Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр
«Кольский научный центр Российской академии наук»

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

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук,
Карпов А.С.

Апатиты – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 4

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ИСКРООБРАЗОВАНИЯ В ВЫСОКООМНЫХ ГРУНТАХ И МЕТОДОВ РАСЧЕТА ИМПУЛЬСНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАЗЕМЛИТЕЛЕЙ 11

1.1 Роль заземляющих устройств в обеспечении грозозащиты объектов электроэнергетики 11

1.2 Физические процессы в грунтах при протекании больших импульсных токов 13

1.3 Обзор экспериментальных исследований искрообразования в грунтах 14

1.4 Анализ существующих математических моделей импульсного сопротивления 27

1.5 Выводы по главе 1 45

ГЛАВА 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ 47

2.1 Лабораторный стенд для исследования искрообразования в грунтах 47

2.2 Методики электрических измерений 51

2.3 Высоковольтный полигон 56

2.4 Выводы по главе 2 59

ГЛАВА 3 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ 60

3.1 Лабораторные исследования импульсного сопротивления электродов в высокоомном грунте 60

3.2 Оптические наблюдения искровых каналов в объеме грунта 69

3.3 Полигонные испытания на электродах, соизмеримых с реальными заземлителями . 73

3.4 Выводы по главе 3 81

ГЛАВА 4 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИМПУЛЬСНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДА 84

4.1 Обоснование предлагаемого подхода 84

4.2 Математическое описание модели и верификация 87

4.3 Выводы по главе 4 93

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 95

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 97

ПРИЛОЖЕНИЕ А Акт внедрения результатов исследования 108

ПРИЛОЖЕНИЕ Б Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 109

ВВЕДЕНИЕ

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

Основные задачи исследования:

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., Приложение А). 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.

На защиту выносятся следующие положения:

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 (пункты списка литературы № 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 53, 65, 66, 67, 89), 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 (Приложение Б) [34].

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.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ИСКРООБРАЗОВАНИЯ В ВЫСОКООМНЫХ ГРУНТАХ И МЕТОДОВ РАСЧЕТА ИМПУЛЬСНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАЗЕМЛИТЕЛЕЙ

1.1 Роль заземляющих устройств в обеспечении грозозащиты объектов электроэнергетики

Заземляющие устройства (ЗУ) являются неотъемлемым элементом электроэнергетических систем, выполняющим функции обеспечения электробезопасности, защиты оборудования и надежного функционирования релейной защиты и автоматики. В соответствии с действующими нормативными документами [32], основными задачами ЗУ являются:

- ограничение напряжений прикосновения и шага до безопасных значений при замыканиях на землю и грозовых воздействиях;
- обеспечение цепей протекания токов короткого замыкания для гарантированного срабатывания релейной защиты;
- отвод токов молнии в землю и ограничение грозовых перенапряжений, набегающих на подстанционное оборудование и линейную изоляцию;
- выравнивание потенциалов на территории электроустановок.

При грозовых воздействиях роль ЗУ становится критической. Удары молнии в элементы воздушных линий электропередачи (ВЛ) или вблизи них являются одной из наиболее частых причин аварийных отключений [3, 96]. Возникающие при этом перенапряжения могут достигать миллионов вольт. Это может приводить к перекрытию изоляции, повреждению оборудования, а в ряде случаев – к системным авариям с экономическими последствиями. Величина грозовых перенапряжений, воздействующих на изоляцию оборудования, напрямую зависит от эффективности работы заземляющих устройств: чем ниже сопротивление ЗУ, тем быстрее затухает волна перенапряжения и тем меньшая его доля достигает защищаемого объекта [29].

На практике эффективность заземляющего устройства оценивается по величине его стационарного сопротивления R_c, измеряемого на промышленной частоте 50 Гц. Нормативные требования к стационарному сопротивлению регламентируются Правилами устройства электроустановок (ПУЭ) [32] и зависят от класса напряжения, режима нейтрали и типа заземляемого объекта. Для подстанций 110 кВ и выше, как

правило, сопротивление заземляющего контура не должно превышать 0,5 Ом, а для опор воздушных линий в населенной местности может достигать 30 Ом и более [32].

