

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 621.316.99

ДЕРЮГИНА
Елена Александровна

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЗАЕМЛИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

**по специальности 05.14.02 – Электрические станции
и электроэнергетические системы**

Минск, 2012

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

Научный руководитель **Герасимович Дмитрий Александрович**,
кандидат технических наук, главный инженер
проекта, ЧПСУП «Электроситистрой»

Официальные оппоненты: **Фурсанов Михаил Иванович**,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Электрические
системы», Белорусский национальный
технический университет;

Глушко Виктор Иванович,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник

Оппонирующая организация Научно-исследовательское и проектное
республиканское унитарное предприятие
«БЕЛТЭИ» (г. Минск)

Защита состоится 23 ноября 2012 г. в 14 часов на заседании совета по за-
щите диссертаций Д 02.05.02 в Белорусском национальном техническом уни-
верситете по адресу: 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65, корп. 2, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского нацио-
нального технического университета.

Отзывы на автореферат диссертации в двух экземплярах просим высылать
на адрес университета и предварительно отправлять по факсу (8-017) 292-91-37
(для стран СНГ: (8-10-375-17) 292-91-37) на имя председателя совета по защите
диссертаций Ф. А. Романюка.

Автореферат разослан 15 октября 2012 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций,
доктор технических наук, профессор _____ Сергей И. И.

© Дерюгина Е. А., 2012

© Белорусский национальный
технический университет, 2012

ВВЕДЕНИЕ

Заземляющие устройства являются неотъемлемой частью электроустановок электрических станций, подстанций, сетей, предприятий, зданий и сооружений. Они представляют собой совокупность заземлителя и заземляющих проводников и выполняют функции рабочего заземления, заземления безопасности и молниезащиты. Последние обуславливают высокие требования к надежности работы заземляющих устройств и электробезопасности персонала.

Роль заземляющих устройств в обеспечении надежной и безотказной работы электроустановок постоянно возрастает в связи с внедрением современных микропроцессорных устройств релейной защиты, систем автоматического управления и телемеханики. Это связано с вопросами обеспечения электромагнитной совместимости и оценки электромагнитной обстановки современных электроэнергетических объектов. Электромагнитная обстановка на любом энергообъекте определяется как видами и величинами воздействующих электромагнитных помех, так и электромагнитными характеристиками контура заземляющего устройства. Таким образом, проблема исследования и анализа электромагнитных характеристик контуров заземляющих устройств стала еще более актуальной, а изучению их импульсных характеристик при стекании токов молнии уделяется особое внимание.

Исследование и расчет характеристик заземлителей с самого начала развития теории заземляющих устройств относят к категории сложных задач электротехники. Значительный вклад в решение данной задачи внесли М. А. Авербух, В. З. Анненков, Э. М. Базелян, Р. К. Борисов, В. В. Бургсдорф, А. Л. Вайнер, В. И. Глушко, Р. Н. Карякин, Е. С. Колечицкий, А. В. Корсунцев, С. И. Коструба, Н. Н. Максименко, М. Р. Найфельд, Ф. Оллендорф, Е. Я. Рябкова, В. К. Слышалов, Ю. В. Целебровский, С. Л. Шишигин, А. И. Якобс, Н. В. Dwight, L. D. Grcev, A. C. Liew, R. G. Olsen, D. Poljak, R. Velazquez и другие ученые.

Опубликовано большое количество научных работ, в которых исследовались электромагнитные характеристики заземлителей при стекании переменного синусоидального тока и импульсных токов молнии. Однако до сих пор является актуальным определение универсальных критериев для оценки активно работающей части контура заземляющего устройства при стекании переменного синусоидального тока и импульсных токов молнии, которые бы одновременно учитывали характер изменения тока во времени и электромагнитные свойства земли. Получение таких критериев возможно на основе исследования и анализа электромагнитных процессов в заземлителе простой геометрической формы, в частности в вертикальном заземлителе. Последнее определило конечную цель настоящей диссертационной работы, а также предмет и объект исследования.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами. Тема диссертации соответствует приоритетному направлению научных исследований «Энергообеспечение, энергосбережение, энергоэффективность, энергоэффективные технологии» на 2011–2015 гг.

Тема диссертации включена в утвержденные планы научно-исследовательских работ кафедры «Электрические станции» Белорусского национального технического университета «Развитие методов анализа и синтеза электромагнитных, электродинамических и тепловых процессов в электроустановках и устройствах релейных защит» (ГБ 06-244) на 2006–2010 гг., «Совершенствование методов анализа и синтеза электромагнитных и электродинамических процессов в электроустановках и устройствах релейных защит» (ГБ 11-210) на 2011–2015 гг.

Изложенные в диссертационном исследовании результаты получены при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь в виде гранта на выполнение научно-исследовательской работы «Исследование электромагнитных характеристик вертикальных стержневых заземлителей» (утверждена Министерством образования Республики Беларусь, № госрегистрации 20100489, 2010 г.).

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является определение критериев для практической оценки активно работающей части заземлителя при стекании переменного синусоидального тока и импульсных токов молнии на основании анализа электромагнитных характеристик вертикальных заземлителей.

Для достижения сформулированной цели необходимо было решить следующие задачи:

- 1) разработать метод расчета электромагнитных характеристик вертикального заземлителя при стекании переменного синусоидального тока;
- 2) исследовать и проанализировать электромагнитные характеристики вертикальных заземлителей при стекании переменного тока промышленной частоты и получить по их результатам пригодный для практического использования критерий оценки зоны стекания переменного тока с заземлителя в землю;
- 3) разработать метод расчета электромагнитных характеристик вертикального заземлителя при стекании импульсных токов молнии;
- 4) исследовать и проанализировать электромагнитные характеристики вертикальных заземлителей при стекании импульсных токов молнии и получить пригодный для практического использования критерий оценки зоны стекания импульсного тока с заземлителя в землю;
- 5) апробировать полученные результаты путем сопоставления с теорети-

ческими и экспериментальными результатами других исследователей.

Объектом исследования являются вертикальные заземлители заземляющих устройств. **Предметом исследования** – электромагнитные характеристики вертикальных заземлителей при стекании переменного синусоидального тока и импульсных токов молнии.

Положения, выносимые на защиту. В диссертации обоснованы, разработаны и защищаются:

1. Метод расчета параметров электромагнитного поля вертикального заземлителя при стекании переменного синусоидального тока, отличающийся решением дифференциальных уравнений Максвелла методом конечных разностей в сочетании с методами прогонки и итераций применительно к вертикальному заземлителю и позволяющий определять основные электромагнитные характеристики заземлителей с учетом реального характера изменения во времени стекающего в заземлитель переменного синусоидального тока.

2. Аналитические формулы для приближенного расчета сопротивления вертикального заземлителя и напряжения на заземлителе на переменном синусоидальном токе, отличающиеся учетом конечной длины заземлителя и наличия заземлителя с обратным током и обеспечивающие расчет характеристик заземлителя с погрешностью не более 6 % в сравнении с разработанным методом.

