

На правах рукописи

Чер

Черепанов Алексей Викторович

**МОДЕЛИ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЗАЗЕМЛИТЕЛЕЙ
В ГРУНТЕ С ЧАСТОТНО-ЗАВИСИМЫМИ ПАРАМЕТРАМИ**

Специальность: 05.09.05 – Теоретическая электротехника

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Вологда – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Вологодский государственный университет» на кафедре электротехники

- Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Шишигин Сергей Леонидович
- Официальные оппоненты: **Ефимов Борис Васильевич**
доктор технических наук, профессор,
Центр физико-технических проблем энергетики Севера – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», г. Апатиты, главный научный сотрудник
- Ярмаркин Михаил Кириллович**
кандидат технических наук, доцент,
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение дополнительного профессионального образования «Петербургский энергетический институт повышения квалификации», г. Санкт-Петербург, заведующий кафедрой «Электроэнергетическое оборудование электрических станций, подстанций и промышленных предприятий»
- Ведущая организация: «23 Государственный морской проектный институт - филиал акционерного общества «31 Государственный проектный институт специального строительства», г. Санкт-Петербург

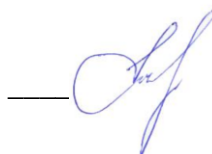
Защита состоится «17» декабря 2019 в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.16 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, Главный учебный корпус, ауд. 284.

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

Автореферат разослан «___» _____

Ученый секретарь,
диссертационного совета Д 212.229.16

к.т.н.



— Резник Александр Сергеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований и степень ее разработанности. Заземлители играют ключевую роль в обеспечении электробезопасности, электромагнитной совместимости и молниезащиты электрических подстанций (ПС), воздушных линий (ВЛ), других объектов электроэнергетики и промышленности. Основные трудности вызывает проектирование заземлителей в высокоомном грунте (скальном, песчаном, вечномёрзлом), характерном для многих регионов нашей страны, включая перспективные районы Арктики.

Значительный вклад в становление теории заземлителей внесли В.В. Бургсдорф, Е.С. Колечицкий, А.Б. Ослон, А.И. Якобс, Н.В. Коровкин, Ю.В. Целебровский, С.Л. Шишигин и многие иностранные ученые. Современный уровень экспериментальных исследований в России достигнут работами Р.К. Борисова, С.И. Кривошеева, Б.В. Ефимова и других сотрудников Центра физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра РАН (ЦЭС КНЦ РАН).

Существующая теория заземлителей базируется на допущении, что удельная проводимость грунта есть величина постоянная, не зависящая от частоты. В действительности, удельная проводимость и диэлектрическая проницаемость грунта являются частотно-зависимыми параметрами, что установлено еще П. Дебаем и Х. Фалькенхагеном, К.S. Cole и R.H. Cole (для электролитов), Скотом, Смитом, Лонгмаером, Мессиром, Висакро, Портела, Алипио. Удельная проводимость высокоомного грунта на частоте 1 МГц в несколько раз больше, чем на частоте 100 Гц, что приводит к существенному снижению сопротивления заземлителей и перенапряжений ВЛ (до 100% по данным иностранных исследователей) при воздействии импульсов тока молнии.

Таким образом, классическая модель грунта с удельной проводимостью $\sigma = \sigma_0$, измеренной на низкой частоте и принимаемой постоянной во всем частотном диапазоне тока молнии (до 1 МГц), не является адекватной для высокоомного грунта. Переход к модели грунта с частотно-зависимыми параметрами (ЧЗП) и связанная с ней модернизация и разработка моделей и методов расчета заземлителей – актуальная задача, имеющая теоретическое и практическое значение.

Для численных расчетов заземлителей в грунте с ЧЗП исследователи выбирают частотный метод. Причина понятна – переход к модели грунта с ЧЗП не требует изменения модели заземлителя, методов расчета и компьютерных программ. Однако область применения частотного метода ограничена (линейными задачами). К новым проблемам частотного метода в грунте с ЧЗП относится нарушение принципа причинности (при нулевом токе в начальный момент времени напряжение заземлителя не равно нулю), что объясня-

ется ограниченным частотным диапазоном экспериментальных данных. Итерационные методики, экстраполяция экспериментальных данных позволяют в значительной мере устранить проблему, но увеличивают трудоемкость решения.

Таким образом, расчеты заземлителей в грунте с ЧЗП следует проводить не в частотной, а во временной области. Однако возникает проблема моделирования частотно-зависимых сопротивлений и проводимостей. Среди известных методик – расчеты на эквивалентной частоте тока молнии неточны, замена сопротивления $z(j\omega)$ схемой замещения с близкими частотными характеристиками не обладает общностью и трудоемка.

Универсальная методика моделирования частотно-зависимого сопротивления $z(j\omega)$ дискретной схемой во временной области разработана научным руководителем. Ее развитие и применение для моделирования заземлителей в грунте с ЧЗП – перспективное направление, разрабатываемое в диссертационной работе.

Измерения сопротивлений заземлителей опор ВЛ с тросом проводятся импульсным методом. В высокоомном грунте наблюдается «емкостной эффект» – сопротивление заземлителя при импульсных воздействиях монотонно возрастает, что в настоящее время объясняется процессом заряда емкости заземлителя C , включенной параллельно стационарному сопротивлению R ($R||C$ –модель). Но при обработке экспериментальных данных емкость заземлителя $R||C$ –модели сильно завышена (соответствующая ей диэлектрическая проницаемость грунта на порядок превышает типовые значения).