Однако при протекании токов молнии, длительность которых составляет десятки микросекунд, а амплитуда достигает сотен килоампер, поведение заземлителя принципиально меняется. Для описания поведения заземлителя при грозовых воздействиях используется понятие импульсного сопротивления $R_и(t)=U(t)/I(t)$, которое, в отличие от стационарного, не является постоянной величиной и может существенно изменяться во времени под действием протекающего тока. Это связано с нелинейными процессами (ионизацией и искрообразованием), возникающими в грунте при высоких плотностях тока [72, 93]. Когда напряженность электрического поля $E_{кр}$ превышает критическое значение в воздушных порах грунта развиваются частичные разряды и формируются плазменные каналы. Эффективная поверхность стекания тока увеличивается, а общее сопротивление заземлителя снижается. Степень этого снижения может достигать 3-5 раз и зависит от параметров импульса и свойств грунта.

Особенно актуальна данная проблема стоит в регионах с высоким удельным сопротивлением грунта, к которым относится Кольский полуостров и значительная часть Арктической зоны РФ. Грунты здесь – скальные породы, морена, пески с низкой естественной влажностью. Удельное сопротивление таких грунтов может достигать 1000–5000 Ом·м и более [31]. В этих условиях стационарное сопротивление заземлителей может существенно превышать нормативные значения.

Но именно в высокоомных грунтах искрообразование может дать наибольший эффект. При ударе молнии вокруг электрода возникает электрическое поле, напряженность которого достаточна для ионизации. Это приводит к уменьшению удельного сопротивления грунта вокруг заземлителя и, как следствие, к снижению общего сопротивления заземлителя [7]. В некоторых случаях это позволяет обеспечить грозозащиту объекта даже тогда, когда стационарное сопротивление превышает нормативное значение. Но чтобы учесть этот эффект при проектировании, нужны достоверные данные. Нужно знать, как именно развиваются искровые каналы в грунте и как они влияют на импульсное сопротивление. Современные представления об искрообразовании в грунтах основаны в основном на опытах середины XX века [95]. В них практически отсутствуют систематические данные о влиянии длительности импульса на динамику искрообразования, а также о структуре искровой зоны в объеме

грунта. Это определяет необходимость проведения дополнительных экспериментальных исследований по изучению закономерностей динамики искрообразования в высокоомных грунтах.

1.2 Физические процессы в грунтах при протекании больших импульсных токов

Грунт представляет собой многокомпонентную среду, состоящую из твердых фаз (минеральные частицы различного размера и состава), жидких (вода, электролиты) и газовых (воздух в порах). Электрические свойства грунта зависят от соотношения этих фаз, их взаимным расположением и характером связей между ними [50]. Твердые частицы грунта (песок, глина, гравий, скальные породы) обладают высоким удельным сопротивлением и являются фактически диэлектриками. Ток в грунте проводят в основном влага и растворенные в ней соли, обеспечивающие ионную проводимость. Воздух между твердыми частицами грунта обладает высоким удельным сопротивлением и существенно влияет на электрическую прочность грунта [30]. Удельное сопротивление грунта ρ является интегральной характеристикой, которая зависит от типа грунта, пористости, влажности, температуры, концентрации солей. Большинство типов грунтов в увлажненном состоянии имеют значения ρ от десятков до тысяч Ом·м. Если влажность падает или грунт промерзает, сопротивление может вырасти на порядки.

