземлителях выполнены с помощью метода конечных разностей во временной области (finite difference time domain method — FDTD), для использования которого создано необходимое программное обеспечение. Достоверность результатов расчетов подтверждается экспериментальными данными. Для расчета вероятности перекрытия изоляции при ударе молнии в опору или грозотрос использован метод определения прочности изоляции для нестандартных форм напряжений, а также вероятностные параметры токов молний.

1.4. Научная новизна:

- обоснована методика расчета, позволяющая выбирать эффективные с точки зрения молниезащиты конструкции заземлителей опор линий электропередачи с учетом волновых процессов в опорах и заземлителях, где за меру эффективности заземлителя принимается вероятность перекрытия изоляции при ударе молнии в опору или грозотрос;
- показано, что импульсные характеристики различных конструкций заземлителей могут существенно влиять на вероятность перекрытия изоляции и, соответственно, на уровень грозозащиты линии электропередачи;
- показано, что при расчете значений вероятности перекрытия изоляции необходимо учитывать последующие компоненты разряда молнии, форму тока на фронте, перекрытия изоляции на спаде тока молнии.
- усовершенствованы методы моделирования протяженных проводников в методе FDTD с целью моделирования частотной зависимости комплексной диэлектрической проницаемости грунта.

1.5. Практическая ценность:

- создана компьютерная программа для расчета волновых процессов в заземлителях и опорах, результаты которой используются в дополнительно созданной программе, необходимой для расчета вероятности перекрытия изоляции;
- разработаны рекомендации по выбору лучевых заземлителей с учетом импульсных токов молнии при различных параметрах однородного грунта, а также рекомендации для заземлителей в неоднородных грунтах;
- разработаны рекомендации по измерениям импульсных характеристик заземлителей.

1.6. Достоверность полученных результатов. Для подтверждения полученных результатов была произведена экспериментальная проверка расчетного метода.

Результаты расчета переходных характеристик протяженного заземлителя показали удовлетворительное соответствие данным измерений.

1.7. Основные положения выносимые на защиту:

- результаты теоретических и экспериментальных исследований импульсных характеристик заземлителей в грунтах с высоким удельным сопротивлением;
- методика расчета, на основе которой осуществляется выбор конструкций заземлителей опор линий электропередачи;
- рекомендации по выбору конструкций заземлителей.

1.8. Апробация работы. Основные положения диссертации и отдельные её разделы докладывались и обсуждались на III Российской конференции по молниезащите (г. Санкт-Петербург, 2012 г.), IV Международной конференции по молниезащите (г. Санкт-Петербург, 2014 г.), VII Международной научно-технической конференции имени академика Н. Н. Тиходеева (г. Санкт-Петербург, 2014) , V Международной конференции по молниезащите (г. Санкт-Петербург, 2016 г.).

1.9. Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 работ, в том числе 7 в реферируемых журналах.

1.10. Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы. Объём работы составляет 166 страниц, 135 рисунков, 14 таблиц. Список литературы содержит 111 наименований.

II. КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается краткий анализ современного состояния вопроса, обосновывается актуальность выбранной темы. Показана научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе приводится обзор существующих на данный момент методов расчета электрических характеристик заземляющих устройств, которые можно условно разделить на три группы: квазистационарные методы, методы, использующие телеграфные уравнения, а также методы, основанные на уравнениях электродинамики.

Методы первой группы относительно просты в применении и не требовательны к компьютерным ресурсам, но они не учитывают задержку распространения электромагнитного поля. В простейшем случае рассчитывается только активное сопротивление заземлителя. К увеличению точности ведет учет реактивных параметров заземлителя. Следующим этапом повышения точности расчетов является учет того, что токи и напряжения для разных участков заземлителя различаются. Поэтому заземлитель разделяется на отдельные участки, затем рассчитываются их собственные и взаимные параметры, после чего решается система уравнений, составленная на основе правил Кирхгофа.

В методах второй группы заземлитель (либо отдельный его элемент) представляется в виде длинной линии, а токи и напряжения находятся при решении телеграфных уравнений. Для заземлителя, состоящего из одного проводника, весь заземлитель рассматривается как длинная линия. Заземлитель более сложной формы разбивается на отдельные участки, каждый из которых представляется длинной линией.

Методы, основанные на решении телеграфных уравнений, точно моделируют задержку распространения электромагнитных волн вдоль линии, но в случае заземлителей сложной формы и разбиении заземлителя на отдельные участки, не учитывается задержка распространения волн между участками. Этого недостатка лишены методы третьей

группы, основанные на решении уравнений электродинамики. Одними из первых таких методов стали методы, основанные на расчете запаздывающих скалярного и векторного потенциалов. Эти методы учитывают все особенности распространения электромагнитного поля, а также хорошо подходят для моделирования объектов, состоящих из проводников, сложным образом соединенных в пространстве. Но на данный момент в них можно учитывать лишь однородный грунт. Для учета неоднородного грунта могут использоваться методы, в которых расчет полей или потенциалов производится не только вдоль проводников, но и в пространстве между проводниками. Одним из таких методов является метод конечных разностей во временной области, в котором, однако, имеются трудности при моделировании произвольно ориентированных проводников.

Во второй главе дается описание метода конечных разностей во временной области. Рассмотрены численные ошибки при выполнении расчетов данным методом. Представлено описание методов моделирования проводников малого диаметра, по сравнению с размерами расчетной сетки, и выполнена проверка их точности. Представлено экспериментальное подтверждение применения метода конечных разностей во временной области для расчета переходных характеристик заземлителей. Проведены сравнения как с собственными экспериментами, так и с экспериментами и расчетами других авторов. Описана компьютерная программа расчета параметров заземлителей на основе метода конечных разностей во временной области.