Переход к модели грунта с ЧЗП дает иное, более адекватное объяснение «емкостного эффекта». Он вызван изменением электропроводности грунта в ходе переходного процесса, поэтому параметры $R||C$ –модели также изменяются во времени.

В задачах грозозащиты заземлители описываются импульсным сопротивлением $R_i = \max u(t) / \max i(t)$ и мгновенным сопротивлением $r(t) = u(t) / i(t)$. Эти параметры включены в нормативные документы, для их измерения разработаны серийно выпускаемые приборы. В теоретической электротехнике электрическая цепь при воздействии импульсного тока характеризуется переходным сопротивлением $z(t) = L^{-1}[Z(s) / s]$, $Z(s) = U(s) / I(s)$, численно равным входному напряжению при воздействии единичной функции тока, где $U(s)$, $I(s)$ – операторные изображения напряжения и тока. Анализ переходного сопротивления заземлителей в высокоомном грунте (аналитически и численно) позволяет выявить принципиальные недостатки, возникающие в настоящее время при обработке данных измерений импульсным методом на основе мгновенного сопротивления заземлителя, и предложить новые подходы на основе переходного сопротивления $z(t)$.

Целью работы является разработка моделей и методов расчета заземлителей при импульсных воздействиях в грунте с ЧЗП во временной области, их применение для расчета заземлителей ВЛ и ПС в высокоомном грунте, включая анализ погрешностей, допускаемых в настоящее время из-за использования классической модели грунта, для повышения адекватности проектирования заземлителей в высокоомных грунтах.

Для достижения поставленной цели задачи исследования включали:

1. Исследование существующих моделей грунта с ЧЗП.
2. Аналитические расчеты эквипотенциальных заземлителей в грунте с ЧЗП.
3. Разработку дискретной во времени модели заземлителя в грунте с ЧЗП.
4. Расчет заземлителей в грунте с ЧЗП, сопоставление с аналогичными расчетами в классической модели грунта.
5. Выявление новых закономерностей импульсных процессов в заземлителях, связанных с учетом частотных характеристик электропроводности грунта.
6. Исследование импульсного метода измерений сопротивлений заземлителей в грунте с ЧЗП.

Научная новизна представленной работы заключается в следующем:

1. Выполнено аналитическое исследование переходного сопротивления эквипотенциального заземлителя в грунте с ЧЗП; получена формула расчета стационарного сопротивления заземлителя по данным измерения переходного сопротивления в произвольный момент времени.
2. Разработана дискретная во времени модель заземлителя в грунте с ЧЗП, позволяющая проводить расчеты импульсных процессов наиболее эффективными методами – методом дискретных схем и методом Влаха.
3. Выявлены новые закономерности развития перенапряжений заземлителей при импульсных токах, а именно – существенное сглаживание фронта импульса напряжения и затухание амплитуды импульса, что облегчает выбор средств защиты от грозовых перенапряжений.
4. Исследован импульсный метод измерений сопротивления заземлителей опор ВЛ в грунте с ЧЗП. Показано, что введение нового поправочного множителя, учитывающего частотные свойства грунта, существенно повышает точность определения стационарного сопротивления.

Теоретическая значимость. Получено аналитическое выражение переходного сопротивления эквипотенциального заземлителя в грунте с ЧЗП. Разработана дискретная во времени модель заземлителя в грунте с ЧЗП, отличающаяся общностью, простотой. Об-

ласть применения метода дискретных схем и метода Влаха расширена на задачи, которые ранее решались только частотным методом. Выявлены новые закономерности растекания импульсных токов заземлителей в высокоомных грунтах, а именно – существенное сглаживание фронта и уменьшение амплитуды импульса напряжения по сравнению с классической моделью грунта. Импульсы с коротким фронтом и малой длительностью (срезанные импульсы) затухают в максимальной степени (в 2 и более раза). Доказано (аналитически и численно), что частотные свойства грунта вызывают значительную (десятки процентов) погрешность измерения стационарного сопротивления заземлителя опоры ВЛ с тросом в высокоомном грунте и предложена аналитическая формула для ее устранения. Результаты работы дают основание к использованию переходного сопротивления (реакция на единичную функцию тока) вместо мгновенного сопротивления при расчете импульсных процессов в теории заземлителей.

Практическая значимость. Разработана модель заземлителя в грунте с ЧЗП, которая легко реализуется в стандартных компьютерных программах, повышает адекватность расчетов заземлителей в высокоомном грунте и обоснованность проектных решений. Даны рекомендации по повышению точности измерений стационарного сопротивления опор ВЛ в высокоомном грунте импульсным методом. Результаты работы могут быть использованы для совершенствования нормативных документов по заземлению и грозозащите.

Методология и методы исследования. Основу методологии работы составляют положения теоретической электротехники и теории заземлителей. Использованы численные методы расчета электромагнитных процессов и полей. Проводилось компьютерное моделирование в системе Mathcad и в программе ЗУМ.

Основные результаты, выносимые на защиту:

1. Результаты аналитических расчетов переходного сопротивления эквипотенциальных заземлителей в грунте ЧЗП при импульсных воздействиях.
2. Дискретная во времени модель заземлителя в грунте с ЧЗП, позволяющая проводить расчеты импульсных процессов заземлителей методом дискретных схем и методом Влаха.
3. Результаты численного моделирования импульсных процессов заземлителей в грунте с ЧЗП, включая исследование и объяснение эффекта сглаживания фронта и затухания амплитуды импульса напряжения.
4. Результаты исследования импульсного метода измерения сопротивления заземлителей опор ВЛ в грунте с ЧЗП, включая формулу по определению стационарного сопротивления заземлителя по данным измерений в произвольный момент времени.