3. Критерий оценки зоны стекания переменного синусоидального тока с заземлителя в землю, отличающийся учетом затухания электромагнитного поля вдоль оси заземлителя в земле и позволяющий на практике определять длины заземлителей, для которых допустимо использование общеизвестных выражений для постоянного тока, и длины, начиная с которых необходим учет затухания электромагнитного поля.

4. Метод расчета импульсных характеристик вертикального заземлителя, отличающийся решением дифференциальных уравнений Максвелла для переходного режима операторным методом при приближенном распределении параметров электромагнитного поля и позволяющий определять импульсные характеристики заземлителей с учетом реального характера изменения тока молнии во времени, индуктивной составляющей и токов смещения.

5. Критерий оценки зоны стекания импульсного тока молнии с заземлителя в землю, отличающийся учетом временных параметров импульса тока молнии и электромагнитных свойств земли и обеспечивающий практическое определение длины активно работающей части заземлителя в импульсном режиме.

Личный вклад соискателя. Основные результаты диссертационной работы и положения, выносимые на защиту, получены лично соискателем.

Постановка задач исследования и разработка методов расчета электромагнитных характеристик вертикальных заземлителей при стекании переменного и

импульсных токов осуществлялись совместно с научным руководителем.

В работах, опубликованных в соавторстве, соискателем: исследованы и проанализированы электромагнитные характеристики заземлителей при стекании переменного синусоидального тока и импульсных токов молнии; получены формулы для приближенного расчета сопротивления стержня заземлителя, сопротивления растеканию тока в земле и напряжения на заземлителе на переменном синусоидальном токе; определены критерии оценки зоны стекания переменного и импульсного токов с заземлителя в землю; разработаны компьютерные программы расчета электромагнитных характеристик заземлителей при стекании переменного синусоидального тока и импульсных токов молнии.

Апробация результатов диссертации. Результаты исследований, включенные в диссертацию, докладывались и обсуждались на Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электро-технологии» (XIV Бенардосовские чтения) (Иваново, Россия, Ивановский государственный энергетический университет, май 2007 г.); Пятнадцатой, Шестнадцатой Международных научно-технических конференциях студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, Россия, Московский энергетический институт (технический университет), февраль 2009, 2010 гг.); Седьмой международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» (Санкт-Петербург, Россия, Российский фонд фундаментальных исследований, апрель 2009 г.); Седьмой, Девятой международных научно-технических конференциях «Наука – образованию, производству, экономике» (Минск, БНТУ, 2009, 2011 гг.); The 6th International conference «New electrical and electronic technologies and their industrial implementation (NEET 2009)» (Zakopane, Poland, Lublin university of technology, June 2009).

Опубликованность результатов диссертации. Основные результаты исследований опубликованы в шести статьях в научно-техническом журнале «Энергетика – Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ» [1–6], одной статье в научно-техническом журнале «Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)» [7] и семи материалах и тезисах докладов научно-технических и научно-практических конференций [8–14]. Общий объем публикаций в научно-технических журналах составляет 3,5 авторского листа.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложения. Полный объем диссертации составляет 145 страниц, включая: 32 иллюстрации на 32 страницах; одну таблицу; библиографический список на 12 страницах (129 наименований, из которых 14 авторских); одно приложение на трех страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе выполнен обзор конструкций заземлителей, моделей описания электрической структуры земли, методов расчета и измерения стационарных и импульсных характеристик заземлителей, из которого вытекает следующее.

Стационарные характеристики определяют для сосредоточенных и протяженных заземлителей. Стеkanie тока с сосредоточенных заземлителей в землю описывают дифференциальными уравнениями поля постоянного тока и дополняют их граничными условиями. Для заземлителей простой геометрической формы получены аналитические выражения для расчета сопротивления растеканию тока в земле. Расчет сложных заземлителей выполняют методами наведенных потенциалов, коэффициентов использования и обобщенных параметров, а также методами расчета цепей с сосредоточенными параметрами, методами конечных и граничных элементов с последующим двух- или трехмерным моделированием. Определение характеристик протяженных заземлителей при стекании переменного тока производят на основе моделей линии с распределенными параметрами или электромагнитного поля. При этом находят входное, волновое и переходное сопротивления заземлителя.

Методы расчета импульсных характеристик заземлителей разработаны для частных случаев протяженных заземлителей, горизонтальных и вертикальных заземлителей конечной длины, а также для простых заземляющих сеток. Они также основаны на моделях линии с распределенными параметрами или электромагнитного поля и, как правило, не учитывают искрообразование вокруг заземлителя в грунте. Учет искрообразования в грунте выполнен для простых случаев сосредоточенных заземлителей.

Анализ существующих моделей и методов расчета электромагнитных характеристик заземлителей показал, что для уединенного заземлителя на переменном токе необходимо учитывать заземлитель с обратным током. В противном случае величины сопротивлений такого заземлителя будут бесконечно большими. Параметры схем замещения заземлителей при стекании переменного и импульсных токов молнии не всегда корректно определяются по выражениям для поля постоянного тока. Для заземлителей конечной длины не во всех случаях учитываются граничные условия на конце заземлителя. Результатов исследований и практических рекомендаций на основе методов расчета импульсных характеристик заземлителей сравнительно мало. Для оценки активной работающей части контура заземляющего устройства при стекании токов молнии не существует универсального критерия, в котором учитываются параметры импульса тока молнии и электромагнитные свойства земли.

Во второй главе разработан метод расчета параметров электромагнитного поля вертикального заземлителя в однослойной земле при стекании переменного синусоидального тока.

Геометрическая модель заземлителя в цилиндрической системе координат (r, φ, z) приведена на рисунке 1 и представляет собой среду, состоящую из заземлителя (слой 1) и приведенной многослойной земли к эквивалентной однослойной (слой 2). Из заземлителя в землю стекает переменный синусоидальный ток с известной комплексной амплитудой \dot{I}_m . Рассматривается заземлитель трубчатого сечения с внутренним r_1 и внешним r_2 радиусами и длиной l . Модель бесконечно длинного заземлителя получается как частный случай при $l \rightarrow \infty$, а модель заземлителя круглого сечения – при $r_1 \rightarrow 0$.