Когда напряженность электрического поля меньше критического значения ($E < E_{кр}$) проводимость грунта носит ионный характер и подчиняется закону Ома. В этом случае сопротивление заземлителя не зависит от приложенного напряжения и может быть рассчитано по классическим формулам для однородной среды [33]. Стационарное сопротивление одиночного вертикального электрода длиной L и радиусом r_0 в однородном грунте описывается выражением $R = \frac{\rho}{2\pi L}\ln(\frac{2L}{r_0})$ [94]. Данная формула используется на практике и лежит в основе большинства методик расчета заземляющих устройств.

При стекании с заземлителя больших импульсных токов (токов молнии) плотность тока j в приэлектродной области может достигать значений 10^5-10^6 А/м² [48]. Это приводит к возникновению напряженности электрического поля $E = \rho \cdot j$, которая может превышать критическое значение $E_{кр}$ [72]. Критическая напряженность $E_{кр}$ – это

минимальная напряженность электрического поля, при которой начинается ионизация грунта. Ее значение зависит от типа грунта, влажности, гранулометрического состава и лежит в диапазоне 4-16 кВ/см [44].

Процесс искрообразования в грунтах носит сложный характер: ионизация газа, нагрев влаги, формирование плазменных каналов и последующую деионизацию [93]. Интенсивность и характер стадий зависят от параметров импульса (амплитуды и длительности), грунта (удельное сопротивление и влажность) и конфигурации электродов [8, 21]. Различают развивающиеся по поверхности грунта разряды (поверхностные разряды,) и формирующиеся непосредственно внутри грунта (объемные разряды) [4]. Поверхностные разряды изучены достаточно подробно, а вот объемные искровые каналы исследованы слабо. Это связано в первую очередь с невозможностью оптического наблюдения разрядов внутри грунта. Все существующие модели предполагают образование вокруг электрода сплошной проводящей зоны [72, 93, 51], но экспериментальных подтверждении этому нет. При этом в отдельных работах [89] пишут о возможность развития локализованных каналов. Это требует проведения систематических экспериментальных исследований для изучения реальных искровых процессов в объеме грунта.

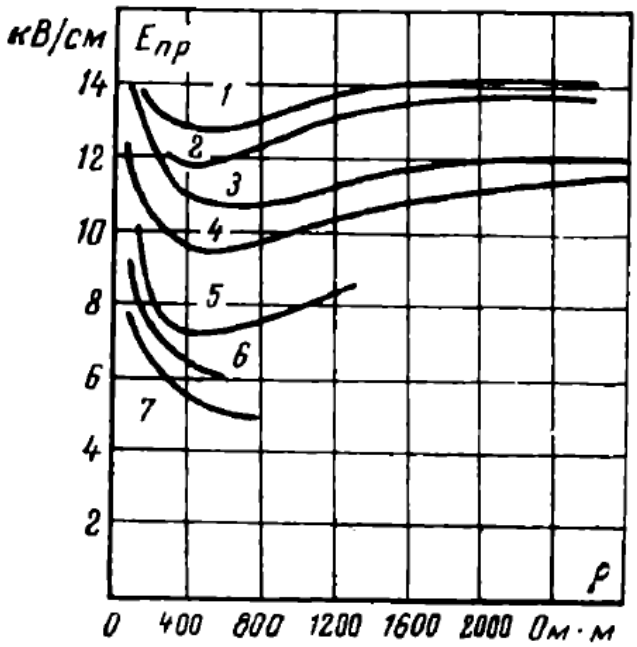
1.3 Обзор экспериментальных исследований искрообразования в грунтах

Первые экспериментальные исследования, посвященные изучению процессов в грунтах при протекании больших импульсных токов, были проведены в конце 1920-х годов. В работе Towne [95] авторы впервые заметили существенное различие между стационарным и импульсным сопротивлением заземлителей. Для стержневого электрода длиной 1,8 м при токе 1 кА импульсное сопротивление оказалось на 30-40 % ниже стационарного, что авторы связали с искрообразованием в грунте.