Метод конечных разностей во временной области использует конечно-разностные выражения для аппроксимаций временных и пространственных производных в уравнениях Максвелла. В методе используется центрально-разностная схема со вторым порядком точности, причем точки расчета электрического поля пространственно чередуются с точками расчета магнитного поля. Чередование расчета электрического и магнитного полей также происходит и во времени. В работе все расчеты выполняются для трехмерной расчетной сетки.

Сравнения результатов расчетов методом конечных разностей во временной области с расчетами по аналитическим решениям для моделей простой формы показывают, что ошибка расчетов при размере расчетной сетки менее одной десятой длины волны процесса составляет единицы процентов. Однако в работе основным ограничением является глубина расположения заземлителей в грунте, поэтому размер расчетной сетки близок к этой величине и составляет доли метра. Размер расчетной сетки выбран на основе расчетов с горизонтальным заземлителем при разных размерах ячеек сетки. При уменьшении размера ячейки разница между результатами становится все меньше и сами результаты расчетов сходятся к определенной величине. Размер расчетной сетки выбран таким образом, чтобы разница между результатами расчетов для выбранного размера отличалась от результатов расчетов для существенно меньшего шага сетки на величину порядка нескольких процентов.

При расчете параметров заземлителей размеры расчетной сетки могут составлять доли метра, однако поперечные размеры проводников заземлителей, как правило, в десятки раз меньше. Поэтому в методе конечных разностей во временной области применяются методы моделирования проводников, поперечные размеры которых много меньше размеров расчетной сетки.

Далее представлен результат расчета волновых процессов в протяженном заземлителе, а также его сравнение с экспериментальными результатами. Для расчетов была выбрана модель ранее проведенных экспериментов с протяженным горизонтальным проводником. Измерения проводились по трехэлектродной схеме с разомкнутыми на удаленном конце токовым и потенциальным контурами (рис. 1). Длина заглубленного в землю на 0,15 м проводника составляет 200 м. Длина каждого из контуров равна 100 м. Диаметр проводника заземлителя равен 4 мм. Токовый и потенциальный контуры размещены перпендикулярно заземленному проводнику. В эксперименте в начало

протяженного подземного проводника от генератора подавался импульс тока и выполнялось осциллографирование тока через проводник и напряжения на нем.

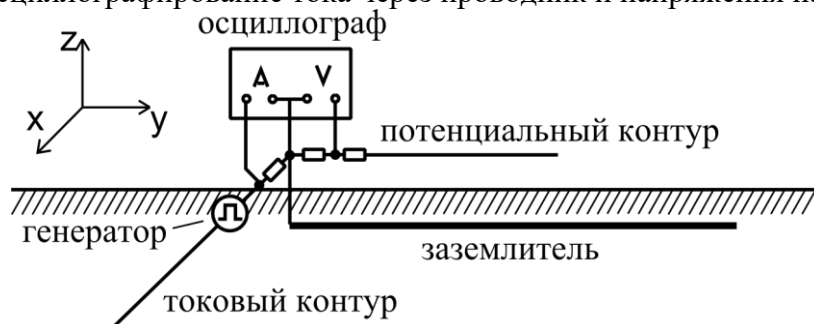


Рис. 1. Измерительная установка.

После этого был произведен расчет потенциала подземного проводника при заданном токе с помощью метода конечных разностей во временной области для данного эксперимента. В расчете задавался тот же входной ток в нагрузку, что и в эксперименте. Относительная диэлектрическая проницаемость земли принята равной 18, что соответствует экспериментальным данным. Удельное сопротивление грунта — 220 Ом·м, грунт принят однородным. Шаг сетки выбран равным 0,15 м. Результаты измерения и расчета представлены на рис. 2.

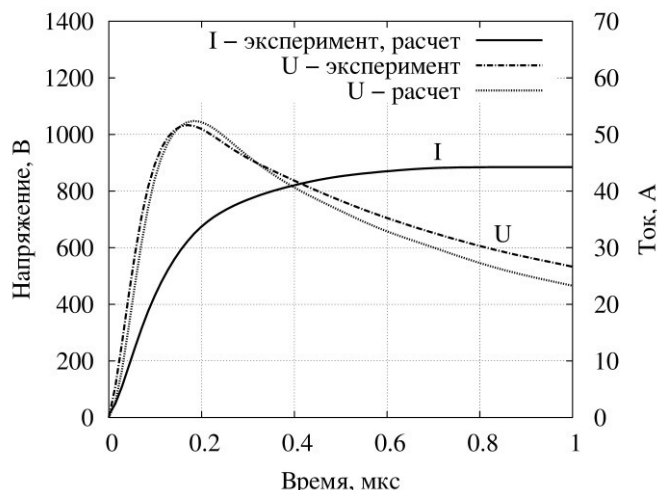


Рис. 2. Результаты измерения и расчета.

Вычисленные значения потенциала хорошо совпадают с экспериментальными. Различие может быть вызвано неоднородностью грунта в экспериментах, а также тем, что в расчетах не учитывалась частотная зависимость параметров грунта.

В третьей главе дается описание генераторной и измерительной аппаратуры для измерений импульсных сопротивлений заземлителей аппаратов подстанций и опор линий электропередачи, описана методика измерений и представлены результаты измерений.

Основными составляющими генераторно-измерительной системы являются генератор импульсного напряжения, токовый и потенциальный контуры, а также цифровой осциллограф, при помощи которого измеряется ток через заземлитель и разность потенциалов между заземлителем и потенциальным контуром (рис. 1). Генератор импульсного напряжения находится в точке измерения сопротивления заземленного объекта; токовый и потенциальный контуры имеют одинаковую длину и разомкнуты на концах.

Диапазон времени измерения меньше времени двойного пробега волн по токовому и потенциальному контурам, которые являются линиями с распределенными параметрами. Измерительные контуры выполняются из изолированного провода, который

прокладывается по поверхности земли. Амплитуда напряжения генератора составляет 12 кВ. Максимальный ток может достигать десятков ампер.

