На правах рукописи

Ивонин Виктор Владимирович



СИСТЕМА ЗАЗЕМЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ С РАЗВИТИЕМ ИСКРОВЫХ КАНАЛОВ В ВЫСОКООМНЫХ ГРУНТАХ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ

Специальность 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2026

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр Российской академии наук».

Научный руководитель:
кандидат технических наук

Карпов Алексей Сергеевич

Официальные оппоненты:

Коровкин Николай Владимирович

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», профессор высшей школы высоковольтной энергетики;

Пинчук Михаил Эрнестович

кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики и электроэнергетики Российской Академии наук, Отделение электроэнергетики, заведующий лабораторией диагностики плазмы.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук», г. Нижний Новгород.

Защита диссертации состоится **15 января 2027 г. в 13:00** на заседании диссертационного совета ГУ.6 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171.**
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.
Автореферат разослан 13 ноября 2026 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета — УСТИНОВ Денис Анатольевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Грозозащита промышленных электротехнических комплексов (ЭТК) – одна из ключевых задач электроэнергетики. Разряды молнии опасны для энергетической инфраструктуры. Отказ оборудования при ударе молнии может привести к системной аварии и крупному ущербу. Напряжение, которое возникает на элементах сети при грозовом разряде, определяется электрическими характеристиками заземляющих устройств (ЗУ).

Заземляющее устройство входит в состав любого электротехнического комплекса. Оно защищает людей и оборудование от перенапряжений при ударах молнии. Главное требование к ЗУ – низкое сопротивление. Чем оно меньше, тем ниже потенциал на заземлителе, а значит, тем безопаснее работа электроустановки.

Расчёт и проектирование ЗУ существенно осложняются тем, что при протекании импульсных токов (токов молнии) сопротивление заземлителя может в несколько раз отличаться от стационарного сопротивления, измеренного на промышленной частоте. Это вызвано нелинейными процессами в грунте: ионизацией и образованием искровых каналов. Для оценки эффективности заземлителя в грозовых режимах используется импульсное сопротивление $R_и = U(t) / I(t)$, которое в отличие от стационарного сопротивления не является постоянной величиной.

Грунт представляет собой совокупность различных веществ: воды, воздуха, гравия, песка, глины, минеральных и органических соединений. Все эти компоненты влияют на электрические свойства грунта. И хотя характеристики пробоя жидких, твёрдых и газообразных диэлектриков хорошо изучены по отдельности, сравнительная физическая модель, которая бы объясняла пробой составного диэлектрика (грунта), учитывая его гетерогенную структуру, до настоящего времени не разработана.

В высокоомных грунтах ($\rho \geq 1000$ Ом•м), характерных для Арктической зоны РФ, в частности для Мурманской области (скальные породы, морена, пески с низкой влажностью), стационарное сопротивление заземлителей существенно превышает нормативные значения. Но при разрядах молнии нелинейные процессы в

грунтах могут привести к дополнительному снижению сопротивления ЗУ, поэтому требуется их детальное экспериментальное изучение для повышения достоверности расчетов.

Степень разработанности темы исследования

В нашей стране и за рубежом проблеме оптимизации грозозащитных характеристик заземлителей посвящено большое количество исследований. Среди отечественных учёных следует отметить А.В. Корсунцева, М.В. Костенко, Е.Я. Рябкову, В.З. Анненкова, Р.К. Борисова, Э.М Базеляна, К.П. Кадомскую, А.Н. Данилина, С.Л. Шишигина, Ю.В. Целебровского, А.С. Гайворонского. За рубежом данной проблеме посвящены работы, проводимые в США, Канаде, Австрии, Японии, Бразилии, Италии: V.A.J. van Lint, A.C. Liew, M. Darveniza, B.A. Mork, J.W. Erler, D. Sharafi, T. Mozumi, S. Sekioka, N. Nagaoka, M. C. Tavares, A. Borghetti, C.M. Portela, Mohamad Nor, Bok-Hee Lee, I. F. Gonos.

В работах перечисленных авторов рассматривались различные аспекты проблемы – от физики искровых разрядов в грунтах до инженерных методов расчёта заземляющих устройств. Благодаря этим исследованиям были заложены теоретические основы растекания импульсных токов в грунтах вокруг заземлителей, определены напряжённости электрического поля, при которых начинается ионизация грунта, предложены первые математические модели, описывающие нелинейное изменение сопротивления. Экспериментально, в частности Э.М. Базеляном, было обнаружено явление прорастания плазменного канала над поверхностью грунта при больших импульсных токах.

Несмотря на значительный объём накопленных данных, существующие модели не описывают реальную динамику развития искровых каналов в объеме грунта, что ограничивает их применение для условий высокоомных грунтов. Это связано, прежде всего, с недостатком систематических экспериментальных данных о развитии плазменных каналов непосредственно в объёме грунта. Существующие расчётные методики, как правило, используют эмпирические коэффициенты, полученные для низкочастотных воздействий, и не учитывают динамику искрообразования, что ограничивает их применимость для протяжённых заземлителей.

Объект исследования – системы заземления электротехнических комплексов, эксплуатируемых в высокоомных грунтах.

Предмет исследования – процессы образования и развития искровых каналов в высокоомных грунтах при протекании импульсных токов.

Цель работы – повышение эффективности функционирования системы заземления электротехнических комплексов, эксплуатируемых в высокоомных грунтах Арктической зоны.

Идея заключается в использовании дискретного (канального) характера искрообразования в объёме грунта, обеспечивающее снижение сопротивления растекания.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения нижеуказанных **задач:**

1. Установить зависимости импульсного сопротивления электродов в высокоомном грунте от параметров импульса, влажности грунта и конфигурации электродов на основе лабораторных исследований.

2. Определить характер развития искровых каналов в объеме грунта на основе оптической регистрации динамики искрообразования.