Фундаментальные основы исследования импульсных характеристик заземлителей были заложены в середине XX века. В работах Bellaschi с соавторами [47, 48] на основе обширных полевых работ было установлено, что снижение импульсного сопротивления заземлителей обусловлено пробоем окружающего грунта. Авторами было введено понятие «критической напряженности электрического поля», при достижении которой начинается ионизация. Также они предложили первую математическую модель, согласно которой размеры электрода (радиус и длина) динамически увеличиваются с ростом тока.

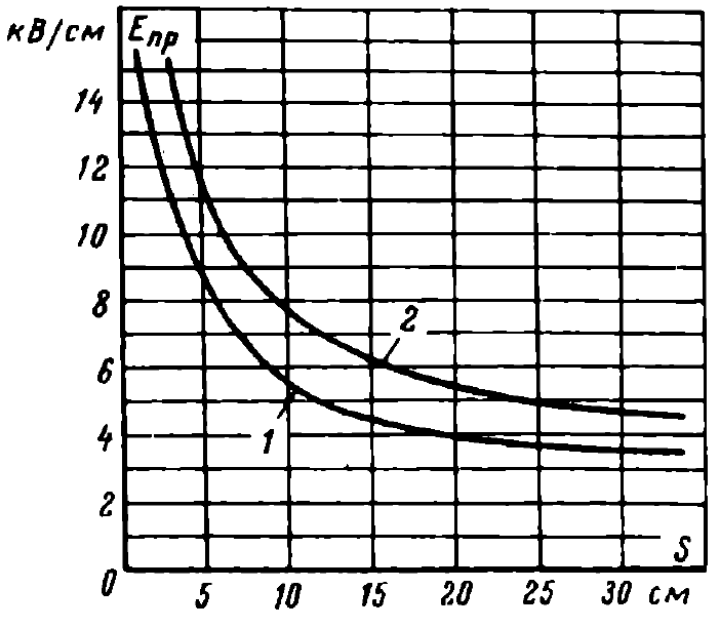
Обширные исследования электрических свойств грунтов при растекании токов промышленной частоты и импульсных токов молнии были выполнены Е.Я. Рябковой и описаны в ее монографии [33]. В работе показано, что удельное сопротивление грунта зависит от типа и гранулометрического состава грунта, содержания и химического состава влаги, температуры, а также плотности и частоты протекающего тока. Эти факторы существенно влияют на сопротивление в высокоомных грунтах, к которым относятся скальные породы, сухие пески, супеси и моренные отложения, характерные для Кольского полуострова и других регионов Арктической зоны РФ. В таких грунтах стационарное сопротивление заземлителей может в несколько раз превышать нормативные значения. Традиционные методы проектирования заземляющих устройств здесь неприменимы без учета нелинейных процессов, возникающих при грозовых воздействиях.

Для того, чтобы понять механизмы снижения импульсного сопротивления заземлителей необходимо знать значения критической напряженности электрического поля $E_{пр}$, при котором начинаются искрообразования в грунтах. В монографии Елены Яковлевны Рябковой [33] по осциллограммам пробоя на фронте импульса напряжения с различным предразрядным временем построены зависимости $E_{пр}$ от удельного сопротивления грунта ρ (рисунок 1.1) [33]. Из рисунка видно, что для всех образцов грунта электрическая прочность уменьшается при увеличении предразрядного времени в интервале 3-5 мкс. Причем это влияние наиболее значительно для грунтов с малым удельным сопротивлением. Наибольшие значения $E_{пр}$ при одинаковом ρ наблюдаются у песка, а наименьшие – у красной глины [33]. При увеличении удельного сопротивления грунта критическая напряженность электрического поля $E_{пр}$ для различных грунтов становится практически одинаковой. Отсюда можно сделать вывод, что пробой в сухих грунтах происходит в воздушных порах между твердыми частицами и их состав не оказывает существенного влияния. В монографии также приведены данные по электрической прочности песка в неоднородном поле в зависимости от расстояния между электродами (рисунок 1.2).