Проведенные измерения позволили определить степень влияния расположения измерительных контуров друг относительно друга и по отношению к проводникам заземлителя на результаты измерений.

В четвертой главе оценивается влияние различных факторов на значения рассчитанных характеристик заземлителей (расположение токового и потенциального контуров, учет наличия фундаментов, опоры); проводится выбор методики, позволяющей определять эффективность конструкций заземлителей с точки зрения молниезащиты; анализируется эффективность различных конструкций заземлителей с использованием выбранной методики и делаются выводы по их выбору.

Как правило, электрические характеристики заземлителей рассчитываются без учета опоры. В случае с постоянными током и напряжением, сопротивление заземлителя однозначно определяется через отношение напряжения к току. Однако при высокочастотных процессах расчет сопротивления заземлителя усложняется.

Так, например, при расчете переходного сопротивления заземления неясно, как следует располагать токовый контур и как рассчитывать потенциал. Также на значение рассчитанного или измеренного импульсного сопротивления влияет форма импульса источника тока или напряжения.

Если в методах, использующих запаздывающие скалярный и векторный потенциалы, можно не использовать токовый контур и вводить ток в конкретный узел расчетной цепи (что отличается от реальной ситуации), то в методе FDTD это, по всей видимости, невозможно. Поэтому расположение токового контура всегда будет влиять на вводимый в заземлитель ток.

Если потенциал рассчитывать через интеграл электрического поля, то в нем будет содержаться также зависимость от пути интегрирования магнитная составляющая, определяемая векторным потенциалом. Т.е. на значение рассчитанного импульсного сопротивления влияет расположение пути интегрирования электрического поля.

Даже если определены расположение токового контура и пути расчета потенциала, существует также проблема сравнения эффективности конструкций заземлителей. Для заземлителей разной конструкции, но при одинаковом затраченном количестве металла, как правило, приходится сравнивать заземлители с большим импульсным, но меньшим стационарным сопротивлением и заземлители, у которых меньшее импульсное, но большее стационарное сопротивление. Рассмотрим, например, трехлучевой и четырехлучевой заземлители с одинаковой суммарной длиной проводников. Четырехлучевой заземлитель имеет большее стационарное сопротивление за счет экранирования, но меньшее импульсное сопротивление, т.к. в первые микросекунды поля не успевают установиться и экранирующий эффект еще не проявляется в значительной степени. При этом неясно, какая конструкция заземлителя эффективнее, особенно если учитывать, что форма напряжения на изоляции опоры с конкретным заземлителем принципиально отличается от формы напряжения на том же заземлителе без моделирования опоры.

Чтобы исключить влияние этих факторов, было принято решение выбирать заземлители на основе расчетов с опорой. В расчетах моделируется удар молнии в вершину опоры и рассчитывается разность потенциалов между опорой и фазными проводами. Работы, в которых также выполняются расчеты с опорой, существуют, но в них рассматриваются электрические характеристики опоры и не учитывается конструкция заземлителя.

Приведем пример расчетов напряжений на линейной изоляции при различных конструкциях заземлителей опоры. В методе конечных разностей во временной области существует возможность проводить расчеты с горизонтальной неоднородностью грунта.

Рассмотрим такой случай, в котором рядом с плохопроводящим грунтом существует область с более высокой проводимостью. Удельное сопротивление плохопроводящего грунта — 2000 Ом·м, относительная диэлектрическая проницаемость — 7 (данные измерений для песчаного грунта на частоте 50 кГц), в десяти метрах от опоры — грунт с удельным сопротивлением 500 Ом·м (относительная диэлектрическая проницаемость — 12). Суммарная длина лучей принята равной 200 метров. Сечение лучей — 12 мм. Лучи расположены на глубине 0,75 м. Тип выбранной опоры — У110-1 (без грозотроса). В расчетах учитывалось только напряжение на изоляции верхней фазы, т.к. в первые микросекунды оно имеет наибольшую по сравнению с другими фазами величину. Параметры тока первого компонента разряда молнии: максимальное значение крутизны тока на фронте S_{max} — 24,3 кА/мкс, амплитуда I — 27,7 кА. Параметры тока последующего компонента: S_{max} — 39,9 кА/мкс, I — 11,8 кА. Рассмотренные конструкции заземлителей показаны на рис. 3.

Форма тока для первых компонентов молнии задавалась при помощи функции, рекомендованной комитетом СИГРЭ, последующих — широко используемой функцией Хейдлера.

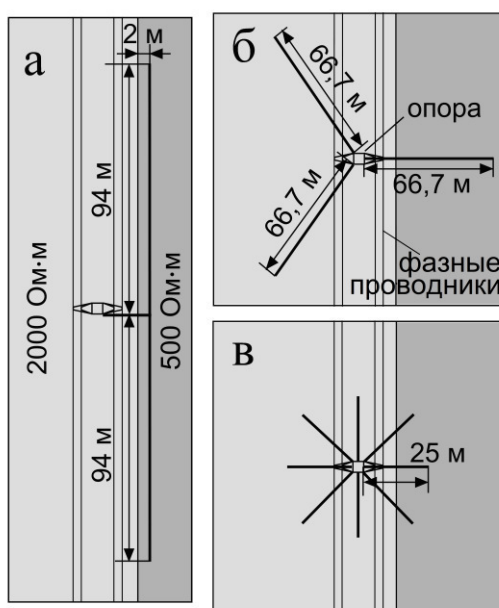


Рис. 3. Конструкции заземлителей.

Результаты расчетов напряжений на изоляции представлены на рис. 4 и 5.