3. Выявить особенности импульсного сопротивления электродов, соизмеримых с реальными заземлителями электротехнических комплексов, и сопоставить их с лабораторными данными по результатам полигонных испытаний.

4. Разработать математическую модель импульсного сопротивления электродов для высокоомных грунтов.

5. Сформулировать практические рекомендации по выбору конструкций заземлителей электротехнических комплексов для высокоомных грунтов на основе полученных экспериментальных данных.

Научная новизна работы:

1. Установлены экспериментальные зависимости импульсного сопротивления электродов в высокоомном грунте от параметров импульсного воздействия, влажности и геометрической конфигурации электродов. Доказано, что снижение сопротивления определяется не только амплитудой, но и длительностью импульса. Доказано,

что при протекании импульсных токов в высокоомных грунтах образуются локализованные искровые каналы, приводящие к снижению импульсного сопротивления электродов в 2-5 раз.

2. Впервые с помощью оптических методов зарегистрирован и классифицирован характер развития искровых каналов в объёме грунта. Экспериментально доказано, что в исследованном диапазоне напряжений искровые каналы имеют локализованный (канальный) характер, развиваются от торцов электродов и не образуют сплошной искровой зоны.

3. Разработана математическая модель импульсного сопротивления электрода, учитывающая возникновение и развитие искровых каналов в окружающем грунте. Модель верифицирована на основе экспериментальных данных.

Соответствие паспорту специальности

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы по пунктам:

п. 1. Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, анализ системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем, включая электромеханические, электромагнитные преобразователи энергии и электрические аппараты, системы электропривода, электроснабжения и электрооборудования, в части математического моделирования импульсного сопротивления заземлителя как компонента электротехнического комплекса.

п. 4. Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов, систем и их компонентов в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях, диагностика электротехнических комплексов, в части исследования функционирования заземлителя как компонента электротехнического комплекса при внешних воздействиях, имитирующих грозовые разряды.

Теоретическая и практическая значимость работы:

Полученные экспериментальные данные о динамике развития искровых каналов в высокоомных грунтах могут быть использованы

для создания уточненных моделей импульсного сопротивления заземляющих устройств электротехнических комплексов, а также для верификации существующих расчетных методик. Разработанная математическая модель импульсного сопротивления электрода позволяет повысить достоверность прогнозирования грозозащитных характеристик заземлителей ЭТК в регионах с высокоомными грунтами.

Математическая модель импульсного сопротивления вертикального заземлителя, учитывающая развитие искровых каналов от торца электрода, а также экспериментальные данные о влиянии длительности импульсного воздействия и влажности грунта на сопротивление заземляющих устройств внедрены в производственную деятельность Мурманского филиала ПАО «Россети Северо-Запад» (акт о внедрении от 21.05.2026 г.). Использование указанных результатов позволяет получить дополнительную информацию о возможных уровнях грозовых перенапряжений на опорах ВЛ в высокоомных грунтах, что может быть учтено при анализе грозоупорности воздушных линий.

Диссертационные исследования проводились при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-08-00573 «Механизмы растекания больших импульсных токов в грунтах при возникновении искровых и дуговых плазменных каналов» (2014-2016) и проекта №16-38-00443 «Распределение электромагнитных полей по поверхности протяженного заземлителя и в окружающем его грунте» (2016-2017).

Методология и методы исследования. Для изучения процессов образования и развития искровых каналов в грунтах была разработана лабораторная установка на основе генератора импульсного напряжения, собранного по схеме Аркадьева-Маркса. Измерения токов и напряжений проводились с помощью делителя напряжения, резистивного токового шунта и цифрового осциллографа АКИП-4113/2. Оптические исследования проводились с использованием цифрового фотоаппарата с открытым затвором. Испытания на электродах, соизмеримых с реальными заземлителями, выполнялись на высоковольтном полигоне.

Для обработки результатов экспериментальных исследований и апробации разработанной математической модели импульсного сопротивления электрода использовалась программа Mathcad.

Положения, выносимые на защиту:

1. Основным механизмом снижения импульсного сопротивления заземлителей электротехнических комплексов в высокоомных грунтах (в 2-5 раз) при стекании токов молнии является развитие локализованных искровых каналов от торца электрода, величина которого зависит от длительности импульса и геометрических параметров заземлителя, что необходимо учитывать при анализе грозоупорности и выборе конструкций заземлителей ЭТК в условиях высокоомных грунтов.

2. Повышение точности расчёта импульсного сопротивления электродов в условиях высокоомных грунтов достигается учётом в математической модели развития искровых каналов от торца электрода, где напряжённость поля превышает критическое значение.

Степень достоверности результатов исследования основана на использовании апробированных методик экспериментальных исследований, применении поверенного измерительного оборудования, а также воспроизводимостью результатов измерений.

Апробация результатов диссертации проведена на 6 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 3 международных. За последние 3 года принято участие в 3 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 2 международных:

Региональная научно-практическая конференция «АрктикЭнерго: устойчивое развитие энергетики Арктической зоны РФ», ноябрь 2025 г., Апатиты;

XIII международная научно-практическая конференция «Север и Арктика в новой парадигме мирового развития. Лузинские чтения – 2026», апрель 2026 г., Апатиты;

IX Международная научно-практическая конференция «Современные технологии и экономика энергетики», апрель 2026 г., Санкт-Петербург.