1 – песок (τ=3 мкс), 2 – песок (τ=5 мкс), 3 – глина желтая (τ=3 мкс), 4 – глина желтая (τ=5 мкс), 5 – перегной растительный (τ=3 мкс), 6 – глина красная (τ=3 мкс), 7 – глина красная (τ=5 мкс)

Рисунок 1.1 – Электрическая прочность песка, глины и перегноя в однородном поле [33]



1 – ρ = 100-200 Ом·м, 2 – ρ = 1600 Ом·м

Рисунок 1.2 – Электрическая прочность песка в зависимости от расстояния между электродами [33]

Из рисунка видно, что с увеличением расстояния между электродами от 10 до 30 см средняя электрическая прочность резко снижается (с 5.4 до 3.1 кВ/см для влажного песка и с 7.5 до 4.5 кВ/см для сухого), а затем медленно приближается к постоянному значению. Также в монографии приводятся данные по диэлектрической проницаемости песчаного грунта в диапазоне частот до 1 МГц, что важно для оценки влияния емкостных токов в высокоомных грунтах ($\rho > 2500$ Ом·м). Показано, что в диапазоне $\rho = 2000$-12500 Ом·м относительная диэлектрическая проницаемость изменяется незначительно (от 7 до 6.2), что позволяет использовать среднее значение $\varepsilon = 7$ в инженерных расчетах.

В монографии [33] приведены результаты экспериментальных исследований импульсных характеристик заземлителей опор воздушных линий. Рябкова Е.Я. использовала метод физического моделирования на основе теории подобия (масштаб 1:40). В работе приведены результаты с вертикальными электродами длиной до 10 м, лучевыми заземлителями с длиной луча до 30 м и комбинированными конструкциями с вертикальными электродами. Эксперименты проводились на грунтах с удельным сопротивлением от 100 до 2000 Ом·м и при амплитудах тока до 200 кА. Для песчаных грунтов нелинейная зависимость удельного сопротивления от напряженности поля не превышала 10%, и основное снижение импульсного сопротивления обусловлено искровыми процессами. Импульсное сопротивление определялось как $Z_и = U_и/I_и$, где $U_и$ – напряжение в момент пика тока. Автором были получены зависимости импульсного коэффициента $\alpha = Z_и/R$ от удельного сопротивления и тока. В работе показано, что дополнительные вертикальные электроды снижают стационарное сопротивление лучевых заземлителей, но при этом увеличивают импульсный коэффициент. Это связано с тем, что увеличивается площадь поверхности, из-за этого уменьшается плотность тока и соответственно интенсивность искрообразования [33].

При экспериментальных работах Рябкова Е.Я. использовала метод физического моделирования [33]. Принимая за основные параметры ток i, импульсное сопротивление $z_и$, индуктивность L, время t, удельное сопротивление грунта ρ, электрическую прочность $E_{пр}$ и линейный размер l, автор на основе П-теоремы показывает, что число независимых параметров равно четырем, а число критериев подобия – трем. При выборе линейного масштаба $m_l = 1/40$ и масштабов удельного сопротивления и электрической прочности, равных единице (т.е. грунт модели идентичен исходному грунту), масштабы

тока и напряжения составляют соответственно m_i =1/1600 и m_u =1/40. Это означает, что при исследовании модели заземлителя с сопротивлением, например, 10 Ом, при токах до 200 кА в натуре, испытательная установка должна обеспечивать ток всего 125 А и напряжение до 5 кВ, что технически реализуемо в лабораторных условиях [33]. В случае протяженных заземлителей необходимо отдельно моделировать их распределенную индуктивность. С помощью описанной методики в работах Рябковой Е.Я. и ее коллег были выполнены исследования импульсных характеристик ЗУ опор ВЛ (вертикальных электродов длиной до 10 м, лучевых заземлителей с длиной луча до 30 м, а также комбинированных конструкций с вертикальными электродами) в однородном песчаном грунте с удельным сопротивлением от 100 до 2000 Ом·м. Авторами были получены зависимости импульсного коэффициента $\alpha = z_и / R$ от удельного сопротивления грунта и тока для различных конфигураций ЗУ.