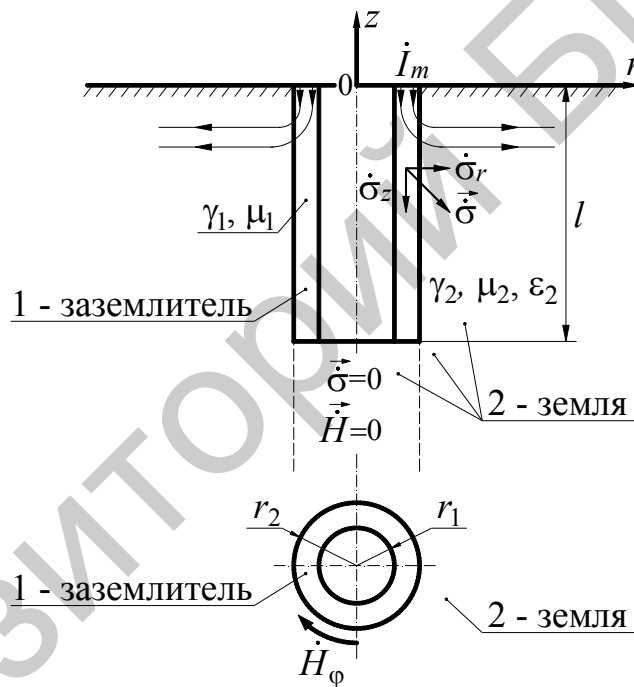


Рисунок 1 – Геометрическая модель вертикального заземлителя

Электромагнитные процессы в заземлителе и земле описываются системой дифференциальных уравнений Максвелла, которая для комплексных амплитуд векторов поля имеет вид:

$$\begin{aligned} \text{rot } \vec{H}_{im} &= \vec{\sigma}_{im}; & \text{rot } \vec{E}_{im} &= -j\omega \vec{B}_{im}; & \text{div } \vec{B}_{im} &= 0; \\ \text{div } \vec{\sigma}_{im} &= 0; & \vec{B}_{im} &= \mu_i \vec{H}_{im}; & \vec{\sigma}_{im} &= \gamma_i \vec{E}_{im}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $i = 1, 2$ – индекс номера слоя; \vec{H}_{im} – вектор напряженности магнитного поля; $\vec{\sigma}_{im}$ – вектор плотности тока проводимости; \vec{E}_{im} – вектор напряженности

электрического поля; \vec{B}_{im} – вектор индукции магнитного поля; ω – угловая частота переменного тока; μ_i – абсолютная магнитная проницаемость; γ_i – удельная электрическая проводимость.

Система (1) в цилиндрической системе координат с учетом симметрии относительно угловой координаты φ приведена к дифференциальным уравнениям:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial \dot{\sigma}_{imr}(r, z)}{\partial r} + \frac{\partial^2 \dot{\sigma}_{imr}(r, z)}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \dot{\sigma}_{imr}(r, z)}{\partial z^2} = \left(\alpha_i^2 + \frac{1}{r^2} \right) \dot{\sigma}_{imr}(r, z); \quad (2)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial \dot{\sigma}_{imz}(r, z)}{\partial r} + \frac{\partial^2 \dot{\sigma}_{imz}(r, z)}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \dot{\sigma}_{imz}(r, z)}{\partial z^2} = \alpha_i^2 \dot{\sigma}_{imz}(r, z), \quad (3)$$

где $\dot{\sigma}_{imr}$ и $\dot{\sigma}_{imz}$ – комплексные амплитуды радиальной и вертикальной составляющих вектора плотности тока; $\alpha_i^2 = j\omega\gamma_i\mu_i$.

Эти уравнения дополнены предельными условиями на поверхности земли и заземлителя, условиями на бесконечности ($r \rightarrow \infty$), а также условием на границе раздела сред заземлителя и земли.

Решение уравнений (2) и (3) осуществлено методом конечных разностей в сочетании с методами прогонки и итераций. Рассматриваемая область заменялась соответствующей разностной сеткой. Для каждого узла разностной сетки составлялись линейные уравнения на основе аппроксимации разностными соотношениями. Решение полученной таким образом системы линейных уравнений выполнено совместным применением методов прогонки и итераций. Первоначально задавалось начальное приближение распределения плотности тока в заземлителе и земле. Зная начальное приближение, рассчитывалось новое приближение распределения плотности тока на основе решения полученной системы уравнений методом прогонки. Это приближение сравнивалось с начальным и определялась максимальная величина невязки плотностей тока на двух смежных итерациях. Итерации продолжались до тех пор, пока максимальная величина невязки не становилась меньше заданного значения.

Результаты вычислительного эксперимента показали, что наименьшее количество итераций (не более семи при отличиях в плотностях тока на смежных итерациях до 1 %) получается, если за начальное приближение принять распределение плоской электромагнитной волны по координате z . При этом в земле можно учитывать только радиальную составляющую вектора плотности тока, а в стержне заземлителя – только вертикальную. Выражения для начального приближения распределения составляющих вектора плотности тока для земли и заземлителя имеют вид:

$$\dot{\sigma}_{2mr}(r, z) = \begin{cases} \frac{\alpha_2 \dot{I}_m}{2\pi r} e^{\alpha_2 z} + \frac{\alpha_2 \dot{I}_m l e^{-\alpha_2 l}}{2\pi r \sqrt{l^2 + (r - r_2)^2}} \cdot \frac{\text{ch}(\alpha_2 z)}{\text{sh}(\alpha_2 l)}, & r \in [r_2, \infty); z \in [-l, 0]; \\ \frac{\alpha_2 \dot{I}_m}{2\pi r} e^{\alpha_2 z} \left(1 - \frac{l}{\sqrt{l^2 + (r - r_2)^2}} \right), & r \in [r_2, \infty); z \in (-\infty, -l); \end{cases} \quad (4)$$

$$\dot{\sigma}_{1mz}(r, z) = \frac{j\alpha_1 \dot{I}_m}{2\pi r_2} \cdot \frac{\text{sh}(\alpha_2(z+l))}{\text{sh}(\alpha_2 l)} \cdot \frac{J_1(\chi_1) H_0^{(2)}(\chi) - J_0(\chi) H_1^{(2)}(\chi_1)}{J_1(\chi_1) H_1^{(2)}(\chi_2) - J_1(\chi_2) H_1^{(2)}(\chi_1)}, \quad (5)$$

$$r \in [r_1, r_2]; z \in [-l, 0].$$

где $J_0(\chi)$, $J_1(\chi)$ – функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядков соответственно; $H_0^{(2)}(\chi)$, $H_1^{(2)}(\chi)$ – функции Бесселя третьего рода (вторая функция Ганкеля) нулевого и первого порядков соответственно; $\chi = j\alpha_1 r$; $\chi_1 = j\alpha_1 r_1$; $\chi_2 = j\alpha_1 r_2$.

Разработанный метод позволяет определять параметры электромагнитного поля и основные электромагнитные характеристики вертикальных заземлителей.

В третьей главе определены основные интегральные характеристики вертикального заземлителя при стекании переменного синусоидального тока, проведено исследование этих характеристик и предложены формулы для их приближенного расчета.

По найденным составляющим векторов плотности тока и напряженности магнитного поля определены: сопротивление стержня заземлителя \underline{Z}_c , сопротивление растеканию тока в земле \underline{Z}_3 , действующее значение напряжения на заземлителе \dot{U} и полное сопротивление заземлителя \underline{Z} , которое находится по выражению

$$\underline{Z}(r_{об}) = \underline{Z}_c + \underline{Z}_3(r_{об}), \quad (6)$$

где $r_{об}$ – расстояние до заземлителя с обратным током.

На основе предложенного во второй главе метода разработана компьютерная программа расчета электромагнитных характеристик вертикальных заземлителей при стекании переменного синусоидального тока. С ее помощью проведено исследование характеристик медных и стальных заземлителей (труб и стержней) разной длины и радиусов в земле с различной проводимостью для промышленной частоты.