Личный вклад автора заключается в анализе отечественной и зарубежной научной литературы по теме исследования; разработке

и создании экспериментальных стендов (лабораторной установки и высоковольтного полигона); проведении осциллографических и оптических измерений процессов искрообразования в грунтах; обработке и интерпретации полученных экспериментальных данных; разработке математической модели импульсного сопротивления электрода; сопоставительном анализе экспериментальных результатов лабораторных и полигонных испытаний с данными численного моделирования; формулировке научных положений и выводов диссертации.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 24 печатных работах, в том числе в 2 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 99 наименований, 2 приложений. Диссертация изложена на 109 страницах машинописного текста, содержит 60 рисунков и 8 таблиц.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю д.т.н. Ефимову Б.В., под руководством которого начиналась данная работа, к.т.н. Данилину А.Н. за многолетнее сотрудничество и непосредственное участие в экспериментах, а также всем сотрудникам ЦЭС КНЦ РАН за полезные рекомендации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен обзор научной литературы, посвященной образованию искровых каналов в грунтах. Отмечены фундаментальные работы, положившие начало исследованиям. На

основе анализа литературы дано представление об основных методах их экспериментального и численного исследования. Обработаны и систематизированы результаты исследований, начиная с первой половины XX века, в результате чего были определены основные направления данной работы.

Во второй главе дано описание экспериментальной установки, созданной для исследования влияния искровых каналов в грунтах на импульсное сопротивление электродов. Приведены методики регистрации напряжения и тока. Описана методика оптической регистрации искрообразования и развития плазменных каналов в грунте. Дано описание высоковольтного полигона, позволяющего проводить эксперименты на электродах, соизмеримых по размерам с заземлителями объектов электроэнергетики.

В третьей главе изложены основные экспериментальные результаты.

Первый раздел главы посвящен лабораторным исследованиям образования и развития искровых каналов в увлажненном грунте и их влиянию на импульсное сопротивление электродов. Целью работы было определить зависимость импульсного сопротивления от параметров приложенного импульса (амплитуды и длительности) и влажности окружающего грунта. Эксперименты проводились для заземлителей разной конфигурации. Одновременно с осциллографическими исследованиями, в работе проводились оптические наблюдения процессов искрообразования в грунте, описанные в разделе 2.

Третий раздел главы посвящен экспериментальным исследованиям на полигоне на электродах, соизмеримых по размерам с заземлителями объектов электроэнергетики. Цель данных экспериментов – изучение процессов искрообразования в грунте при напряженностях поля, значительно превышающие критические, на сосредоточенных и протяженных электродах.

В четвертой главе приведено описание разработанной математической модели импульсного сопротивления вертикального электрода с учетом возникающих в окружающем его грунте искровых каналов.

Основные результаты диссертации отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Основным механизмом снижения импульсного сопротивления заземлителей электротехнических комплексов в высокоомных грунтах (в 2-5 раз) при стекании токов молнии является развитие локализованных искровых каналов от торца электрода, величина которого зависит от длительности импульса и геометрических параметров заземлителя, что необходимо учитывать при анализе грозоупорности и выборе конструкций заземлителей ЭТК в условиях высокоомных грунтов.

Экспериментальные исследования проводились на лабораторном стенде, схема которого приведена на рисунке 1. Генератор импульсных напряжений (ГИН), собранный по схеме Аркадьева-Маркса, обеспечивал формирование импульсов амплитудой до 60 кВ. Длительность импульсов варьировалась от 2 до 70 мкс, что соответствует диапазону длительностей грозовых импульсов. В качестве грунта использовался кварцевый песок влажностью 10% и 20%, что соответствовало удельному сопротивлению ≈1400 Ом·м и ≈1000 Ом·м соответственно.

На рисунке 2 показаны осциллограммы тока и напряжения, а также кривая импульсного сопротивления заземления дискового электрода диаметром 21,5 мм и толщиной 1 мм при напряжении ГИН U_0 = 30 кВ и длительности импульса подаваемого напряжения τ = 32 мкс. Как видно из осциллограммы, пиковое значение тока всегда сдвинуто относительно пикового значения напряжения. Эта задержка возрастает с увеличением влажности грунта. Импульсное сопротивление $R(t) = U(t) / I(t)$ определяется по кривым напряжения и тока. Процесс искрообразования начинается на нелинейной стадии растекания импульсного тока вблизи его максимума, когда $dU/dI < 0$, а сопротивление электрода в песке спадает почти до минимума.

Опыты с импульсами напряжения минимальной длительности показали, что процесс искрообразования при напряжении U = 30 кВ начинает развиваться при длительности импульса τ = 4 мкс и происходит за время около 2 мкс. При этом сопротивление электрода падает примерно в два раза.

Увеличение длительности импульса напряжения приводит к резкому уменьшению импульсного сопротивления электрода, что в свою очередь связанно с возникновением и увеличением искровых каналов в грунте. Ниже приведены результаты опытов при влажности грунта 10 %, напряжении ГИН 42 кВ и длительности импульса 2-70 мкс. Как видно из рисунка 3, искровые процессы в грунте возникают даже при очень коротких импульсах (2 мкс).

Одновременно с осциллографическими исследованиями, в работе проводились оптические наблюдения процессов искрообразования в грунте. На рисунке 4 приведены фотографии, полученные в результате данных экспериментов.

С ростом и напряжения, и длительности импульса напряжения длина искровых каналов увеличивается. Также увеличивается яркость их свечения, которая носит факельный характер, что связано с повышением энерговклада в образующийся плазменный канал. При увеличении длительности импульсов напряжения более 42 мкс импульсное сопротивление заземления выходит на минимальное значение, которое остается постоянным при дальнейшем увеличении длительности импульса.

На дисковом электроде толщиной 3 мм образования плазменных каналов также носит факельный характер, однако, плазменные каналы фиксируются при большей амплитуде напряжения и большей длительности импульсов. Искрообразование на краях дискового электрода носит многоканальный характер и наблюдается при плотностях тока $j > j_c$, где j_c – критическая плотность тока развития искровых каналов во влажном песке.

Процессы искрообразования оптически более выражены на заземлителях в виде уголков размером 35х35 мм с резко неоднородным электрическим полем на краях (рисунок 5).