Особый интерес представляют исследования распределения потенциала и напряженности электрического поля в искровой зоне. Для данных работ использовалась специальная цилиндрическая модель (рисунок 1.3).

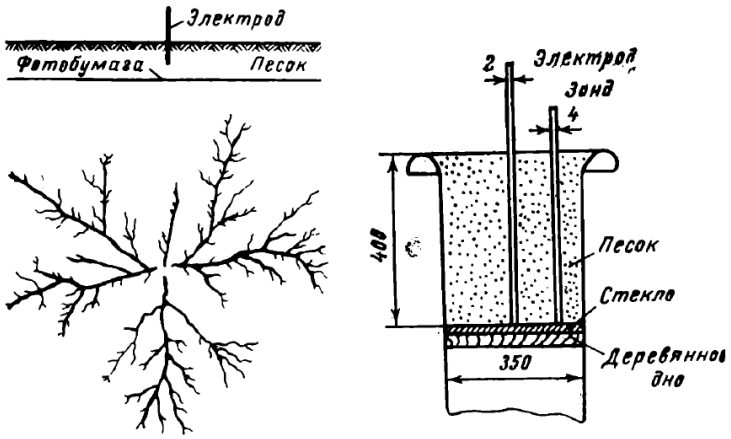


Рисунок 1.3 – Искровая зона вокруг вертикального электрода, заснятая на фотобумаге и модель для исследования распределения потенциала поля вокруг электрода при наличии искровой зоны [33]

Как видно из рисунка в модели пространство между двумя коаксиальными цилиндрами заполнялось песком, напряжение подавалось на внутренний электрод, а внешний заземлялся. С помощью зонда измерялось распределение потенциала [33]. По полученным данным были определены радиусы искровой зоны и соответствующие им эквивалентные электрические прочности грунта (таблица 1.1). Полученные значения $E_э$ оказались существенно ниже, чем измерения в однородном поле. Это вызвано неоднородностью поля электрода и неравномерным развитием искровой зоны.

Таблица 1.1 – Эквивалентные электрические прочности грунта по результатам измерений в цилиндрической модели [33]

Исходные данные					Результаты расчета		
ρ, Ом·м	R, Ом	U, кВ	I, А	$\tau_ф$, мкс	$R_э$, Ом	$r_э$, см	$E_э$, кВ/см
120	250	20,6	150	12	138	1	7,2
140	300	24	161	5	149	1,2	7,4
440	900	22,2	152	6	430	1,5	6,1
440	900	34,1	120	6	284	3,5	6,0
580	1190	40	171	5	234	6,3	6,2

В таблице 1.2 приведены результаты измерений напряженности электрического поля в каналах разряда, измеренные по трем направлениям. Как видно из таблицы, «эти напряженности невелики и снижаются с увеличением тока, стекающего с электрода» [33]. Как утверждают авторы, при расчетах импульсного сопротивления падением напряжениям в искровой зоне можно пренебречь и это не приведет к значительным ошибкам.

Оптические результаты экспериментов Рябковой Е.Я. (рисунок 1.3) показывают, что искровые каналы в грунтах развиваются не сплошной зоной, а в виде дискретных каналов разной длины.