Для принятого начального приближения (4) и (5) итерационный процесс расчета сходится достаточно быстро. Отмеченное позволило предложить приближенные формулы, основанные на начальном приближении распределения плотности тока. Итоговые выражения для приближенного расчета сопротивле-

ния стержня заземлителя, сопротивления растеканию тока в земле и действующего значения напряжения на заземлителе имеют вид:

$$\underline{Z}_c = \frac{j}{2\pi r_2} \sqrt{\frac{j\mu_1}{2\gamma_1\gamma_2\mu_2}} \cdot \frac{J_1(\chi_1)H_0^{(2)}(\chi_2) - J_0(\chi_2)H_1^{(2)}(\chi_1)}{J_1(\chi_1)H_1^{(2)}(\chi_2) - J_1(\chi_2)H_1^{(2)}(\chi_1)} \cdot \frac{\text{sh}(2k_2l) - \sin(2k_2l)}{\text{ch}(2k_2l) - \cos(2k_2l)}; \quad (7)$$

$$\underline{Z}_3(r_{об}) = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{j\omega\mu_2}{\gamma_2}} \left(\ln \frac{r_{об}}{r_2} + \frac{e^{-\alpha_2 l}}{\text{sh}(\alpha_2 l)} \ln \frac{2l}{r_2} \right); \quad (8)$$

$$\dot{U}(r_{об}) = \frac{\dot{I}_m}{2\pi} \sqrt{\frac{j\omega\mu_2}{2\gamma_2}} \left(\ln \frac{r_{об}}{r_2} + \frac{e^{-\alpha_2 l}}{\text{sh}(\alpha_2 l)} \ln \frac{2l}{r_2} \right), \quad (9)$$

где $k_2 = \sqrt{\omega\gamma_2\mu_2}/2$.

Отличия значений, рассчитанных по разработанному методу и по приближенным формулам, не превышают 6 %.

В результате проведенного вычислительного эксперимента установлено, что при малой проводимости земли ($\gamma_2 = 0,0001$ См/м) полное сопротивление заземлителя практически соответствует сопротивлению, определяемому по выражению для постоянного тока. Такие результаты объясняются тем, что при малой проводимости земли длина заземлителя существенно меньше глубины проникновения плоской электромагнитной волны в землю. Поэтому затухание волны в земле практически не сказывается, а электромагнитные характеристики заземлителя соответствуют распределению поля постоянного тока.

При большой проводимости земли ($\gamma_2 = 0,1$ См/м) соответствие постоянному току наблюдается для длин заземлителей не более 25 м, что соответствует порядка 0,1 глубины проникновения плоской электромагнитной волны в землю. Для больших длин заземлителей заметно проявляется затухание электромагнитного поля в земле и выражение для постоянного тока становится непригодным. Сопротивление заземлителя с увеличением его длины уменьшается не так существенно, как для постоянного тока. Кроме того, значительно возрастает индуктивное сопротивление заземлителя, и оно может превышать активное сопротивление. Также с увеличением длины заземлителя сказывается электромагнитное поле самого заземлителя и существенный вклад в сопротивление вносит сопротивление стержня заземлителя. Оно больше для заземлителей меньшего радиуса, а для стальных заземлителей может даже превышать сопротивление растеканию тока в земле. Объясняется это ярко выраженным поверхностным эффектом в стержне стального заземлителя.

В четвертой главе разработан метод расчета импульсных характеристик вертикального заземлителя и приведены результаты их исследования. При этом

учитывались индуктивная составляющая и токи смещения в уравнениях поля, но не принимались в расчет нелинейность вольт-амперных характеристик грунтов и их пробой.

Выполненные исследования показали, что для промышленной частоты начальное приближение (4) и (5) дает незначительные отличия в сравнении с более точным численным методом расчета параметров поля. Анализ зависимостей сопротивлений, рассчитанных по приближенным формулам и более точно, на высоких частотах, выявил, что даже для частот порядка 10^7 Гц отличия не превышают 2 %. С учетом отмеченного для расчета параметров импульсного электромагнитного поля использовали результаты, полученные для начального приближения распределения параметров поля при стекании переменного синусоидального тока. Для этого, используя операторный метод, получены операторные изображения переходных функций векторов плотности тока и напряженности магнитного поля для единичной ступени тока и определены их оригиналы. Итоговое выражение для оригинала переходной функции радиальной составляющей вектора плотности тока в земле при $t \geq 0$ имеет вид:

$$g_{\sigma_{2r}}(r, z, t) = \frac{1}{2\pi r} \begin{cases} g_{1\sigma_r}(z, t) + \frac{l(g_{2\sigma_r}(z, t) - g_{1\sigma_r}(z, t))}{\sqrt{l^2 + (r - r_2)^2}}, & r \in [r_2, \infty); z \in [0, -l]; \\ g_{1\sigma_r}(z, t) \left(1 - \frac{l}{\sqrt{l^2 + (r - r_2)^2}}\right), & r \in [r_2, \infty); z \in (-l, -\infty), \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{где } g_{1\sigma_r}(z, t) = \begin{cases} \beta I_0(\nu) e^{-\frac{\gamma_2 t}{2\varepsilon_2}}, & t > -z\sqrt{\varepsilon_2\mu_2}; \\ 0, & t \leq -z\sqrt{\varepsilon_2\mu_2}; \end{cases}$$

$$g_{2\sigma_r}(z, t) = \begin{cases} \frac{1}{l} - \frac{1}{l} e^{-\frac{\gamma_2 t}{\varepsilon_2}} + 2 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos\left(\frac{k\pi z}{l}\right)}{l \sqrt{1 - \frac{4k^2 \pi^2 \varepsilon_2}{\mu_2 \gamma_2^2 l^2}}} (e^{p_{1k}t} - e^{p_{2k}t}), & t > -z\sqrt{\varepsilon_2\mu_2}; \\ 0, & t \leq -z\sqrt{\varepsilon_2\mu_2}; \end{cases}$$

$\beta = \gamma_2 \sqrt{\mu_2/\varepsilon_2}$; ε_2 – абсолютная диэлектрическая проницаемость земли; $I_0(\chi)$ – модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка; $\nu = \gamma_2 \sqrt{t^2 - \varepsilon_2 \mu_2 z^2} / (2\varepsilon_2)$; $p_{1,2k} = -\gamma_2 \left(1 - \sqrt{1 \pm 4k^2 \pi^2 \varepsilon_2 / (\mu_2 \gamma_2^2 l^2)}\right) / (2\varepsilon_2)$.

Для заземлителя переходная функция определена как для полубесконечного проводящего пространства, так как поверхностный эффект в заземлителе

при стекании импульсного тока ярко выражен. Тогда оригинал переходной функции для вертикальной составляющей вектора плотности тока имеет вид:

$$g_{\sigma_{1z}}(r, z, t) = \begin{cases} g_{H_{2\phi}}(r_2, z, t) \sqrt{\frac{\gamma_1 \mu_1}{\pi t}} e^{-\frac{\gamma_1 \mu_1 (r_2 - r)^2}{4t}}, & t > -z\sqrt{\varepsilon_2 \mu_2}; \\ 0, & t \leq -z\sqrt{\varepsilon_2 \mu_2}, \end{cases} \quad (11)$$

где $g_{H_{2\phi}}(r_2, z, t)$ – оригинал переходной функции угловой составляющей вектора напряженности магнитного поля.