Процесс искрообразования начинается на электродах в местах с наибольшей плотностью тока, где максимальна неоднородность электрического поля. При влажности песка 10 % образование плазменных каналов носит факельный характер, как и на дисковых электродах. Однако, при влажности песка 20 % образуются контрагированные искровые каналы. При амплитуде импульсов напряжения U = 30 кВ светящиеся искровые каналы были зафиксированы при

минимальной длительности импульсов напряжения τ = 2 мкс. В этом случае максимум импульсов тока наблюдался на осциллограммах на первой микросекунде, что намного раньше, чем достигается минимум сопротивления для уголкового электрода. Плотности тока и напряженности электрического поля на остриях велики даже при сравнительно низких амплитудах прикладываемого импульса напряжения, и в этом случае начало искрообразования практически не имеет задержки. Интенсивность искрообразования, зафиксированная оптическими методами, повышается с увеличением напряжения. При увеличении длительности импульса напряжения образуются более яркие и более протяженные искровые каналы.

Все процессы при начале искрообразования в грунте, и особенно в неоднородном поле, как уже указывалось – нелинейны. Это хорошо демонстрируют вольт-амперные зависимости, которые были построены по полученным в ходе экспериментов осциллограммам токов и напряжений. На рисунке 6 приведены результаты опытов на электроде в виде диска.

Импульсы напряжения лежали в интервале от 30 до 48 кВ с фронтом 0,1 мкс и длительностью до полуспада 32 мкс. При малых напряжениях импульсное сопротивление линейно и эквивалентно стационарному сопротивлению. На больших напряжениях вольт-амперная характеристика имеет форму гистерезиса, связанную с нелинейной характеристикой грунта. Из рисунка видно, что когда плотность тока превышает критическое значение на поверхности электрода, сопротивление начинает уменьшаться из-за образования искровых каналов в грунте. В экспериментах кривые ВАХ приобретают форму петли, если приложенное напряжение превышает 30 кВ. Обратное направление кривой описывает процесс деионизации грунта, когда напряжение падает. Участок линейного роста вначале соответствует увеличению напряжения на фронте. Импульсное сопротивление заземления до точки перегиба имеет примерно такое же значение, что и стационарное сопротивление.

Для исследования образования искровых каналов при однородном распределении электрического поля вокруг электрода использовался латунный шар диаметром 30 мм. На рисунке 7 пред-

ставлены импульсные сопротивления электродной системы при разных длительностях напряжения.

При влажности грунта 10 % и амплитуде импульса напряжения 30 кВ уменьшение сопротивления, а значит и развитие искровых каналов в грунте, начинается с временной задержкой в несколько микросекунд. Увеличение амплитуды приложенного импульса приводит к уменьшению данной временной задержки.

Увеличение длительности импульса напряжения приложенного к электроду приводит к резкому уменьшению импульсного сопротивления электрода, что в свою очередь связанно с возникновением и увеличением искровых каналов в грунте. Однако, как видно из рисунка 7, увеличение длительности импульса более 64 мкс не приводит к значительным изменениям импульсного сопротивления.

При увеличении влажности грунта до 20 % процессы искрообразования не возникают вплоть до амплитуды импульса напряжения 48 кВ, при этом изменение длительности импульса не приводило к значительным изменениям импульсного сопротивления электрода.

Экспериментальные исследования на полигоне проводились на электродах, соизмеримых по размерам с заземлителями объектов электроэнергетики. Цель данных экспериментов – изучение процессов искрообразования в высокоомном грунте (ρ = 1100 Ом·м) при напряженностях поля, значительно превышающие критические, на сосредоточенных и протяженных электродах. В качестве сосредоточенных электродов использовались шар диаметром 140 мм, закопанный наполовину в грунт, вертикальный электрод диаметром 3,5 мм и длиной 200 мм, горизонтальный электрод диаметром 3,5 мм и длиной 300 мм.

Осциллограммы расчетных импульсных сопротивлений сосредоточенных заземлителей, при подаче высоковольтных импульсов приведены на рисунке 8. Осциллограммы и зависимости сопротивлений представлены для импульсных напряжений 150 кВ и 300 кВ.

Приведенные на рисунке 8 зависимости показывают, что у сосредоточенных заземлителей различных конструкций при высоких напряженностях электрического поля изменение импульсного со-

противления электрода практически одинаково, что может говорить о совпадении характера развития искровых каналов. Таким образом, при напряженностях поля, значительно превышающих критические значения начала искрообразования, форма сосредоточенного электрода практически не влияет на его сопротивление.

В качестве протяженных электродов использовались стальная полоса шириной 35 мм и толщиной 2,5 мм, стальной пруток диаметром 10 мм, алюминиевая труба диаметром 42 мм и медный провод диаметром 2,5 мм.

На рисунке 9 в качестве примера приведены расчетные зависимости импульсных сопротивлений двух электродов длиной 2 м и 6 м, полученные при обработке осциллограмм входных токов и напряжений.

Приведенные зависимости показывают, что с ростом протяженности заземлителя при напряжениях, превышающих начало искрообразования, процессы искрообразования носят отличительный характер. Основное отличие наблюдается в начальной стадии и заключается в том, что снижение сопротивления сосредоточенных заземлителей и заземлителей малой длины происходит значительно медленнее, чем у протяженных заземлителей. При этом на протяженных заземлителях диаметр электрода практически не оказывает влияние на импульсное сопротивление.

2. Повышение точности расчёта импульсного сопротивления электродов в условиях высокоомных грунтов достигается учётом в математической модели развития искровых каналов от торца электрода, где напряжённость поля превышает критическое значение.

Разработанные на данный момент разные математические модели искровых процессов в грунте объединяет три общих допущения:

1. Искровые процессы в грунтах начинаются при напряженности электрического поля, превышающей критическое значение, и искровые каналы будут развиваться до тех пор, пока напряженность поля не станет меньше критической.
2. Падение напряжения в канале разряда равняется нулю.

3. Искровые процессы развиваются симметрично вокруг электрода, образуя сплошную зону искрообразования.