Достоверность результатов обеспечивается: применением стандартных численных методов электротехники и вычислительной математики; расчетов заземлителей во временной области совместно с расчетами в частотной области, где достоверность моделирования заземлителей в грунте с ЧЗП не вызывает сомнений, использованием стандартной программы ЗУМ, сравнением с экспериментальными и численными результатами других исследователей.

Апробация результатов. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и российских конференциях в том числе: 5 и 6 Росс. конференциям по молниезащите (Санкт-Петербург 2016, 2018 гг.), 3 и 4 Всеросс. НТК «ТехноЭМС» (Москва 2016, 2017 гг.), 9 Всеросс. форуме студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и инновации в технических университетах» (Санкт-Петербург 2015 г.), 8 Межд. НПК «Современные материалы, техника и технологии» (Курск 2018 г.), 9 Межд. НПК «Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации» (Курск 2019 г.), 15 Всеросс. НТК «Вузовская наука – региону» (Вологда 2017 г.), Межд. научной конференции «Молодые исследователи – регионам» (Вологда 2015 г.), Научной сессии студентов и аспирантов (Вологда 2015 г.), Межд. конференции ИНФОС (Вологда, 2019 г.), научном семинаре кафедры ТЭЭ СПбПУ Петра Великого (2018, 2019 гг.).

Публикации. Основные научные и практические результаты диссертационной работы опубликованы в 15 печатных работах, в том числе 4 в изданиях, рекомендованных ВАК (из них 1 издание входит в Scopus).

Внедрение результатов. Результаты диссертационной работы внедрены в практику проектирования ООО «ВПСК» (г. Вологда) и ООО «Энергопроект Центр» (г. Вологда).

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, включающего 94 наименования (40 иностранных), и двух приложений (7 страниц). Общий объем работы – 117 страниц, число рисунков – 46, число таблиц – 2.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе дан обзор математических моделей и методов теории заземлителей, приведены существующие модели грунта с ЧЗП, согласно которым удельная проводимость высокоомного грунта ($\sigma_0 < 1$ мСм/м) возрастает в несколько раз при увеличении частоты со 100 Гц до 1 МГц (рисунок 1). Хорошо проводящий грунт частотными свойствами

не обладает (рисунок 1), поэтому классическая модель грунта, где $\sigma = \sigma_0$, здесь точна. Для последующего анализа выбрана наиболее простая модель грунта Мессира и современная модель грунта Алипио-Висакро (2014 г).

В теории электроразведки (Б.К. Матвеев) дано описание физических процессов, вызывающих частотные свойства электропроводности грунта. Проводимость грунта обусловлена наличием электролита. Ток в электролите представляет собой движение ионов. Под действием внешнего поля электролит поляризуется, возникает внутреннее электрическое поле, направленное встречно внешнему полю, что препятствует протеканию тока и снижает проводимость. С увеличением частоты ионы не успевают переместиться вслед за внешним полем, поэтому процессы поляризации ослабевают, а удельная проводимость увеличивается. При импульсном воздействии внутреннее поле запаздывает во времени. При гармоническом воздействии внутреннее поле отстает по фазе, поэтому удельная проводимость $\sigma = \sigma_R + j\sigma_I$ – комплексная величина. С учетом емкостной составляющей комплексная удельная проводимость грунта равна

$$\sigma(j\omega) = \sigma + j\omega\varepsilon = \sigma_R + j\omega\varepsilon', \quad \varepsilon' = \varepsilon + \sigma_I / \omega,$$

где ε' – эквивалентная диэлектрическая проницаемость грунта, которая может достигать больших значений за счет второго слагаемого.

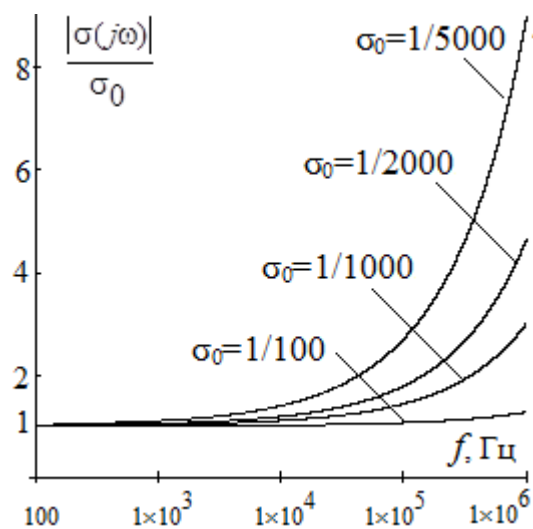


Рисунок 1 – Удельная проводимость грунта по Алипио-Висакро

Во второй главе решены основные теоретические задачи диссертационной работы.

Модели грунта с ЧЗП. Частотные характеристики удельной проводимости и диэлектрической проницаемости грунта предложены Мессиром в виде

$$\sigma(f) = \sigma_0 \left(1 + \sqrt{4\pi f \varepsilon / \sigma_0} \right), \quad \varepsilon(f) = \varepsilon \left(1 + \sqrt{\sigma_0 / \pi f \varepsilon} \right), \quad 100 \leq f \leq 10^6,$$

где σ_0 – удельная проводимость на частоте 100 Гц, ε – диэлектрическая проницаемость на высокой частоте ($\varepsilon = 8\varepsilon_0$ по Мессиру).