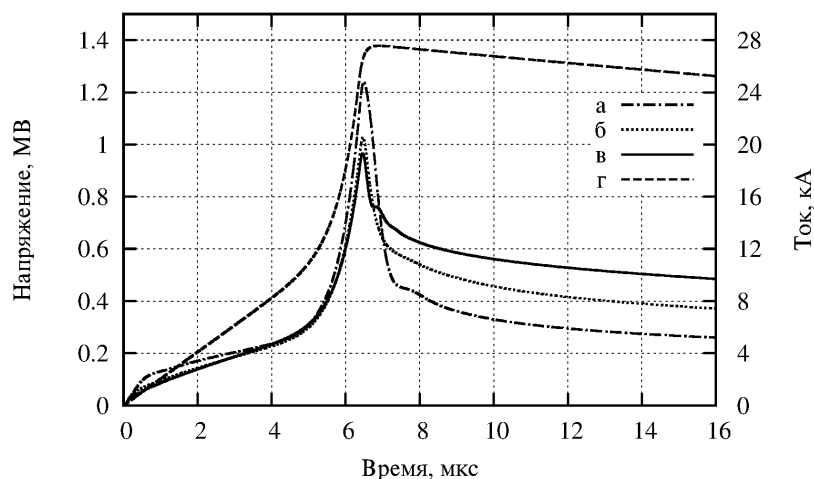


Рис. 4. Разность потенциалов между проводом верхней фазы и опорой для первого компонента. а-в — напряжения, соответствующие моделям на рис.3, г - ток.

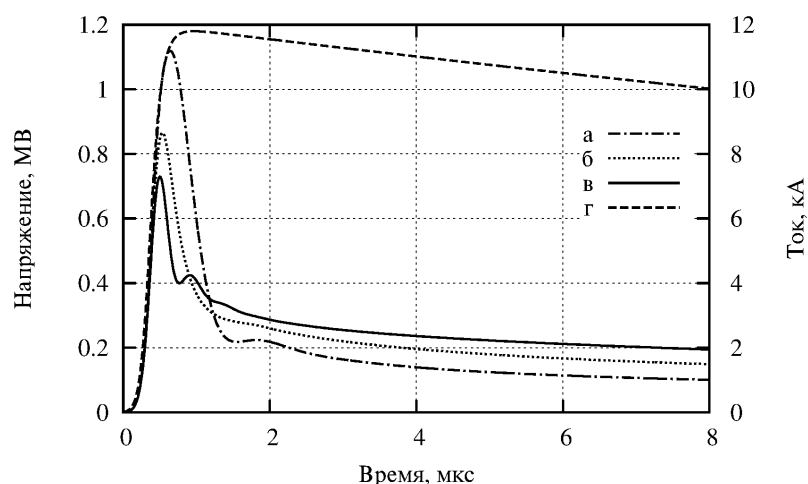


Рис. 5. Разность потенциалов между проводом верхней фазы и опорой для последующего компонента.

Оценивая значения напряжения на изоляции, отмечается более высокое импульсное напряжение для вариантов заземлителей а) и б) на временах до 7 мкс (первый компонент) и до 1 мкс (последующий компонент), при этом напряжение на больших временах ниже. В таких случаях сравнение напряжений можно осуществлять при помощи известных методик, определяющих электрическую прочность изоляции для напряжений нестандартной формы.

Выше были проведены расчеты только для определенных форм и амплитуд импульса тока молнии. Но если какой-либо заземлитель оказался эффективнее другого для одной формы импульса тока, то для импульса тока другой формы может быть наоборот. Поэтому для объективной оценки эффективности конструкции заземлителя нужно учитывать как можно большее число различающихся по амплитудным и временным параметрам токов молнии, а также их вероятностные характеристики.

Все возможные формы токов учесть трудно, поэтому нужно выделить наиболее важные параметры тока молнии (такие как амплитуда, время фронта, крутизна) и проводить расчеты с различными их комбинациями. Далее, зная вероятности появления данных параметров, их корреляцию, а также то, какое сочетание параметров приводит к перекрытию изоляции, можно рассчитать вероятность перекрытия изоляции при ударе молнии.

Существует подход расчета вероятности перекрытия изоляции, основанный на т.н. кривых опасных параметров. В этом подходе определяется область значений амплитуды и крутизны тока молнии, сочетание которых приводит к перекрытию изоляции. Граница этой области определяется кривой опасных параметров. Вероятность перекрытия изоляции — это вероятность того, что определенное сочетание значений крутизны и амплитуды окажется в области, лежащей справа от кривой опасных параметров; она равна интегралу функции двумерной плотности вероятности сочетания значений амплитуды и крутизны по данной области (значение интеграла рассчитывается численно):

$$P = \iint_D p(I, S) dI dS,$$

где $p(I, S)$ — двумерная плотность вероятности сочетания значений амплитуды и крутизны, D — область справа от кривой опасных параметров. Т.к. кривая опасных параметров построена только для конечных значений крутизны и амплитуды, в расчетах она продлевается прямыми, параллельными осям крутизны и амплитуды.

Таким образом, для данного подхода значение вероятности перекрытия изоляции определяется расположением кривой опасных параметров относительно функции двумерной плотности вероятности амплитуд и крутизн тока молнии (помимо вида самой этой функции).

Для того, чтобы не проводить расчеты для различных форм токов, достаточно провести один расчет для скачкообразного тока, а затем использовать интеграл Дюамеля для расчета напряжения на изоляции при произвольном токе. Далее рассчитывается вероятность обратного перекрытия изоляции при ударе молнии в опору (при наличии грозотроса нужно рассмотреть также и удар молнии в грозотрос). При сравнении заземлителей сравниваются вероятности перекрытия изоляции. По этой величине можно оценить, какой заземлитель эффективнее и насколько.

Полный алгоритм расчета вероятности перекрытия изоляции представлен на рис. 6. Используемая в расчетах функция Хейдлера имеет особенность: в ней нет возможности задавать время фронта, время полуспада и амплитуду напрямую. Для получения требуемых значений этих параметров необходимо подбирать соответствующие коэффициенты. Кроме того, в функции Хейдлера нет возможности задавать значения максимальной и средней крутизны независимо.