Полученные в ходе экспериментальных исследований данные согласуются с первыми двумя допущениями. При этом в ходе экспериментальных оптических исследований не было зафиксировано образование сплошной искровой зоны вокруг электрода, не зависимо от типа электрода и параметров приложенного импульса. Вероятнее всего искровые процессы в грунтах развиваются по разному характеру, в зависимости от уровня перенапряжения $\left(U/U_{KP}\right)$. В случае вертикального электрода, когда амплитуда приложенного импульса имеет относительно небольшое значение, напряженность электрического поля будет превышать критическую величину E_{KP} только на конце электрода, откуда и будут образовываться искровые каналы, при этом зона искрообразования будет иметь небольшой радиус (рисунок 10). Согласно полученным результатам оптических исследований по мере увеличения амплитуды импульса будет происходить контрагирование искровых каналов с увеличением энерговклада в канал разряда, сопровождаемое увеличением яркости свечения.

Если допустить, что удельное сопротивление плазмы в искровом канале равно нулю, то при развитии искрового процесса эквивалентную длину электрода можно представить как сумму длин проводника и искрового канала или каналов (рисунок 11) (1):

$$l(t) = L + nM(1 - e^{-\alpha \cdot t/\tau_m}), \qquad (1)$$

где L – длина электрода в грунте, м; M – длина искрового канала к моменту времени τ_m, м; τ_m – время, к которому искровые каналы достигают максимальной длины, мкс; n – число искровых каналов; α – коэффициент искрообразования, учитывающий влияние полной длины искрового канала.

Сопротивление вертикального электрода при напряженности электрического поля ниже критического (2):

$$R = \int_{r_0}^{\infty} \frac{\rho dr}{2\pi r^2 + 2\pi r L}, \qquad (2)$$

где ρ – удельное сопротивление грунта, Ом·м; L – длина электрода, м; r – радиус электрода, м.

В случае, когда напряженность электрического поля превышает критическое значение, динамика изменения сопротивления подземного проводника при разряде на него емкостного накопителя происходит в две стадии: стадия нарастания и стадия затухания тока.

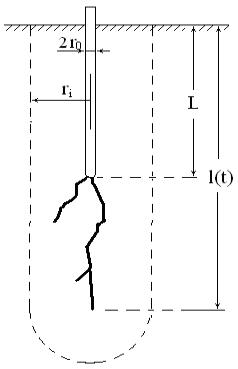


Рисунок 11 – Схема развития процессов искрообразования и ионизации вокруг вертикального стержня

На стадии нарастания тока, когда $0 \le t \le t_m$, изменение сопротивления можно описать уравнением (3):

$$R(t) = \int_{r_0}^{r_i} \frac{\rho_0 e^{-t/\tau_1} dr}{2\pi \cdot r^2 + 2\pi \cdot r \cdot l(t)} + \int_{r_i}^{\infty} \frac{\rho_0 dr}{2\pi \cdot r^2 + 2\pi \cdot r \cdot l(t)}, \qquad (3)$$

где ρ_0 – удельное сопротивление грунта, Ом·м; τ_1 – постоянная времени ионизации, мкс; L – длина электрода, м; r_i – радиус зоны ионизации, м; r – радиус электрода, м.

В стадии нарастания тока динамическое изменение длины искрового канала описывается уравнением (1).

При $t > \tau_m$, наступает стадия затухания тока, и сопротивление электрода определяется уравнением (4):

$$R(t) = \int_{r_0}^{r_i} \frac{\rho_0 (1 - e^{-t/\tau_2}) dr}{2\pi \cdot r^2 + 2\pi \cdot r \cdot l(t)} + \int_{r_i}^{\infty} \frac{\rho_0 dr}{2\pi \cdot r^2 + 2\pi \cdot r \cdot l(t)}, \qquad (4)$$

где ρ_0 – удельное сопротивление грунта, Ом·м; τ_2 – постоянная времени деионизации, мкс; L – длина электрода, м; r_i – радиус зоны ионизации, м; r – радиус электрода, м.

В стадии затухания, напряженность электрического поля постепенно будет уменьшаться, соответственно, будет уменьшаться длина искровых каналов, поэтому эквивалентная длина электрода $l(t)$ будет определяться, как (5):

$$l(t) = L + nM \cdot e^{-\beta \cdot t/\tau_m}, \quad (5)$$

где L – длина электрода в грунте, м; M – длина искрового канала к моменту времени τ_m, м; n – число искровых каналов; β – коэффициент деионизации; τ_m – время, к которому искровые каналы достигают максимальной длины, мкс.

Для подтверждения предложенной теории развития искровых явлений в грунте выполнены эксперименты с вертикальным электродом диаметром 6 мм и длиной 70 мм. Удельное сопротивление грунта $\rho \approx 1000\ Ом \cdot м$. На электрод подавался импульс амплитудой 30 кВ с длительностью фронта 1 мкс.

На рисунке 12 представлены кривые импульсного сопротивления $R(t)$. Кривая 1 построена по экспериментальным данным, кривая 2 – по результатам расчета.

Как видно из рисунка, модель показывает хорошую корреляцию с экспериментальными данными. Особенно хорошо совпадают значения импульсного сопротивления $R = \frac{U_{max}}{I_{maz}}$, расхождение расчетных данных с результатами моделирования менее 5 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача – повышение достоверности расчета импульсного сопротивления заземляющих устройств путем экспериментального исследования закономерностей развития искровых каналов в высокоомных грунтах и разработки соответствующей математической модели.

Основными результатами диссертационной работы являются:

1. По результатам лабораторных исследований установлены зависимости импульсного сопротивления электродов системы заземления электротехнических комплексов в высокоомном грунте от амплитуды и длительности импульса, влажности грунта и конфигурации электрода. Показано, что снижение сопротивления определяется не только амплитудой, но и длительностью импульса: при увеличении длительности с 2 до 70 мкс минимальное импульсное сопротивление снижается в 2,3 раза, при увеличении амплитуды с 30 до 42 кВ – в 1,8 раза.