Таблица 1.2 – Средние напряженности поля в пределах искровой зоны [33]

Данные измерения		Результаты расчета				
ρ, Ом·м	I, А	$r_э$, см	$E_э$, кВ/см, по трем направлениям			$E_{ср}$, кВ/см
			I	II	III	
440	52	1,5	2	1,48	0,72	1,4
440	120	3,5	1,8	1,5	0,7	1,33
120	150	1,0	1,2	1,75	0,82	1,26

Экспериментальные исследования переходных характеристик заземлителей при токах до 26 кА были выполнены Kosztaluk R. с соавторами [69] на железобетонных фундаментах опор ЛЭП. Авторами зафиксировано существенное (до 2-3 раз) снижение импульсного сопротивления при увеличении амплитуды тока, а также получены петлеобразные вольт-амперные характеристики, свидетельствующие о гистерезисе процессов ионизации. На основе анализа осциллограмм было показано, что снижение

сопротивления начинается при плотности тока около 0.3 А/см^{2}и связано с образованием так называемой «канальной зоны», в которой проводимость осуществляется через искровые и дуговые каналы.

Дальнейшее развитие экспериментальных исследований для горизонтальных электродов различной длины было выполнено в конце 1990-х годов. Экспериментальные исследования импульсного сопротивления горизонтальных заземлителей при больших токах (до 40 кА) выполнены Sekioka S. с соавторами [92]. Испытания проводились для электродов длиной 8.1, 17 и 34 м, заглубленных в грунт с удельным сопротивлением 436–522 Ом·м. Показано, что степень снижения импульсного сопротивления с ростом тока наиболее выражена для короткого электрода (8.1 м), в то время как для электродов длиной 17 и 34 м зависимость от тока становится слабее.

В работе В.З. Анненкова [1] выполнен анализ результатов испытаний заземлителей различных авторов (А.Л. Вайнера, К. Бергера, П.Л. Белласки, В.И. Нижевского) в песчаных и глинистых грунтах. На основе обработки экспериментальных данных установлено, что критическая напряженность на границе зоны искрообразования E_k не является постоянной величиной, а уменьшается с увеличением фиктивного радиуса искровой зоны по закону $E_k = N / r_ф$. Показано, что для песчаных грунтов ($\beta \approx 1$) это выражение позволяет с единых позиций описать результаты различных исследователей. Автором также рассмотрено влияние нелинейности вольт-амперной характеристики грунта на размеры зоны искрообразования и определены условия, при которых искрообразование становится возможным даже в грунтах с сильно выраженной нелинейностью (глины). Полученные результаты свидетельствуют о необходимости пересмотра теории подобия заземлителей, основанной на допущении о постоянстве критической напряженности.

Экспериментальному исследованию переходных характеристик заземлителей различных конфигураций посвящена работа Nayel M. [82]. Автор выполнил измерения на сферическом электроде, заглубленном на разную глубину (0–30 см) в грунт с удельным сопротивлением, уменьшающимся с глубиной (от ~200 Ом·м на поверхности до ~50 Ом·м на глубине 30 см). Импульсы тока с фронтами 7 нс и 308 нс подавались от генератора импульсов, регистрация осуществлялась цифровым осциллографом с полосой 500 МГц. Результаты показали, что импеданс электрода снижается с увеличением глубины залегания, что объясняется уменьшением удельного

сопротивления грунта. Кроме того, импеданс оказался существенно зависимым от крутизны фронта: при фронте 7 нс (более высокие частоты) импеданс снижался быстрее, чем при фронте 308 нс.

Много работ посвящено разным методам оптической регистрации искровых каналов в грунтах. Zhang B. с соавторами [99] в своей работе использовали рентгеновскую пленку для регистрации в песчаных и глинистых грунтах. На полученных снимках наблюдается несколько зон ионизации: помимо основной зоны вокруг электрода образуются изолированные очаги, не связанные с основным каналом. Авторы объясняют данное явление тем, что грунт имеет неоднородную структуру, разные диэлектрические свойства и размер частиц, в результате чего может происходить увеличение напряженности электрического поля в воздушных промежутках. Авторы разработали упрощенную двухфазную модель «твердые частицы - газ» и показали, что изменение размеров, формы и свойств частиц грунтах может приводить к тому, что в удалении от электрода будет образовываться напряженность электрического поля достаточная для ионизации.