Переход к удельной проводимости грунта в комплексной форме

$$\sigma(j\omega) = \sigma(f) + j\omega\varepsilon(f) = \sigma_0 \left(1 + j\omega\varepsilon / \sigma_0 + 2\sqrt{j\omega\varepsilon / \sigma_0} \right), \quad (1a)$$

делает запись более компактной и удобной для последующих преобразований, чем оригинал. Первые два слагаемых определяют активно-емкостную удельную проводимость в

классической модели грунта, третье слагаемое вызвано частотными свойствами грунта (Глава 1).

Модель грунта Алипио-Висакро также преобразована к комплексной форме

$$\sigma(j\omega) = \sigma(f) + j\omega\varepsilon(f) = \sigma_0 \left(1 + j\omega\varepsilon/\sigma_0 + 2.37(10^{-3}/\sigma_0)^{0.73-n} (j\omega\varepsilon/\sigma_0)^n \right), \quad (16)$$

где $n=0.54$, $\varepsilon=12\varepsilon_0$ – средние значения.

Параметры эквипотенциального заземлителя в грунте с ЧЗП по Мессигу (1а).

Операторное сопротивление

$$Z(s) = R / \left(1 + s\varepsilon / \sigma_0 + 2\sqrt{s\varepsilon / \sigma_0} \right) = R / \left(1 + \sqrt{s\varepsilon / \sigma_0} \right)^2,$$

где R – стационарное сопротивление.

Переходное сопротивление

$$z(t) = L^{-1} \left[\frac{Z(s)}{s} \right] = k(t)R, \quad k(t) = \frac{z(t)}{R} = L^{-1} \left[\frac{1}{s \left(1 + \sqrt{s\varepsilon / \sigma_0} \right)^2} \right] \approx \frac{1}{1 + 2(\varepsilon / \sigma_0 t)^{0.61}}, \quad t > 0, \quad (2)$$

Приближенное выражение в (2) найдено методом наименьших квадратов (с погрешностью менее 1% в практическом диапазоне параметра ε / σ_0).

Стационарное сопротивление связано с переходным сопротивлением $z(t)$

$$R = z(t) / k(t), \quad (3)$$

где $k(t)$ определено в (2).

Мгновенное сопротивление заземлителя на фронте импульса косоугольной формы

$$r(t) = \frac{u(t)}{i(t)} = \frac{R \int_0^t k(x) \cdot i'(t-x) dx}{i(t)} = R \cdot k_1(t), \quad k_1(t) = \frac{1}{t} \int_0^t k(x) dx \approx \frac{1}{1 + 3.2(\varepsilon / \sigma_0 t)^{0.56}}, \quad 0 < t \leq T_1,$$

где $u(t)$ определяется интегралом Дюамеля, $k(t)$ определено в (2), T_1 – длительность фронта импульса тока, приближенное значение $k_1(t)$ получено методом наименьших квадратов. Это выражение позволяет оценить максимальное напряжения на изоляции опоры, равное напряжению заземлителя в высокоомном грунте, $U=r(T_1)I$ при ударе молнии с током I .

Установлено (рисунок 2), что мгновенное сопротивление $r(t)$ в грунте с ЧЗП существенно зависит от формы импульса тока, поэтому не является универсальной характеристикой заземлителя, в отличие от переходного сопротивления.

На спаде тока $r(t)$ сильно возрастает так, что в установившемся режиме превышает стационарное сопротивление (рисунок 2), поэтому построение эквивалентных схем заземлителей (опор ВЛ) на основе мгновенного сопротивления сопряжено с погрешностью.

В грунте с ЧЗП заземлитель следует описывать переходным сопротивлением.

Импульсное сопротивление заземлителя $R_i = \max u(t) / \max i(t)$ в высокоомном грунте меньше стационарного $R_i < R$, поэтому моделирование заземлителя опоры ВЛ стационарным сопротивлением в задачах грозозащиты дает решение «с запасом».

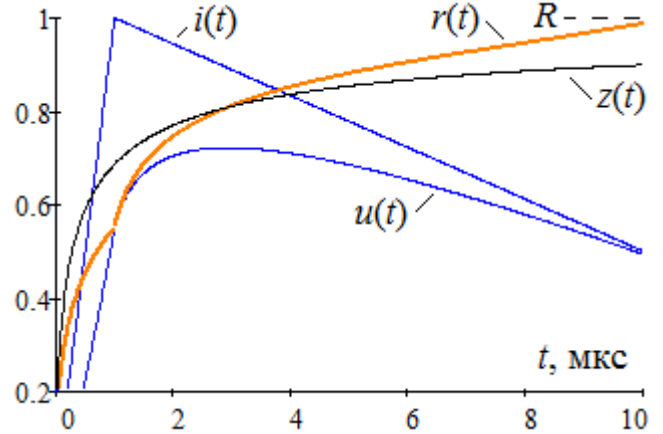


Рисунок 2– Параметры заземлителя при воздействии косоугольного импульса тока, $T_1=1$ мкс, $T_2=10$ мкс, $R=1$ Ом; $\sigma_0=1$ мСм/м, $\epsilon=10\epsilon_0$

Погрешность классической модели грунта оценивалась аналитически при воздействии на заземлитель стандартизированных импульсов напряжения. В грунте с ЧЗП (1а) ток заземлителя больше, чем в классической модели грунта в $i(t) / i_0(t)=1+\delta(t)$ раз, где относительная погрешность

$$\delta(t) = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{\sqrt{\epsilon/\sigma_0 t}}{1+\epsilon/\sigma_0 t} \text{ при } u(t)=t, \quad \delta(t) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{\epsilon/\sigma_0 t} \text{ при } u(t)=1(t)$$

составляет десятки процентов. Длительность переходного процесса

$$T = \frac{16}{\pi \cdot \delta(T)^2} \tau \text{ при } u(t)=t, \quad T = \frac{4}{\pi \cdot \delta(T)^2} \tau \text{ при } u(t)=1(t)$$

составляет десятки микросекунд (из условия $\delta(T)=5\%$), что на 2-3 порядка больше, чем в классической модели грунта, равной 3τ , где $\tau = \epsilon/\sigma_0$ – постоянная времени.