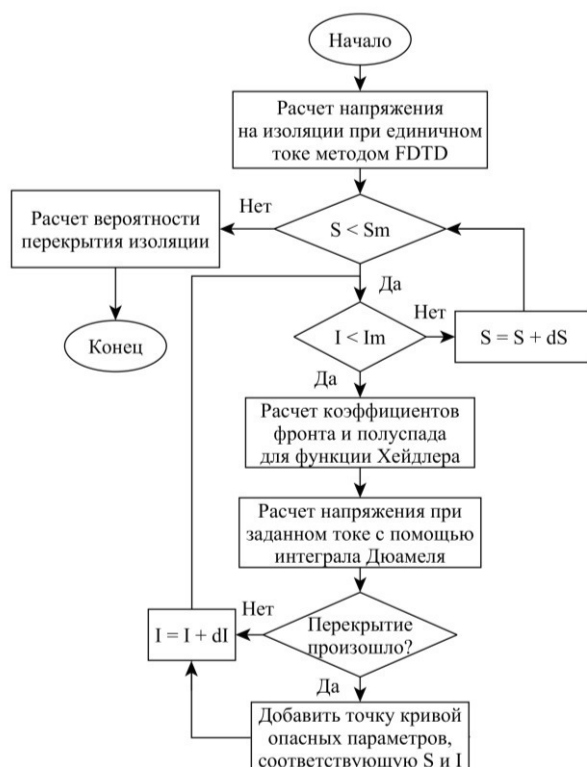


Рис. 6. Алгоритм расчета вероятности перекрытия изоляции.

Работы, посвященные измерениям токов молний, как правило, предоставляют информацию об амплитуде, длительности импульса до полуспада, средней и максимальной крутизне тока на фронте, а также длительности фронта. При этом в расчетах используются только некоторые из этих параметров. В работе фронт импульса тока подбирался по максимальной крутизне тока S_{max} , определяемой в точке максимума первой производной тока. Параметры токов молнии, используемые в расчетах, даны в таблице 1. Данные параметры выбраны согласно рекомендациям комитета СИГРЭ. Для первого компонента разряда молнии длительность импульса до полуспада принята равной 77,5 мкс, для последующих компонентов — 30,2 мкс.

Таблица 1. Параметры токов разряда молнии.

Параметр	Первый компонент		Последующий компонент	
	Медиана	Среднеквадратическое отклонение	Медиана	Среднеквадратическое отклонение
I	27,7 кА	0,461	11,8 кА	0,530
S_{max}	24,3 кА/мкс	0,599	39,9 кА/мкс	0,852

На данный момент нет информации о корреляции между токами компонентов молнии. Достаточное количество данных по распределению вероятностей числа компонентов в разряде молнии существует только по измерениям электрического поля или при помощи видеокамер, причем в данные таких измерений включено полное число компонентов в разряде, куда входят и компоненты, разделенные пространственно. Относительно компонентов разряда, не разделенных в пространстве известно лишь то, что их среднее число близко к трем. Поэтому для расчета полной вероятности перекрытия изоляции была использована формула

$$P_{полн.} = 1 - (1 - P_{перв.}) \cdot (1 - P_{послед.}) \cdot (1 - P_{послед.}),$$

где $P_{перв.}$ — вероятность перекрытия изоляции для первого компонента молнии, $P_{послед.}$ — для последующего.

Вероятности перекрытия изоляции для заземлителей а), б) и в) (рис. 3), соответственно, равны 0,29, 0,23 и 0,28 для первого компонента, а также 0,14, 0,05 и 0,04 для последующего. Полные значения вероятностей равны 0,48, 0,31 и 0,33. Таким образом, вариант с трехлучевым заземлителем предпочтительнее. В расчетах общая длина гирлянды изоляторов принята равной 1,2 м.

С целью определения оптимального числа лучей в работе были проведены расчеты вероятности перекрытия изоляции для четырех типов опор (ПС110-10, ПС110-11, У110-1, ПЗ30-2) с 2, 3, 4, 6, 8 и 12-лучевыми заземлителями (суммарные длины проводников были равны 100, 200 и 300 м) с грунтами 500, 2000 и 10000 Ом·м. Варианты расположения лучей показаны на рис. 7. Угол между лучами, а также длина лучей одинаковы для конкретного варианта заземлителя. Для опоры ПЗ30-2 в модель включен грозотрос, для опор 110 кВ — нет.

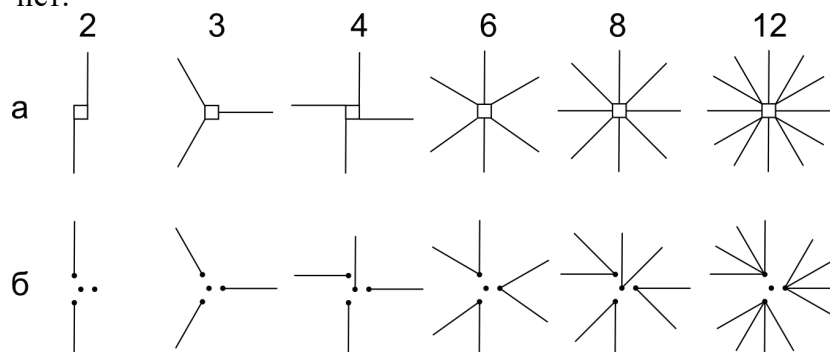


Рис. 7. Расположения лучей, а — для опор ПС110-10, У110-1, ПС110-11 и ПЗ30-2 с лучами у основания, б — для опоры ПС110-11 с лучами у оттяжек и основания.

Результаты расчетов представлены в таблицах 2, 3. Для грунтов с удельным сопротивлением 10000 Ом·м (опоры 110 кВ) вероятности перекрытия изоляции для первого компонента близки к единице в рассмотренных случаях, поэтому в таблице для данного грунта представлены вероятности только для последующего компонента разряда молнии.