2. С помощью оптических методов зарегистрирован и классифицирован характер развития искровых каналов в объеме грунта, влажностью 10-20%. Показано, что в исследованном диапазоне напряжений искровые процессы в грунте имеют локализованный (канальный) характер, развиваются от торцов электродов и не образуют сплошной искровой зоны.

3. На основе полигонных испытаний электродов, соизмеримых с заземлителями электротехнических комплексов, установлено, что при длине горизонтальных заземлителей в 6 м диаметр электрода практически не влияет на импульсное сопротивление ($R_{мин}$ = 180-200 Ом), при этом снижение сопротивления происходит в 1,5-2 раза быстрее, чем у сосредоточенных электродов.

4. Обоснованы и сформулированы научно-практические рекомендации по выбору конструкций заземлителей ЭТК в условиях высокоомных грунтов, устанавливающие преимущество протяжённых стержневых электродов диаметром до 20 мм с количеством лучей не более трёх для минимизации импульсного сопротивления и повышения эффективности грозозащиты.

5. Разработана математическая модель импульсного сопротивления вертикального электрода системы заземления электротехнических комплексов, учитывающая возникновение и развитие искровых каналов в окружающем грунте. Относительная погрешность расчёта не превышает 5 % в области минимума сопротивления, что обеспечивает возможность использования модели для сравнительного анализа и обоснованного выбора конструктивных параметров заземлителей ЭТК в условиях высокоомных грунтов.

Перспективным направлением развития темы исследования является изучение вопроса влияния гранулометрического состава грунта на образование и развитие искровых каналов. С точки зрения моделирования перспективным является переход к расчёту трёхмерных моделей более сложных конструкций заземлителей.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Ивонин, В.В. Распределение потенциалов в плохо проводящих грунтах вокруг протяжённых заземлителей / В.В. Ивонин // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. – 2016. – Т. 19, № 4. – С. 723–728. – DOI 10.21443/1560-9278-2016-4-723-728.

2. Ивонин, В. В. Сравнительный анализ импульсного сопротивления сосредоточенных заземлителей различной геометрии при высокой напряжённости электрического поля в грунте / В. В. Ивонин, А. С. Карпов, А. А. Бринь // Электричество. – 2026. – № 4. – С. 12-17. – DOI 10.24160/0013-5380-2026-4-12-17.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

3. Electrical breakdown of soil under nonlinear pulsed current spreading / L.M. Vasilyak, V.Y. Pecherkin, S.P. Vetchinin [et al.] // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2015. – Vol. 48, No. 28. – P. 285201. – DOI 10.1088/0022-3727/48/28/285201.

4. Pecherkin, V.Y. Optical investigations of pulsed sparks in soil near electrode / V. Y. Pecherkin, L. M. Vasilyak, S. P. Vetchinin [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2015. – Vol. 653, No. 1. – P. 012151. – DOI 10.1088/1742-6596/653/1/012151.

Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU2026666075. Программа расчета импульсного сопротивления вертикального заземлителя с учётом искровых каналов в высокоомных грунтах / Ивонин В.В.; заявитель и правообладатель: Ивонин В.В. – № 2026666075; заявл. 09.05.2026; опубл. 28.05.2026. Бюл. №6. – 1 с.

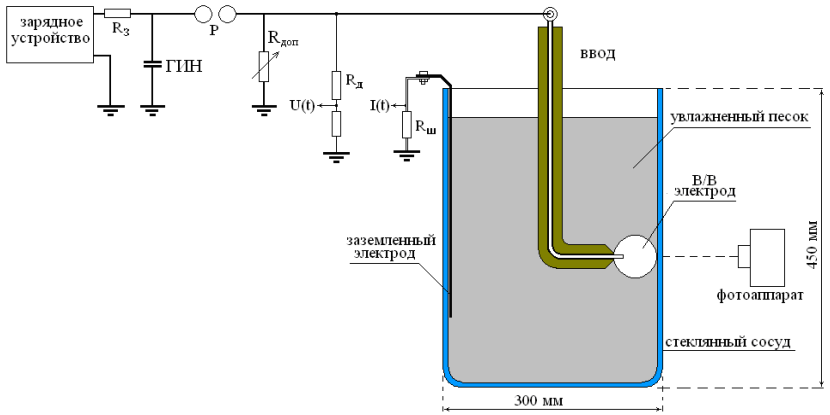


Рисунок 1 – Схема генераторной установки, сопряженной со стеклянным резервуаром с увлажненным кварцевым песком, в котором размещен электрод, где $R_з$ – защитный резистор, ГИН – генератор импульсного напряжения, $R_{доп}$ – формирующий резистор, $R_д$ – делитель напряжения, $R_ш$ – токовый шунт