ЧИСЛЕННЫЕ РАСЧЕТЫ ЗАЗЕМЛИТЕЛЕЙ ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ производятся методом дискретных схем и методом Влахса. Временной интервал разбивается на N равных шагов малой длины h . На каждом шаге индуктивности и емкости заменяются дискретными схемами с постоянными сопротивлениями R , проводимостями G_0 и переменными источниками ЭДС и тока (рисунок 3).

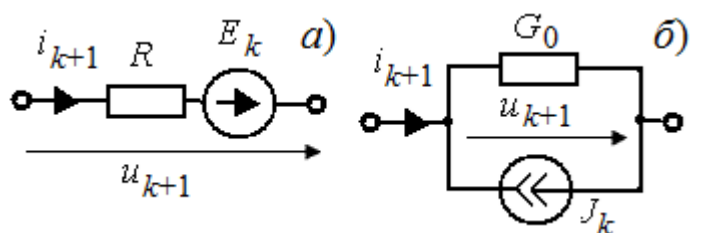


Рисунок 3– Дискретная схема индуктивности (а) и емкости (б) на k -временном шаге

Произвольные частотно-зависимые сопротивления и проводимости также сводятся к дискретным схемам (рисунок 3), как показано в работах научного руководителя. Параметры схемы (рисунок 3б) для проводимости $Y(j\omega)$ равны

$$G_0 = Y_0, J_{k+1} = Y_0 \cdot u_{k+1} - \sum_{m=1}^k (Y_{k-m} - Y_{k-m+1}) u_m, k = 0..N-1, \quad (4)$$

где Y_k – дискретная переходная проводимость k -ого шага. Порядок ее расчета

$$Y(j\omega) \Rightarrow Y(s) \Rightarrow y(t) = L^{-1} [Y(s)/s^2] \Rightarrow Y_k = [y(kh+h) - y(kh)]/h.$$

Дискретная во времени модель заземлителя в грунте с ЧЗП. Рассмотрим эквипотенциальный заземлитель (короткий стержень, сфера) со стационарным сопротивлением R . В грунте с удельной проводимостью (1а) операторная проводимость заземлителя равна

$$Y(s) = G \left[1 + s\varepsilon / \sigma_0 + 2\sqrt{s\varepsilon / \sigma_0} \right] = G + sC + 2\sqrt{sGC}, \quad (5)$$

где $G=1/R$ – стационарная проводимость, C – емкость заземлителя.

Дискретная проводимость третьего слагаемого (5)

$$Y_k = \frac{y(kh+h) - y(kh)}{h} = 4G \sqrt{\frac{\varepsilon}{\sigma_0 \pi h}} (\sqrt{k+1} - \sqrt{k}), \text{ где } y(t) = L^{-1} \left[\frac{2G\sqrt{s\varepsilon/\sigma_0}}{s^2} \right] = 4G \sqrt{\frac{\varepsilon}{\sigma_0 \pi}} t,$$

что дает параметры (4) дискретной схемы замещения (рисунок 2б).

Таким образом, заземлителю с операторной проводимостью (5) соответствует дискретная схема во временной области (рисунок 4). Проводимости и источники тока ветвей схемы (рисунок 4) суммируются, поэтому переход к модели грунта с ЧЗП не приводит к усложнению дискретной модели заземлителя во временной области.

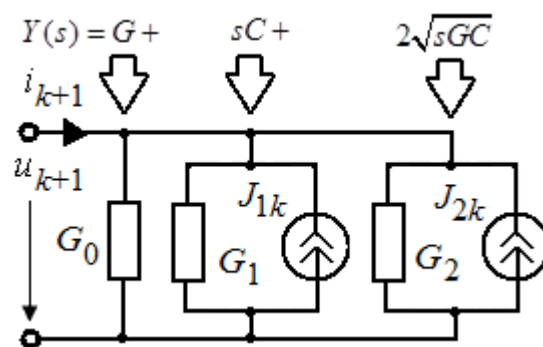


Рисунок 4– Дискретная схема заземлителя с проводимостью $Y(s)$ на k -временном шаге

Аналогичные преобразования выполнены для модели грунта Алипио-Висакро, что подтверждает общность разработанной модели.

Сложные заземлители дробятся на элементы малой длины, поэтому проводимость заземлителя $\mathbf{G}=\mathbf{R}^{-1}$ – квадратная матрица собственных и взаимных проводимостей элементов, где \mathbf{R} – матрица сопротивлений (растеканию тока) заземлителя. Дискретная схема (рисунок 4) используется для всех собственных и взаимных проводимостей матрицы \mathbf{G} .

Достоверность разработанной модели подтверждена сопоставлением с результатами расчета частотным методом.

В третьей главе численно решены практические задачи.