Мгновенные значения проекций вектора плотности тока в земле и заземлителе определены с использованием интеграла Дюамеля:

$$\sigma_{2r}(r, z, t) = \int_0^t i'(\tau) g_{\sigma_{2r}}(r, z, t - \tau) d\tau; \quad \sigma_{1z}(r, z, t) = \int_0^t i'(\tau) g_{\sigma_{1z}}(r, z, t - \tau) d\tau, \quad (12)$$

где $i'(\tau)$ – первая производная тока по времени.

Аналогичным образом получены выражения для угловой составляющей вектора напряженности магнитного поля в земле и заземлителе.

По мгновенным значениям проекций векторов плотности тока и напряженности магнитного поля в земле и заземлителе определены импульсные сопротивления (сопротивление растеканию тока в земле, сопротивление стержня заземлителя и общее сопротивление) и напряжение на заземлителе.

На основании полученных выражений разработана компьютерная программа расчета импульсных характеристик вертикальных заземлителей. Для ее апробации были проведены расчеты установившихся значений сопротивлений при стекании переменного синусоидального тока различной частоты. При моделировании импульсных характеристик в программе задавались две временные зависимости тока молнии: биэкспоненциальная зависимость и зависимость, предложенная F. Heidler и другими, которую предписывают использовать действующие международные и государственные электротехнические стандарты. Вычислительный эксперимент выполнен для обеих зависимостей токов при первом и последующем импульсах тока молнии. Также варьировались: проводимость земли, длина заземлителя, его материал и радиус.

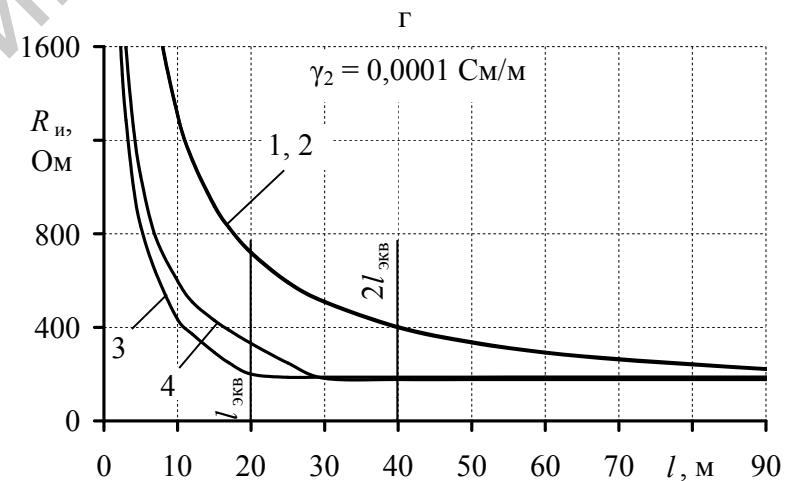
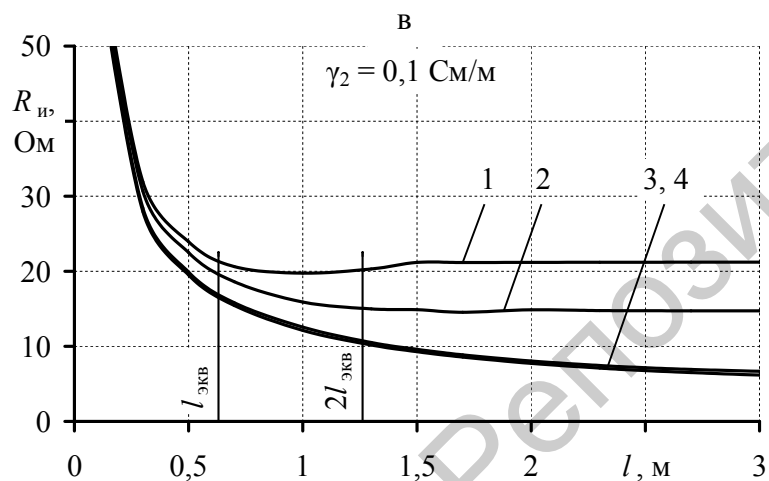
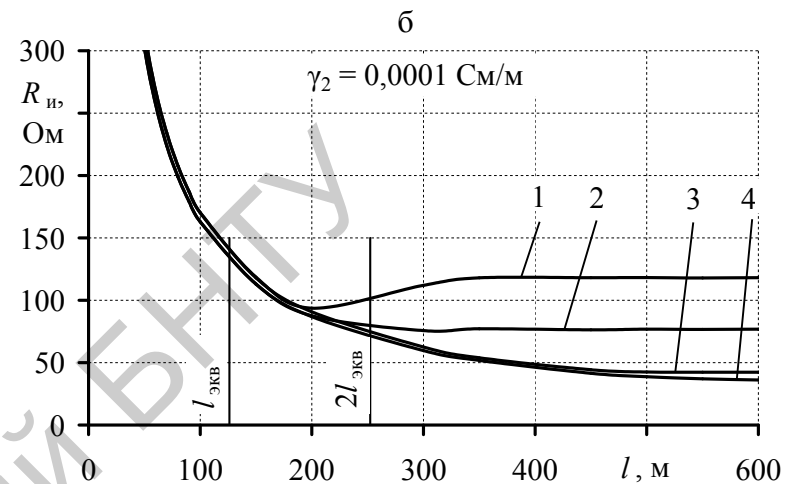
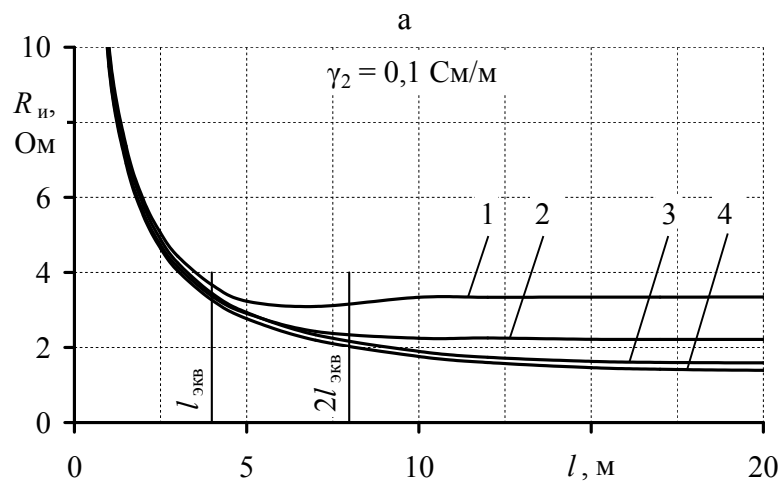
В результате исследования временных зависимостей импульсных сопротивлений установлено, что для первого импульса тока молнии в хорошо проводящих грунтах ($\gamma_2 = 0,1$ См/м) амплитуда напряжения опережает по времени амплитуду тока. С увеличением длины заземлителя существенную роль начи-

нают играть индуктивные свойства земли. Импульсное сопротивление заземлителя больше своего установившегося значения, а с увеличением его длины повышение сопротивления в начальные моменты времени более существенно. В плохо проводящих грунтах ($\gamma_2 = 0,0001$ См/м) для первого импульса тока молнии амплитуды напряжения и тока практически совпадают во времени. Следовательно, ни индуктивные, ни емкостные параметры заземлителя не оказывают заметного влияния, то есть заземлитель в этом случае является сосредоточенным. В первые моменты времени сопротивление меньше установившегося значения, что вызвано существенным влиянием токов смещения (емкостных параметров земли), однако сопротивление возрастает до установившегося значения еще до достижения максимумов тока и напряжения.