Таблица 2. Вероятности перекрытия изоляции, опоры линий 110 кВ.

Полная вероятность	<p>ПС110-10, 500 Ом·м.</p>	<p>У110-1, 500 Ом·м.</p>
	<p>ПС110-10, 2000 Ом·м.</p>	<p>У110-1, 2000 Ом·м.</p>
Вероятность для послед. компонента	<p>ПС110-10, 10000 Ом·м.</p>	<p>У110-1, 10000 Ом·м.</p>
Полная вероятность	<p>ПС110-11 (лучи у оттяжек), 500 Ом·м.</p>	<p>ПС110-11 (лучи у основания), 500 Ом·м.</p>

(продолжение таблицы)

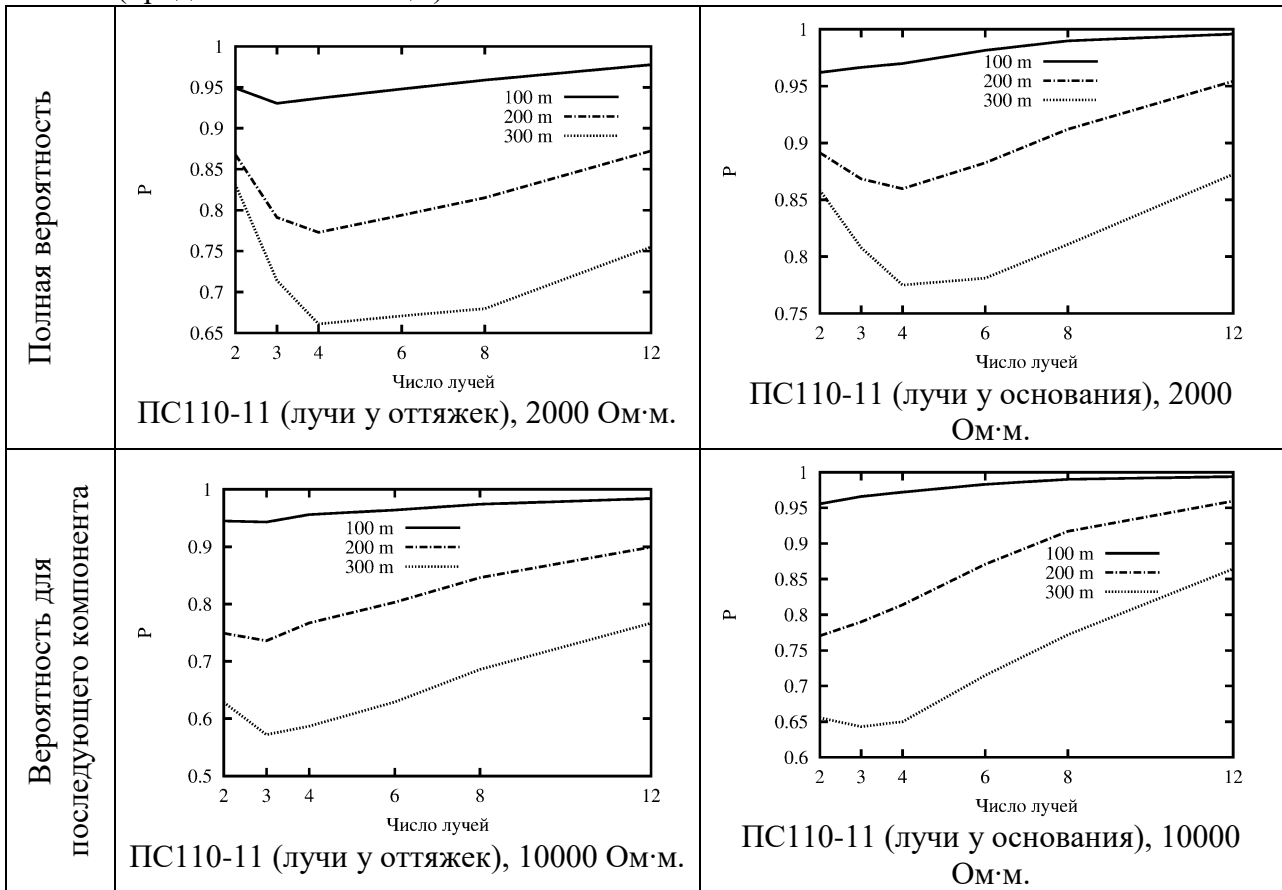
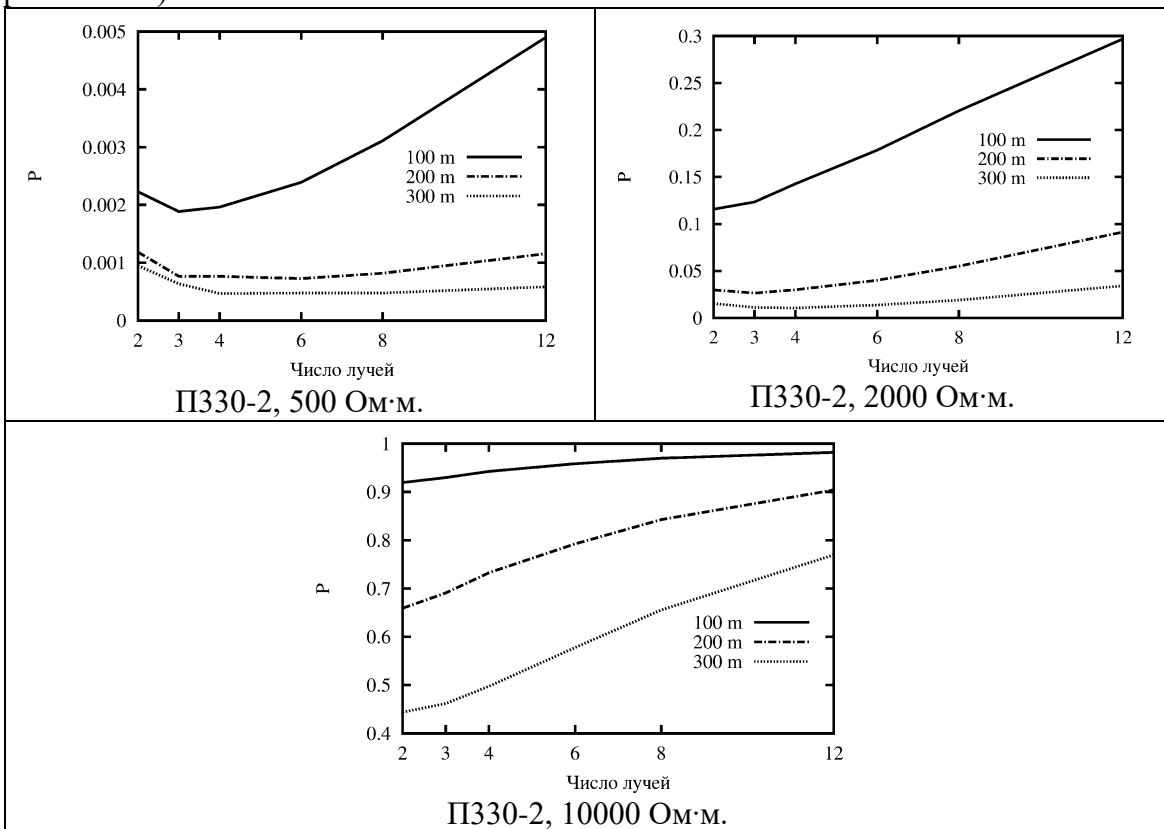