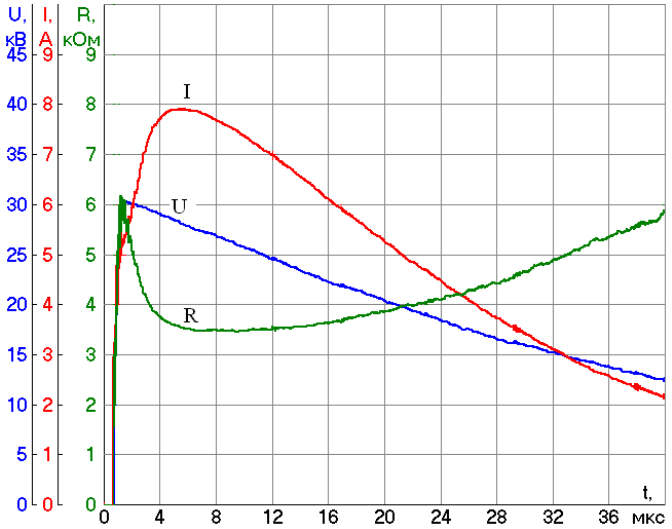


Рисунок 2 – Осциллограммы напряжения, тока и кривая импульсного сопротивления

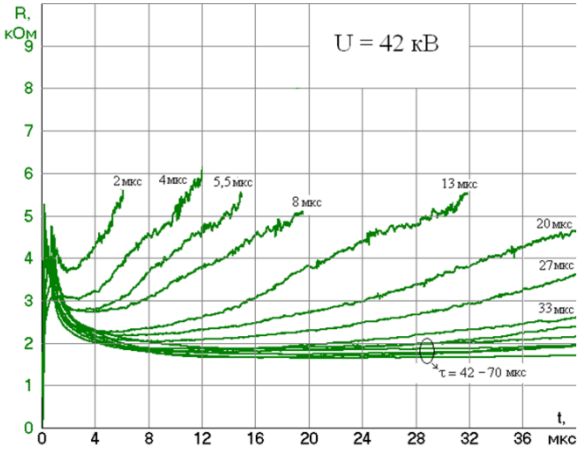
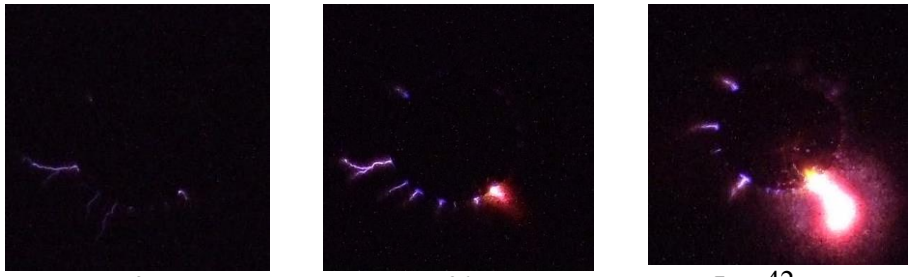


Рисунок 3 – Импульсные сопротивления электродной системы в виде диска при разных длительностях приложенных импульсов напряжения



τ = 2 мкс τ = 20 мкс τ = 42 мкс

Рисунок 4 – Фотографии искровых процессов вокруг электрода

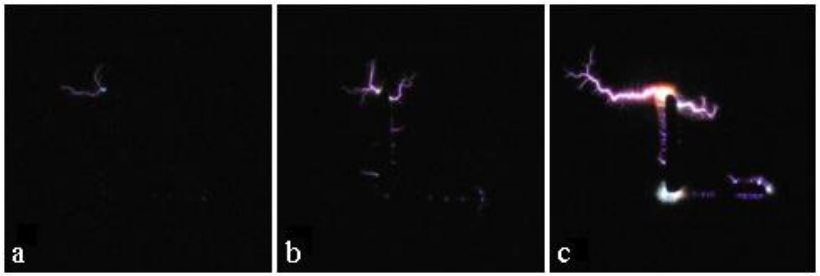
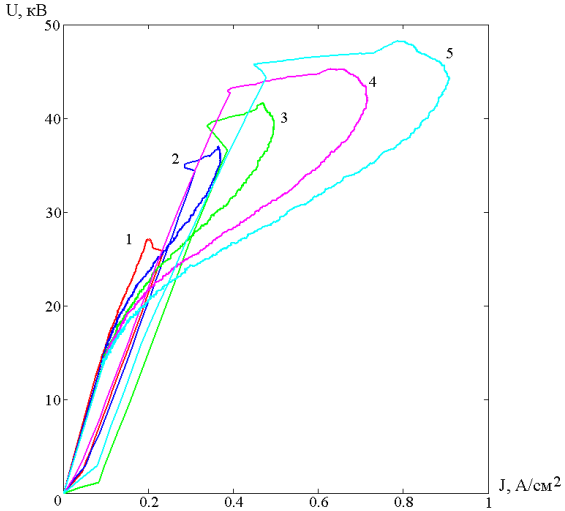
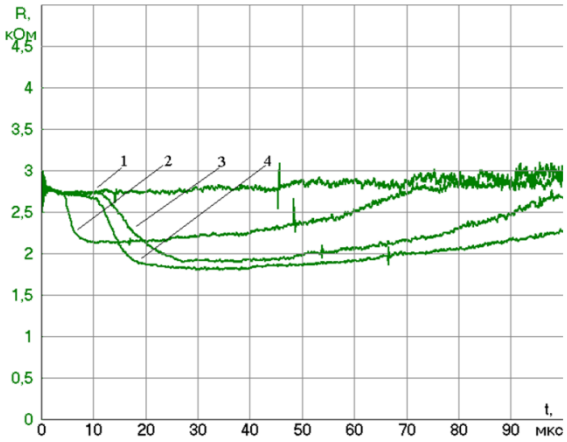


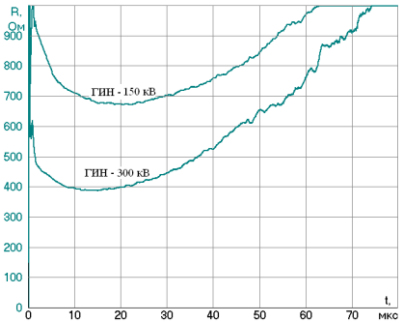
Рисунок 5 – Фотографии плазменных каналов вокруг уголка при амплитуде напряжения U=42 кВ и разных длительностях приложенного импульса тока
a – 2мкс, b – 30 мкс, c – 70 мкс