Для последующего импульса тока молнии характерно более быстрое изменение тока во времени. В хорошо проводящих грунтах опережение напряжения более существенно (0,4 мкс при длинах заземлителей более 2 м). Пиковые значения импульсных сопротивлений практически не изменяются с увеличением длины заземлителя более 2 м, при этом они в несколько раз (до 20) превышают установившиеся значения. Это свидетельствует о существенном влиянии индуктивных параметров земли, а при длинах более 2 м такой заземлитель можно рассматривать как протяженный. В плохо проводящих грунтах заметно проявляются емкостные параметры земли (токи смещения). Амплитудные значения напряжений отстают от амплитуд тока (на время до 4 мкс), а импульсные сопротивления возрастают в переходном режиме до установившихся значений. В момент максимума тока сопротивления значительно меньше установившихся значений, а при достижении максимума напряжения они соизмеримы с установившимися значениями.

Сравнение результатов, полученных для биэкспоненциальной зависимости и зависимости F. Heidler и других, показало, что максимальные величины напряжений и импульсных сопротивлений меньше до 10 % при использовании второй зависимости.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что импульсные сопротивления существенно зависят от свойств земли и формы импульса тока и значительно изменяются во времени. Для определения зоны стекания тока с заземлителя в землю (активно работающей части заземлителя) в импульсном режиме выполнено исследование импульсных сопротивлений $R_{\text{и}}$ в зависимости от длины заземлителя l . Результаты для стальных заземлителей приведены на рисунке 2. Их анализ выявил, что первоначально с увеличением длины заземлителя происходит значительное снижение сопротивлений. Затем по достижении некоторой эквивалентной длины (начиная с которой заземлитель можно считать протяженным) сопротивления с увеличением длины заземлителя уменьшаются незначительно.



1 – в момент максимума напряжения, ток по биэкспоненциальной зависимости; 2 – в момент максимума напряжения, ток молнии по зависимости F. Heidler и др.; 3 – в момент максимума тока, ток молнии по биэкспоненциальной зависимости; 4 – в момент максимума тока, ток молнии по зависимости F. Heidler и др.

Рисунок 2 – Зависимости импульсного сопротивления $R_{и}$ стальных заземлителей радиусом $r_2 = 6 \text{ мм}$ от длины l для различной проводимости земли при стекании первого (а, б) и последующего (в, г) импульсов тока молнии

При этом импульсные сопротивления, соответствующие максимуму напряжения, значительно больше (в 1,3–3,5 раза) сопротивлений в момент максимума тока.

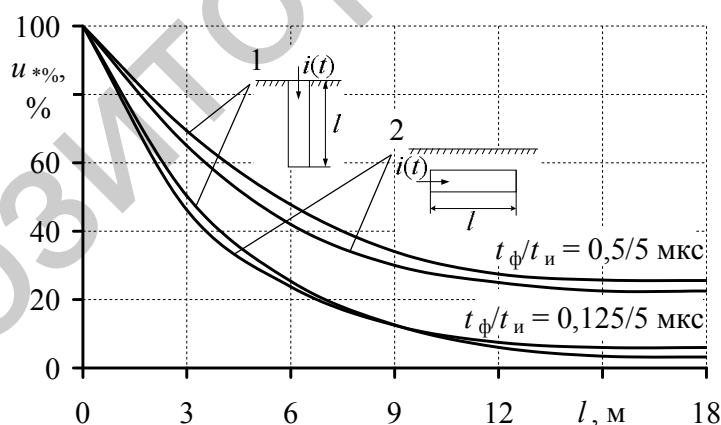
Эквивалентная длина существенно зависит от свойств земли и формы импульса тока. Получен критерий оценки эквивалентной длины заземлителя $l_{\text{ЭКВ}}$ (зоны стекания тока с заземлителя в землю) в импульсном режиме:

$$l_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{\tau}{\gamma_2 \mu_2}}, \quad (13)$$

где $\tau = t_{\text{ф}}/5$ (определяется длительностью фронта импульса тока молнии $t_{\text{ф}}$).

Результаты, приведенные на рисунке 2, показывают, что соотношение (13) достаточно хорошо определяет зону стекания тока с заземлителя в зависимости от свойств земли и формы импульса тока, а при достижении $2l_{\text{ЭКВ}}$ и более сопротивление заземлителя снижается незначительно.

Проведено сравнение распределений относительной величины напряжения $u_{* \%}$ вдоль длины заземлителя l , полученных для вертикального заземлителя, с аналогичными экспериментальными результатами, полученными для горизонтального заземлителя Р. К. Борисовым и другими (рисунок 3). За $u_{* \%} = 100 \%$ принято напряжение в точке ввода импульсного тока $i(t)$ в заземлитель.



1 – разработанный метод расчета импульсных характеристик вертикального заземлителя;
2 – экспериментальные результаты, полученные для горизонтального заземлителя Р. К. Борисовым и др.

Рисунок 3 – Распределение относительной величины напряжения $u_{* \%}$ вдоль длины заземлителей l при различных параметрах импульсного тока

Зависимости, приведенные на рисунке 3, показывают, что распределение напряжения вдоль вертикального и горизонтального заземлителей имеет схожий характер. Отмеченное подтверждает пригодность выражения (13) и для горизонтального заземлителя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработан метод расчета параметров электромагнитного поля вертикального заземлителя при стекании переменного синусоидального тока, отличающийся решением дифференциальных уравнений Максвелла методом конечных разностей в сочетании с методами прогонки и итераций применительно к вертикальному заземлителю и позволяющий определять параметры электромагнитного поля и основные электромагнитные характеристики заземлителей с учетом реального характера изменения во времени стекающего в заземлитель переменного синусоидального тока [2, 4, 5, 7, 8, 10, 11, 13, 14].

2. Получены новые аналитические формулы для приближенного расчета сопротивления стержня заземлителя, сопротивления растеканию переменного тока в земле и напряжения на заземлителе, отличающиеся учетом конечной длины заземлителя и наличия заземлителя с обратным током и обеспечивающие пригодную для практики точность расчета характеристик вертикального заземлителя при любой длине заземлителя по отношению к глубине проникновения плоской электромагнитной волны в землю. Отличия значений, рассчитанных по формулам и разработанному методу, не превышают 6 % [2, 5, 6, 12].