Таблица 3. Вероятности перекрытия изоляции, опора ПЗ30-2 (полные значения вероятностей).



Из рисунков видно, что при сравнении заземлителей с разным числом лучей имеет место минимум значения вероятности перекрытия, связанный с оптимальным соотношением между импульсными и стационарными характеристиками заземлителя. Таким образом, предпочтительное число лучей зависит от общей длины проводников, удельного сопротивления грунта и, в меньшей степени, от типа опоры. Т.е. во многих случаях при одинаковых параметрах грунта и общей длине проводников для разных опор, оптимальное число лучей заземлителей оказывается одинаковым или близким. Некоторое влияние конструкции опоры заметно для случая, когда лучи присоединены к оттяжкам. Однако сами значения вероятностей перекрытия зависят от высоты опоры значительно, как и от удельного сопротивления грунта, общей длины лучей и, безусловно, прочности изоляции.

Относительная разница между значениями вероятностей для различного числа лучей, но для определенного грунта и общей длины проводников, может быть как значительной (в случаях небольших значений вероятности перекрытия), так и незначительной (особенно при значениях вероятностей, близких к единице).

Разница между значениями вероятности перекрытия для разных значений общей длины проводников (но одной и той же опоры и того же грунта) тем меньше, чем меньше значения вероятности перекрытия для данного случая.

В таблице 4 даны значения оптимального числа лучей для разных случаев по результатам из таблиц 2, 3.

Таблица 4. Оптимальное число лучей.

Общая длина.	Удельное сопротивление.		
	500 Ом·м	2000 Ом·м	10000 Ом·м
100 м	3-4	2-3	2
200 м	3-8	3-4	2-3
300 м	4-8	4-6	2-3

Из таблицы 4 видно, что при увеличении удельного сопротивления грунта, оптимальное число лучей уменьшается. Это связано с тем, что при высоком удельном сопротивлении грунта заземлители обладают емкостным характером. Можно также видеть, что чем больше общая длина проводников заземлителя, тем больше оптимальное число лучей. Это можно объяснить тем, что при импульсных воздействиях протяженный заземлитель обладает некоторой эффективной длиной, увеличение которой, начиная с определенного значения, не приводит к заметному уменьшению импульсного напряжения на заземлителе. Для заземлителей в относительно низкоомных грунтах общая длина лучей влияет на оптимальное число лучей в большей степени, чем для заземлителей в высокоомных грунтах. Кроме того, из таблицы видно, что для заземлителей в низкоомных грунтах диапазоны оптимального числа лучей шире.

Таким образом, на выбор оптимального числа лучей влияют следующие факторы:

1. Удельное сопротивление грунта.
2. Общая длина проводников (причем для относительно низкоомных грунтов число лучей варьируется в большей степени, чем для высокоомных).
3. Конструкция опоры (но данный фактор влияет в меньшей степени).
4. При больших значениях вероятностей перекрытия относительная разница между числом лучей менее значительна по сравнению с относительной разницей при небольших значениях вероятностей перекрытия.

Также значения вероятностей можно учитывать при выборе общей длины проводников заземлителей.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По диссертации можно сделать следующие выводы:

1. Выполнен анализ математических методов, применяемых для расчета импульсных характеристик заземлителей. Осуществлен выбор наиболее подходящего для данной цели метода, точно учитывающего волновые процессы в заземлителях, расположенных в однородных или неоднородных грунтах, а также выполнена экспериментальная проверка метода.

2. Разработана генераторно-измерительная аппаратура для измерения импульсных сопротивлений заземлителей. Было показано, что для корректного сравнения измеренных значений импульсного сопротивления протяженных заземлителей взаимное расположение измерительных контуров должно быть одинаковым. Расположение контуров, отличное от перпендикулярного, может существенно влиять на результаты измерений. Расположение токового или потенциального контуров вдоль проводников заземлителя может снижать значение измеренного импульсного сопротивления заземлителя на 50% и более.

3. Разработана компьютерная программа, предназначенная для расчета волновых процессов в заземлителях и опорах, и учитывающая как вертикальные, так и горизонтальные неоднородности грунта. В качестве критерия эффективности заземлителя в работе предложено использовать вероятность перекрытия линейной изоляции линии или напряжение на изоляции при ударе молнии в опору или грозотрос.