Импульсные процессы заземлителя в грунте с ЧЗП. Удельная проводимость грунта максимальна в начале переходного процесса, далее монотонно убывает, асимптотически приближаясь к установившемуся значению σ_0 в течение десятков микросекунд, что при-

водит к сглаживанию фронта и снижению максимума напряжения заземлителя при воздействии тока молнии. Чем ниже проводимость грунта и короче фронт воздействующего импульса тока, тем сильнее сглаживание фронта импульса напряжения.

Уровень снижения максимума напряжения определяется длительностью спада импульса тока. При воздействии типичного импульса тока молнии с коротким фронтом и относительно длительным спадом (выбран стандартный грозовой импульс), максимум напряжения уменьшается на 30% (рисунок 5а). С увеличением длительности импульса (при неизменном фронте) снижение будет меньше, а в пределе (для бесконечно длинного импульса) уменьшение максимума не происходит. Причина в том, что при сглаживании фронта импульса максимум напряжения смещается за фронт волны, но если ток к этому моменту затухает незначительно, то и снижение максимума напряжения мало.

И наоборот. При воздействии короткого (срезанного) импульса тока, который возникает, например, при обратном перекрытии изоляции опоры ВЛ, происходит существенное снижение максимума напряжения (больше, чем в два раза), поскольку в момент максимума напряжения ток существенно затухает (рисунок 5б).

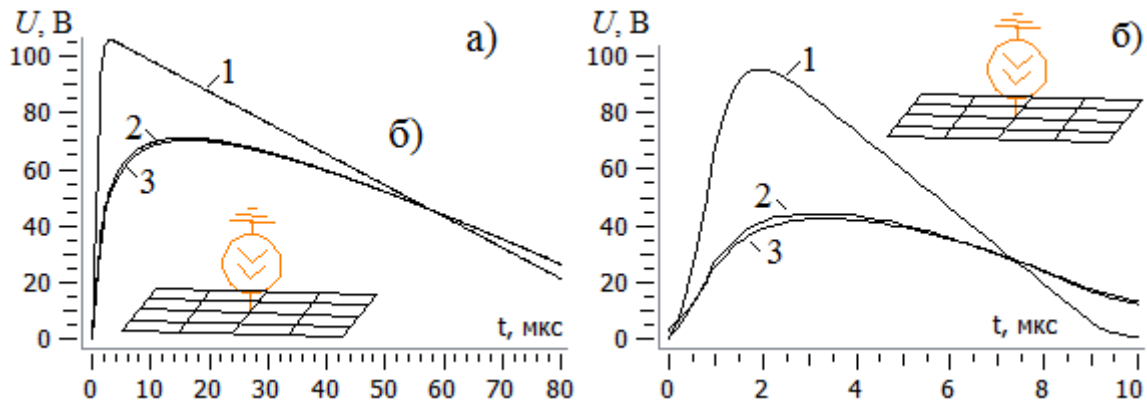


Рисунок 5– Потенциал заземлителя при вводе импульса тока амплитудой 1 А с линейным фронтом: а) 1.2/50 мкс б) 1/5 мкс в грунте: 1– $\sigma=\sigma_0$; 2,3 –с ЧЗП; рассчитанный: 2– методом Влаха, 3– частотным методом; $\sigma_0=0.2$ мСм/м, $\epsilon_r=10$.

Таким образом, частотная зависимость удельной проводимости грунта – новый фактор, приводящий к ослаблению волны с крутым фронтом в ВЛ с высокоомным грунтом (аналогично импульсной короне проводов ВЛ).

Расчеты, выполненные в частотной и временной области (рисунок 5, графики 2 и 3), хорошо согласуются, что подтверждает достоверность разработанной дискретной во времени модели заземлителя в грунте с ЧЗП.

Частотная характеристика опоры существенно меняется при переходе от классической модели грунта к модели грунта с ЧЗП (рисунок б).

На частотах 100-200 кГц сопротивление опоры с заземлителем в высокоомном грунте в 2-2.5 раза меньше стационарного сопротивления. Увеличение емкости заземлителя в грунте с ЧЗП приводит к смещению резонансных частот, поэтому на частотах около 1 МГц сопротивление опоры больше, чем в классической модели грунта, несмотря на снижение активного сопротивления заземлителя.

Обработка данных импульсного эксперимента.

В работах ЦЭС КНЦ РАН приведены осциллограммы тока и напряжения заземлителя опоры ВЛ без троса в высокоомном грунте ($\sigma_0=1/3000$ См/м), рассчитано мгновенное сопротивление $r(t)=u(t)/i(t)$ и на его основе получена R||C схема замещения заземлителя, где $R=429$ Ом, $C=9.2$ нФ (рисунок 7). Из условия $RC=\epsilon/\sigma_0$ эквивалентная диэлектрическая проницаемость грунта равна $\epsilon'=149\epsilon_0$, что находит объяснение только в модели грунта с ЧЗП (Глава 1).

По осциллограммам напряжения и тока рассчитывается переходное сопротивление заземлителя $z(t)$ (рисунок 7), которое заметно отличается от $r(t)$, как и при аналитических расчетах (рисунок 2). При заданном (измеренном) значении σ_0 и начальном приближении ϵ находим стационарное сопротивление R по формуле (3). Проводим уточнение ϵ из условия минимума среднеквадратичного отклонения переходного сопротивления, полученного экспериментально и теоретически (2). Пересчитываем R . По модели грунта Мессира имеем $R=457$ Ом, $\epsilon_r=18$; по модели грунта Алипио-Висакро $R=422$ Ом (2% различие с данными ЦЭС КНЦ РАН), $\epsilon_r=16$.