3. Определена зона стекания переменного синусоидального тока с заземлителя в землю, отличающаяся учетом затухания электромагнитного поля вдоль оси заземлителя в земле. Установлено, что для большинства применяемых на практике конструкций вертикальных заземлителей для расчета их сопротивлений на переменном токе промышленной частоты можно использовать общеизвестные выражения, полученные для постоянного тока, а учитывать затухание электромагнитного поля в земле следует при длинах вертикальных заземлителей, превышающих 0,1 глубины проникновения плоской электромагнитной волны в землю [2, 5, 12, 14].

4. Разработан метод расчета импульсных характеристик вертикального заземлителя, отличающийся решением дифференциальных уравнений Максвелла для переходного режима операторным методом при приближенном распределении параметров электромагнитного поля и позволяющий определять импульсные характеристики заземлителей с учетом реального характера изменения тока молнии во времени, индуктивной составляющей и токов смещения. Метод апробирован применительно к переменным синусоидальным токам различной частоты [3, 9].

5. Установлено, что в грунтах с хорошей проводимостью напряжение опережает ток и величины импульсных сопротивлений больше их установив-

шихся значений, а в грунтах с плохой проводимостью, наоборот, ток опережает напряжение и сопротивление в импульсном режиме меньше, чем в установившемся. Для любой проводимости грунта импульсное сопротивление заземлителя в момент максимума напряжения всегда больше (в 1,3–3,5 раза), чем в момент максимума тока [1].

6. Определен новый критерий оценки эквивалентной длины заземлителя (зоны стекания тока с заземлителя в землю) в импульсном режиме, пригодный для практического использования, отличающийся учетом временных параметров импульса тока молнии и электромагнитных свойств земли и обеспечивающий определение длины активно работающей части заземлителя. Установлено, что для длин заземлителей, которые меньше эквивалентной, происходит заметное снижение импульсного сопротивления с увеличением его длины, а при длинах заземлителей, соответствующих двойному значению критерия и более, сопротивление заземлителя снижается несущественно [1].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Результаты диссертационного исследования предназначены специалистам проектных организаций для оценки активно работающей части контура заземляющих устройств при стекании переменного синусоидального тока и импульсных токов молнии.

Методы расчета, компьютерные программы и результаты исследований используются в учебном процессе по дисциплине «Основы научных исследований и инновационной деятельности» кафедры «Электрические станции» БНТУ. Программа и результаты расчетов импульсных сопротивлений заземлителей внедрены в службе релейной защиты, автоматики и измерений РУП «Витебскэнерго» и используются при анализе данных измерений импульсных характеристик контуров заземлений с помощью измерительного комплекса ИК-1. Критерий оценки зоны стекания переменного тока с заземлителя в землю применяется в электротехническом отделе ПИ РУП «Институт «Белжелдорпроект» при проектировании заземляющих устройств тяговых подстанций переменного тока Белорусской железной дороги.

Перспектива дальнейшего развития данной работы заключается в разработке методов и алгоритмов расчета электромагнитных характеристик горизонтальных и сложных заземлителей электроустановок.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи

1. Герасимович, Д. А. Математическое моделирование импульсных характеристик вертикальных стержневых заземлителей / Д. А. Герасимович, Е. А. Дерюгина // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2012. – № 1. – С. 9–16.

2. Герасимович, Д. А. Математическое моделирование электромагнитных характеристик уединенных бесконечно длинных стержневых заземлителей при стекании переменного тока промышленной частоты / Д. А. Герасимович, Е. А. Дерюгина // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2010. – № 4. – С. 5–13.

3. Герасимович, Д. А. Метод расчета электромагнитных характеристик вертикальных стержневых заземлителей при стекании импульсных токов молнии / Д. А. Герасимович, Е. А. Дерюгина // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2011. – № 6. – С. 12–20.

4. Герасимович, Д. А. Метод расчета электромагнитных характеристик уединенного стержневого заземлителя при стекании переменного тока промышленной частоты / Д. А. Герасимович, Е. А. Дерюгина // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2009. – № 5. – С. 21–32.

5. Герасимович, Д. А. Расчет электромагнитных характеристик уединенных вертикальных стержневых заземлителей конечной длины при стекании переменного тока промышленной частоты / Д. А. Герасимович, Е. А. Дерюгина // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2011. – № 2. – С. 22–29.

6. Дерюгина, Е. А. Учет многослойной земли в расчете электромагнитных характеристик уединенных бесконечно длинных стержневых заземлителей при стекании переменного тока / Е. А. Дерюгина // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2010. – № 6. – С. 32–37.

7. Gerasimovich, D. A. Calculating method of electromagnetic field parameters of single grounding electrode / D. A. Gerasimovich, A. A. Dziaruhina // Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review). – 2010. – № 7. – P. 148–150.

Материалы конференций

8. Герасимович, Д. А. Применение метода сеток при расчете заземляющих устройств / Д. А. Герасимович, Е. А. Дерюгина // Наука – образованию, производству, экономике : материалы Седьмой междунар. науч.-техн. конф.,

Минск, 2009 г. : в 3 т. / Белорусский национальный технический университет; редкол. : Б. М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2009. – Т. 1. – С. 25.

9. Дерюгина, Е. А. Частотная характеристика сопротивлений стержневых заземлителей / Е. А. Дерюгина // Наука – образованию, производству, экономике : материалы Девятой междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2011 г. : в 4 т. / Белорусский национальный технический университет; редкол. : Б. М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2011. – Т. 1. – С. 23.

10. Gerasimovich, D. A. Calculating method of electromagnetic field parameters of single grounding electrode / D. A. Gerasimovich, A. A. Dziaruhina // New electrical and electronic technologies and their industrial implementation (NEET 2009) : materials of the 6th International conference, Zakopane, Poland, June 23–26, 2009 / Lublin university of technology; edited by T. Kołtunowicz. – Lublin, 2009. – P. 84.

11. Герасимович, Д. А. Моделирование электромагнитных процессов в вертикальном цилиндрическом заземлителе / Д. А. Герасимович, Е. А. Дерюгина // Состояние и перспективы развития электротехнологии (XIV Бенардосовские чтения) : тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., Иваново, Россия, 29–31 мая 2007 г. : в 2 т. / Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина; редкол. : С. В. Тарарыкин [и др.]. – Иваново, 2007. – Т. 1. – С. 138.

12. Дерюгина, Е. А. Математическое моделирование электромагнитных параметров уединенного стержневого заземлителя / Е. А. Дерюгина, Д. А. Герасимович // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика : тез. докл. Шестнадцатой Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, посвящ. 80-летию Московского энергетического института, Москва, Россия, 25–26 февраля 2010 г. : в 3 т. / Московский энергетический институт (технический университет); редкол. : С. В. Серебрянников [и др.]. – М., 2010. – Т. 3. – С. 478–479.

13. Дерюгина, Е. А. Расчет электромагнитных характеристик вертикальных цилиндрических заземлителей / Е. А. Дерюгина, Д. А. Герасимович // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика : тез. докл. Пятнадцатой Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, Москва, Россия, 26–27 февраля 2009 г. : в 3 т. / Московский энергетический институт (технический университет); редкол. : Н. В. Скибицкий [и др.]. – М., 2009. – Т. 3. – С. 374–375.