4. Установлено, что оптимальное число лучей заземлителя зависит от удельного сопротивления грунта и общей длины проводников заземлителя. Применяя предложенную методику сравнения конструкций заземлителей к металлическим опорам, было показано, что в случае с лучевыми заземлителями для грунтов до нескольких тысяч Ом·м, оптимальное число лучей в среднем близко к четырем-шести, причем при относительно небольшой общей длине проводников (100 м), оптимальное число лучей ближе к трем-четырем, а при относительно большой общей длине (300 м) — к шести-восьми. Для грунтов с удельным сопротивлением порядка 10000 Ом·м оптимальное число лучей равно двум-трем и в меньшей степени зависит от общей длины лучей. Т.е. с повышением удельного сопротивления грунта оптимальное число лучей уменьшается при одинаковой общей длине лучей. Для опор на оттяжках лучи следует присоединять к оттяжкам.

5. Использование горизонтальных неоднородностей грунта путем изменения конструкции заземлителя целесообразно, когда область с низким удельным сопротивлением находится в непосредственной близости (единицы метров) от опоры. Но даже в этом случае смещение заземлителя в сторону области с низким сопротивлением эффективно, только если это не приводит к повышению индуктивности заземлителя (вследствие, например, уменьшения числа лучей, присоединенных непосредственно к основанию опоры).

При вертикальных неоднородностях использование участка с низким удельным сопротивлением вблизи (первые единицы метров) поверхности земли может существенно уменьшить вероятность перекрытия изоляции. Однако для этого нужно располагать проводники заземлителя непосредственно в области с низким сопротивлением грунта (при условии, что это не приводит к повышению индуктивности заземлителя). При заглублении заземлителя с целью его приближения к участку с низким удельным сопротивлением существенного эффекта не обнаружено.

6. Высота опоры значительно влияет на значения вероятности перекрытия изоляции, однако для опор разной высоты наиболее эффективными являются, как правило, одни и те же заземлители. На выбор конструкции заземлителя могут влиять существенные различия в конструкции опоры (например, оттяжки).

7. В результате анализа импульсных характеристик заземлителей было установлено, что при выборе заземлителя должен соблюдаться оптимальный баланс между импульсным и стационарным сопротивлением заземлителя, т.к. уменьшение

одного, как правило, приводит к увеличению другого при разных конструкциях заземлителей, но одинаковой общей длине проводников.

8. Расчеты показывают, что соотношение между средней и максимальной крутизной импульса тока на фронте имеет важное значение при определении вероятности перекрытия изоляции линий. Поэтому необходимо использовать функции, точно отражающие форму тока молнии на фронте. Это особенно важно для первых компонентов разряда молнии, у которых максимальная крутизна тока на фронте в несколько раз отличается от средней.

9. Показано, что вероятности перекрытия изоляции линии для последующих компонентов разряда молнии вносят существенный вклад в полную вероятность перекрытия изоляции.

10. Показано, что использование линейно нарастающего тока и отсутствие учета перекрытий на спаде тока может приводить к существенной недооценке вероятности перекрытия изоляции (для высокоомных заземлителей недооценка может составлять более 40%). Таким образом, в расчетах необходимо учитывать как фронт, так и спад тока молнии.

11. Установлено, что на расчетные значения вероятностей перекрытия изоляции может заметно влиять значение корреляции между амплитудой и крутизной тока.

12. Усовершенствованы методы моделирования протяженных проводников в методе конечных разностей во временной области с целью моделирования частотной зависимости комплексной диэлектрической проницаемости грунта.

13. Показано, что для выполнения более точных расчетов вероятностей перекрытия изоляции необходимо учитывать частотную зависимость комплексной диэлектрической проницаемости грунта.

IV. ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ.

1. Куклин Д.В. Расчет переходного сопротивления заземлителей с помощью метода конечных разностей во временной области / Д.В. Куклин // Вестник Мурманского государственного технического университета. – 2013. – Т. 16. – № 1. – С. 114-122.
2. Куклин Д.В. Коррекция ошибок, вызванных применением ступенчатой аппроксимации проводника при использовании метода конечных разностей во временной области. / Д.В. Куклин // Вестник Мурманского государственного технического университета. – 2013. – Т. 16. – № 4. – С. 728-733.
3. Куклин Д.В. Расчет кривых опасных параметров при высоких сопротивлениях заземлений опор линий электропередачи / Д.В. Куклин, Б.В. Ефимов // Электричество. – 2016. – № 6. – С. 16-21.
4. Куклин Д.В. Программное обеспечение для расчета волновых процессов в заземлителях и заземленных объектах / Д.В. Куклин, В.Н. Селиванов // Вестник Мурманского государственного технического университета. – 2015. – Т. 18. – № 1. – С. 137-142.
5. Kuklin D. Extension of thin wire techniques in the FDTD method for Debye media / D. Kuklin // Progress In Electromagnetics Research M. – 2016. – Т. 51. – С. 9-17.
6. Kuklin D. Choosing configurations of transmission line tower grounding by back flashover probability value / D. Kuklin // Frontiers in Energy. – 2016. – Т. 10. – № 2. – С. 213-226.
7. Куклин Д.В. Моделирование тонких проводников в методе конечных разностей во временной области при расчете импульсных характеристик заземлителей / Д.В. Куклин // Электро. Электротехника, Электроэнергетика, Электротехническая Промышленность. – 2015. – № 1. – С. 9-14.

Подписано в печать 16.04.2018 Формат 60x84 ¹/₁₆ Цифровая Печ.л. 1,0
Тираж 100 экз. Заказ № 18/04 печать

Типография «Фалкон Принт»
197101, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Пушкарская, д. 41, литер Б,
сайт: <http://falconprint.ru>