Решены другие задачи ЦЭС КНЦ РАН, где модель грунта Алипио-Висакро давала хорошее совпадение стационарного сопротивления заземлителя с результатами измерений, при типовых значениях диэлектрической проницаемости.

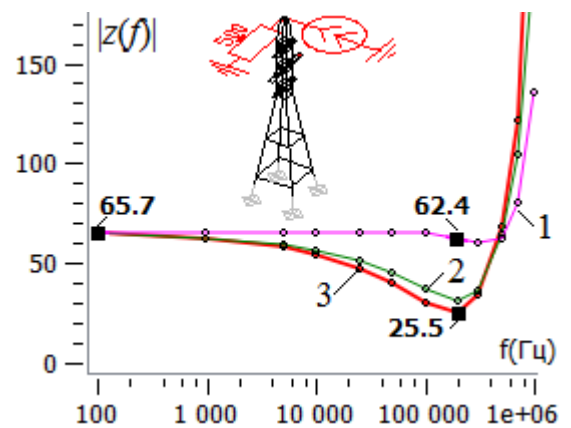


Рисунок 6– АЧХ сопротивления опоры в грунте: 1– $\sigma=\sigma_0$, 2– $\sigma(j\omega)$ по Мессире, 3– $\sigma(j\omega)$ по Алипио-Висакро; $\sigma_0=0.5$ мСм/м, $\epsilon_r=10$

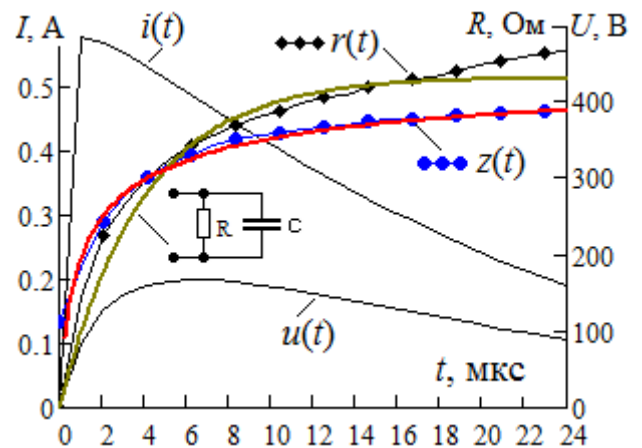


Рисунок 7– Результаты импульсного эксперимента

Численное моделирование измерений сопротивлений заземлителей опор ВЛ с тросом в высокоомном грунте импульсным методом показало существенное различие резуль-

татов в классической модели грунта и модели грунта с ЧЗП (рисунок 8). В классической модели грунта к моменту времени $T=2$ мкс (до прихода отраженных волн) переходные процессы в заземлителе завершены (рисунок 8, кривая 1), поэтому по «измеренному» значению $z(T)$, с учетом поправок на волновое сопротивление троса и измерительные электроды, стационарное сопротивление заземлителя, казалось бы, определяется точно. В действительности это не происходит из-за частотных свойств грунта.

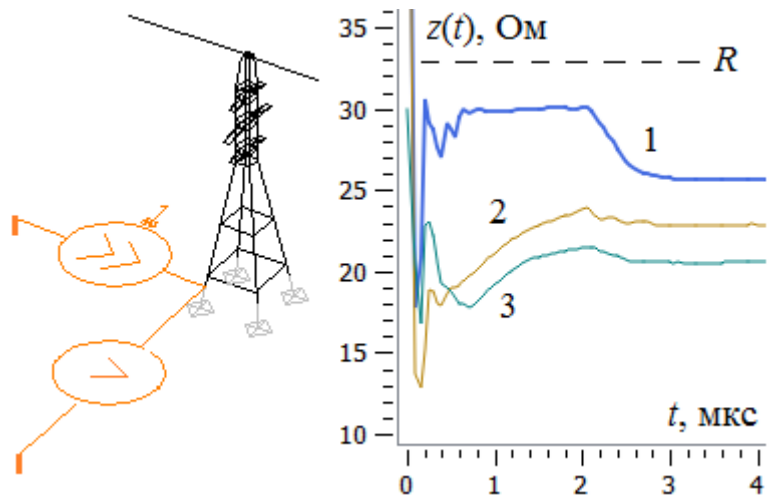


Рисунок 8– Переходное сопротивление опоры ВЛ с тросом (длина пролета 300 м); грунт: 1– $\sigma=\sigma_0=1$ мСм/м; 2– с ЧЗП, 3– вариант 2, но с измерительными электродами

стационарное сопротивление заземлителя, казалось бы, определяется точно. В действительности это не происходит из-за частотных свойств грунта.

В высокоомном грунте переходные процессы длятся десятки микросекунд, поэтому удельная проводимость грунта в момент измерений T больше, а сопротивление меньше, чем в установившемся режиме в $1/k(T)$ раз, где $k(T)$ определено в (2). Внесение этой поправки (в дополнение к двум указанным ранее) дает стационарное сопротивление заземлителя в высокоомном грунте с достаточной точностью.