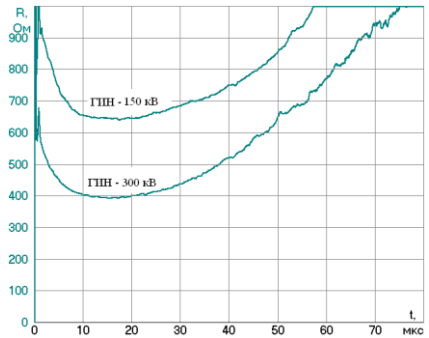
1 – 30 кВ, 2 – 37 кВ, 3 – 42 кВ, 4 – 45 кВ, 5 – 48 кВ
Рисунок 6 – Вольт-амперные характеристики (ВАХ) увлажненного кварцевого песка при разных амплитудах импульса напряжения



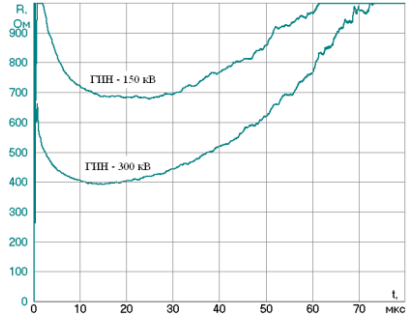
1 – τ =35 мкс, 2 – τ =45 мкс, 3 – τ =64 мкс, 4 – τ =80 мкс
Рисунок 7 – Импульсное сопротивление сферического электрода при разных длительностях приложенного импульса напряжения. Амплитуда импульса 30 кВ. Влажность грунта 10 %.



сферический электрод

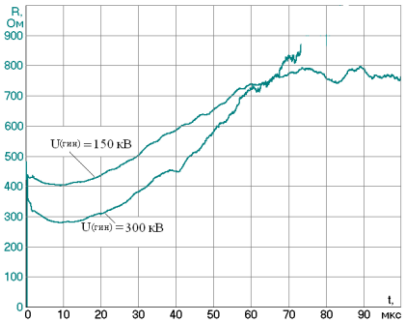


вертикальный электрод

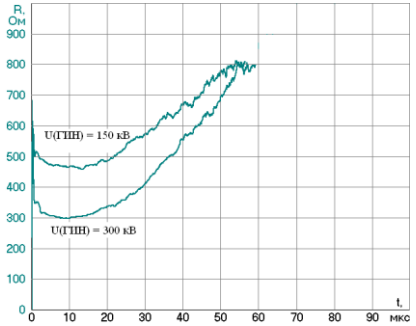


горизонтальный электрод на поверхности грунта

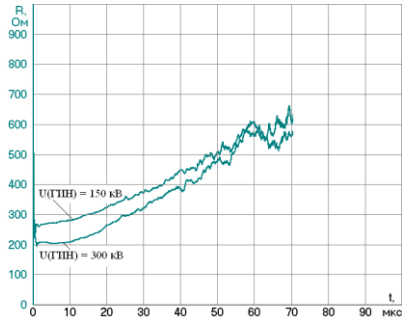
Рисунок 8 – Импульсные сопротивления электродов разных конструкций при разных напряжениях ГИН.



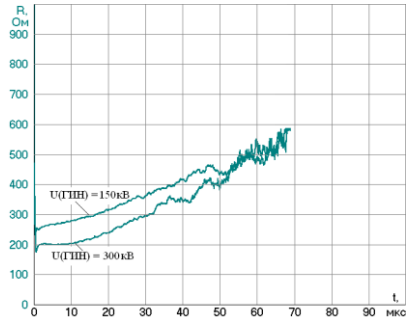
провод диаметром 2,5 мм и длиной 2 м



пруток диаметром 10 мм и длиной 2 м



провод, диаметром 2,5 мм и длиной 6 м.



пруток, диаметром 10 мм и длиной 6 м

Рисунок 9 – Расчетные зависимости импульсных сопротивлений электродов длиной 2 м и 6 м

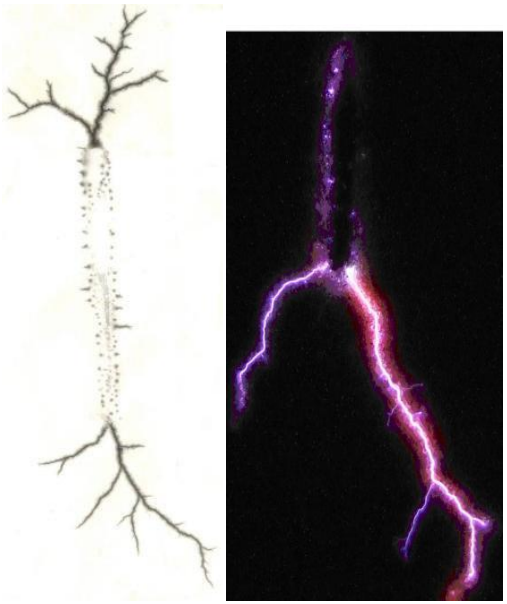


Рисунок 10 – Фотографии искровых каналов в толще грунта вокруг вертикального электрода

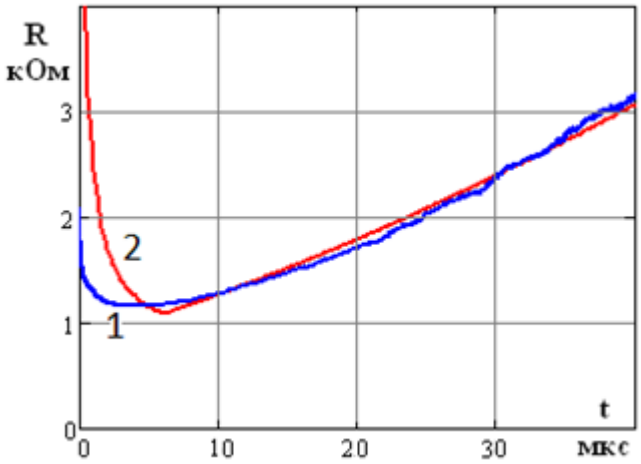


Рисунок 12 – Кривые динамического сопротивления сосредоточенного электрода:
1 – экспериментальные данные, 2 – результаты моделирования.