14. Дерюгина, Е. А. Исследование электромагнитных параметров вертикальных заземлителей / Е. А. Дерюгина, Д. А. Герасимович // Высокие технологии, фундаментальные исследования, образование : сб. трудов Седьмой междунар. науч.-практ. конф. «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности», Санкт-Петербург, Россия, 28–30 апреля 2009 г. / Российский фонд фундаментальных исследований; под ред. А. П. Кудинова, Г. Г. Матвиенко. – СПб., 2009. – С. 327–329.

РЭЗІЮМЭ

Дзяругіна Алена Аляксандраўна

Электрамагнітныя характарыстыкі вертыкальных заземляльнікаў электраўстановак

Ключавыя словы: вертыкальны заземляльнік, раўнанні Максвела, пераменны сінусаідальны ток, ток маланкі, электрамагнітныя характарыстыкі, актыўна працуючая частка заземляльніка.

Мэта працы – вызначэнне крытэрыяў для практычнай ацэнкі актыўна працуючай часткі заземляльніка пры сцяканні пераменнага сінусаідальнага току і імпульсных токаў маланкі на падставе аналізу электрамагнітных характарыстык вертыкальных заземляльнікаў.

Метады даследавання заснаваны на рашэнні дыферэнцыяльных раўнанняў Максвела для пераменнага сінусаідальнага току метадам канчатковых рознасцей у спалучэнні з метадамі прагонкі і ітэрацыі, а для імпульснага рэжыму выкарыстаны аператарны метады. Апрабацыя атрыманых вынікаў праведзена супастаўленнем з тэарэтычнымі і эксперыментальнымі вынікамі іншых даследчыкаў.

Атрыманыя вынікі і іх навізна. Распрацаваны метады разліку параметраў электрамагнітнага поля вертыкальнага заземляльніка пры сцяканні пераменнага сінусаідальнага току, які дазваляе вызначаць электрамагнітныя характарыстыкі заземляльнікаў з улікам рэальнага характару змены току ў часе. Атрыманы формулы для набліжанага разліку супраціўлення вертыкальнага заземляльніка і напружання на заземляльніку на пераменным сінусаідальным току, якія ўлічваюць згасанне электрамагнітнага поля ў заземляльніку і зямлі. Распрацаваны метады разліку імпульсных характарыстык вертыкальнага заземляльніка, які дазваляе вызначаць характарыстыкі заземляльнікаў з улікам рэальнага характару змены току маланкі ў часе, індуктыўнай састаўляльнай і токаў зрушэння. На падставе вынікаў праведзеных даследаванняў вызначаны крытэрыі ацэнкі актыўна працуючай часткі заземляльніка ў стацыянарным і імпульсным рэжымах, якія адрозніваюцца ўлікам параметраў току і ўласцівасцей зямлі.

Вынікі працы выкарыстоўваюцца ў вучэбным працэсе кафедры «Электрычныя станцыі» БНТУ, у службе рэлейнай засцярогі, аўтаматыкі і вымярэнняў РУП «Віцебскэнерга» і ў электратэхнічным адзеле ПД РУП «Інстытут «Белчыгунпраект».

Галіна прымянення атрыманых у дысертацыі вынікаў – электраэнергетыка (прыстасаванні заземлення электраўстановак).

РЕЗЮМЕ

Дерюгина Елена Александровна

Электромагнитные характеристики вертикальных заземлителей электроустановок

Ключевые слова: вертикальный заземлитель, уравнения Максвелла, переменный синусоидальный ток, ток молнии, электромагнитные характеристики, активно работающая часть заземлителя.

Цель работы – определение критериев для практической оценки активно работающей части заземлителя при стекании переменного синусоидального тока и импульсных токов молнии на основании анализа электромагнитных характеристик вертикальных заземлителей.

Методы исследования основаны на решении дифференциальных уравнений Максвелла для переменного синусоидального тока методом конечных разностей в сочетании с методами прогонки и итераций, а для импульсного режима применен операторный метод. Апробация полученных результатов проведена сопоставлением с теоретическими и экспериментальными результатами других исследователей.

Полученные результаты и их новизна. Разработан метод расчета параметров электромагнитного поля вертикального заземлителя при стекании переменного синусоидального тока, который позволяет определять электромагнитные характеристики заземлителей с учетом реального характера изменения тока во времени. Получены формулы для приближенного расчета сопротивления вертикального заземлителя и напряжения на заземлителе на переменном синусоидальном токе, учитывающие затухание электромагнитного поля в заземлителе и земле. Разработан метод расчета импульсных характеристик вертикального заземлителя, позволяющий определять характеристики заземлителей с учетом реального характера изменения тока молнии во времени, индуктивной составляющей и токов смещения. На основании результатов проведенных исследований определены критерии оценки активно работающей части заземлителя в стационарном и импульсных режимах, отличающиеся учетом параметров тока и свойств земли.

Результаты работы используются в учебном процессе кафедры «Электрические станции» БНТУ, в службе релейной защиты, автоматики и измерений РУП «Витебскэнерго» и в электротехническом отделе ПИ РУП «Институт «Бельжелдорпроект».

Область применения полученных в диссертации результатов – электроэнергетика (заземляющие устройства электроустановок).

SUMMARY

Dziaruhina Alena

Electromagnetic Parameters of Vertical Grounding Electrodes of Electrical Installations

Keywords: vertical grounding electrode, Maxwell equations, alternating current, lightning current, electromagnetic parameters, active operating part of grounding electrode.

Purpose of the work is determination of criteria for practical estimation of active operating part of grounding electrode at alternating current and lightning currents flowing on the basis of analysis of electromagnetic parameters of vertical grounding electrodes.

Research methods are based on solving Maxwell differential equations with finite difference method in combination with sweep and iteration methods for alternating current, and operational method is used for transient condition. Approximation of the obtained results is carried out by comparison with theoretical and experimental results of different researchers.

Obtained results and their novelty. The method of calculation of electromagnetic parameters of vertical grounding electrode at alternating current flowing that allows determining electromagnetic parameters of grounding electrodes with current time behavior is developed. The expressions for approximate calculation of grounding electrode resistance and grounding electrode voltage at alternating current considering electromagnetic field attenuation in electrode and ground are obtained. The method of calculation of transient parameters of vertical grounding electrode that allows determining parameters of grounding electrode with lightning current time behavior, inductive component and displacement currents is developed. On the basis of research results the criteria for estimation of active operating part of grounding electrode at steady-state and transient conditions considering current parameters and properties of ground are determined.

The results of work are used in curriculum of Power Station Chair at BNTU, in service of relay protection, automation and measurement at RUE "Vitebskenergo" and in electrotechnical department at DS RUE "Institute "Belzheldorproject".

Application field of the obtained results in the thesis is electrical power engineering (ground grid of electrical installations).

Научное издание

ДЕРЮГИНА Елена Александровна

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЗАЕМЛИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 05.14.02 – Электрические станции
и электроэнергетические системы

Подписано в печать 10.10.2012. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 1,28. Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 60. Заказ 1325.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический
университет. ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.