Кондуктивные помехи контрольного кабеля ПС с двусторонним заземлением определяются током экрана, поэтому зависят от сопротивления заземлителя. Однако в серии расчетов нам не удалось обнаружить сколь либо заметного влияния частотных характеристик грунта на уровень кондуктивных помех при первом и втором импульсе тока молнии. Причина в том, что уменьшение сопротивления заземлителя в грунте с ЧЗП и пропорциональное снижение потенциала в точках заземления экрана не приводит к заметному изменению напряжения и тока экрана. Таким образом, переход к модели грунта с ЧЗП при расчете кондуктивных помех не требуется.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Удельная проводимость высокоомного грунта возрастает в несколько раз в диапазоне от 100 Гц до 1 МГц. Этот эффект, установленный экспериментально многими исследователями, до последнего времени не учитывался в теории заземлителей.

Расчеты заземлителей в грунте с ЧЗП в настоящее время проводятся частотным методом, однако ограниченная область применения и проблемы с удовлетворением принципа причинности заставляют от него отказаться.

Разработана дискретная модель заземлителя в грунте с ЧЗП, позволяющая проводить расчеты импульсных процессов во временной области методом дискретных схем и методом Влаха в точной постановке и без увеличения трудоемкости. Достоверность модели подтверждена сравнением с результатами расчетов частотным методом.

Удельная проводимость максимальна в начале переходного процесса, далее снижается и стремится к установившемуся значению σ_0 . Отсюда снижение амплитуды и сглаживание фронта импульса напряжения заземлителя в высокоомном грунте тем большее, чем короче фронт и длительность импульса тока. Срезанные импульсы затухают в наибольшей степени. Этот новый эффект, подобный действию импульсной короны проводов ВЛ, облегчает выбор средств защиты от грозových перенапряжений.

Исследован импульсный метод измерений сопротивления заземлителей опор ВЛ в грунте с ЧЗП. Аналитически и численно доказано, что длительность переходного процесса составляет десятки и сотни микросекунд, поэтому прямое измерение стационарного сопротивления заземлителей опор ВЛ с тросом в высокоомном грунте импульсным методом невозможно и требует введения поправочного множителя, учитывающего частотные свойства грунта, полученного аналитически для эквипотенциальных заземлителей.

Действующие нормативные документы по расчету заземлителей и грозозащите следует скорректировать с учетом установленного существенного влияния частотных свойств высокоомного грунта на параметры заземлителей.

В **Приложении А** представлена программа расчета импульсных процессов простых заземлителей в грунте с ЧЗП в среде Mathcad, в **Приложении Б** представлены акты о внедрении (использовании) результатов диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в научных журналах из списка ВАК

1. Шишигин, С.Л. Импульсный метод измерения сопротивления заземлителей / С.Л. Шишигин, А.В. Черепанов, Д.С. Шишигин // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. – 2019. – Т.25. – №2. – С.30-41.
2. Шишигин, С.Л. Моделирование заземлителя в грунте с частотно-зависимой удельной проводимостью / С.Л. Шишигин, А.В. Черепанов, Д.С. Шишигин // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. – 2018. – Т.24. – №3. – С.91-101.

3. Шишигин, С.Л. Расчет заземлителей в грунте с частотно-зависимыми параметрами / С.Л. Шишигин, А.В. Черепанов, Д.С. Шишигин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – №6. – С.391-399.

4. Шишигин, С.Л. Расчет кондуктивных помех и нагрева экрана контрольного кабеля / С.Л. Шишигин, А.В. Черепанов, Д.С. Шишигин // Электротехника. – 2017. – №10. – С.82-87.

Прочие работы по теме диссертации

5. Черепанов, А.В. Кондуктивные помехи контрольного кабеля с учетом частотной зависимости электрических параметров грунта / А.В. Черепанов // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: Сб. науч. статей 14 Межд. науч. практ. конф., Курск. – 2019. – С.218-222.

6. Черепанов, А.В. Сопротивление заземлителя опоры воздушной линии с учетом частотной зависимости электрических параметров грунта / А.В. Черепанов // Современные материалы, техника и технологии: Сб. науч. статей 8 межд. науч. практ. конф., Курск. – 2018. – С.436-440.

7. Шишигин, С.Л. Расчет заземлителей молниезащиты с учетом частотной зависимости проводимости земли / С.Л. Шишигин, А.В. Черепанов, Д.С. Шишигин // 6 Российская конф. по молниезащите: Сб. мат-лов конф., СПб. – 2018. – С.306-313.

8. Черепанов, А.В. Расчет заземлителей с учетом частотной зависимости удельного сопротивления грунта / А.В. Черепанов, С.Л. Шишигин // Труды 4 всерос. науч. техн. конф. «Техно-ЭМС 2017», М. – 2017. – С.110-112.

9. Черепанов, А.В. Расчет заземлителей с учетом частотной зависимости удельного сопротивления грунта / А.В. Черепанов, С.Л. Шишигин // Вузовская наука – региону: Мат-лы 15 всерос. науч. конф. с межд. участием. Вологда. – 2017. – С.131-134.

10. Шишигин, С.Л. Расчет кондуктивных помех и нагрева экрана контрольного кабеля / С.Л. Шишигин, А.В. Черепанов, Д.С. Шишигин // 5 Российская конф. по молниезащите: Сб. мат-лов конф., СПб. – 2016. – С.367-372.

11. Черепанов, А.В. Расчет кондуктивных помех и нагрева экрана контрольного кабеля / А.В. Черепанов // Наука и инновации в технических университетах: Мат. 9 Всерос. форума студентов, аспирантов и молодых ученых. СПб. – 2015. – С.59-61.

12. Черепанов, А.В. Расчет кондуктивных помех и нагрева экрана контрольного кабеля / А.В. Черепанов // Современные материалы, техника и технологии. – 2015. – №2 (2). – С.241-244.