В работе He J. с соавторами [63] проводились исследования времени задержки между приложенным импульсом и пробоем. Авторы показали, что полное время задержки складывается из времени достижения напряжением пробивного значения, временем появления первого эффективного электрона, способного начать ионизацию и временем формирования искрового канала. Как и в случае пробоев воздушных промежутков, в грунтах для коротких промежутков основное время занимает появление эффективного электрона.

В работе [71] Li J. с соавторами проводили исследование импульсных характеристик моделей заземлителей различной конфигурации. Эксперименты проводились в сферической емкости диаметром 5 метров, заполненной песком с удельным сопротивлением 115 Ом·м на 7 типов электродах (одиночные горизонтальные электроды, крестообразные, сетчатые конструкции и т.д.). Импульсы тока 8/20 мкс с амплитудой до 168 А подавались в различные места электродов и с помощью поясов Роговского измерялось распределение тока вдоль электродов. Авторами показано, что ток распределяется неравномерно, увеличивается к концам электродов, а для многолучевых конструкций наблюдаются эффекты экранирования.

Ещё одна экспериментальная работа [38] посвящена исследованию процессов ионизации при испытании фундаментов опор ВЛ. На рисунке 1.4 приведены осциллограммы тока и напряжения, полученные при генерации в фундамент импульса амплитудой около 2 кА. На кривых напряжения и тока виден провал и появление второго пика в момент времени примерно 4-5 мкс. Данное поведение говорит об образовании искрового канала и резком снижении сопротивления [85].

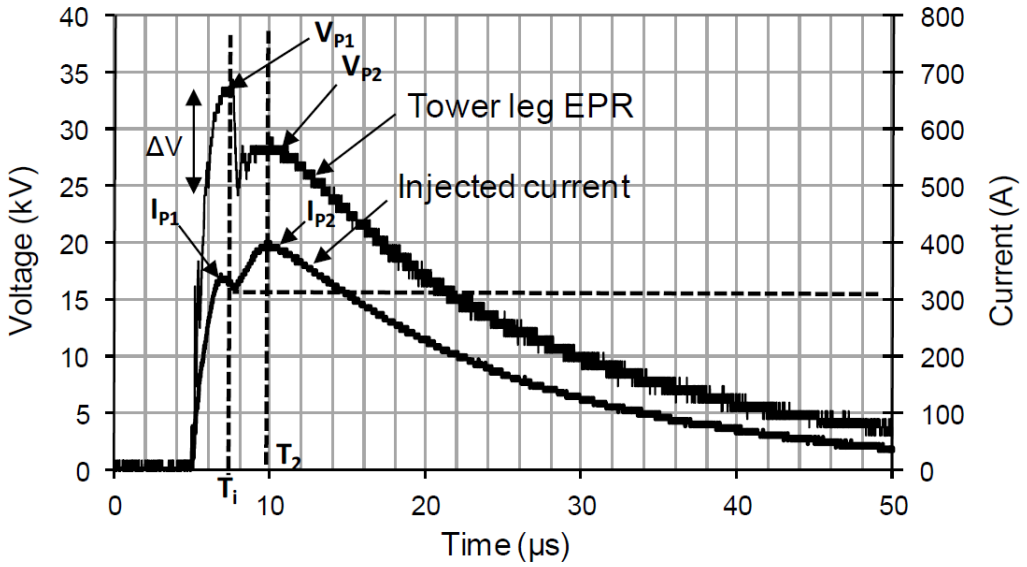


Рисунок 1.4 – Осциллограммы напряжения и тока на заземлителе опоры ЛЭП [85]

На основе полученных данных авторы [38] делают вывод, что ток начала ионизации I_i зависит от крутизны фронта импульса di/dt. Из рисунка 1.5 видно, что увеличение скорости насрастания тока от 200 до 1000 А/мкс приводит к увеличению тока ионизации с 400 до 1000 А. Это ещё одна работа, подтверждающая тот факт, что критическая напряженность электрического поля не является постоянной величиной, а зависит от многих факторов.

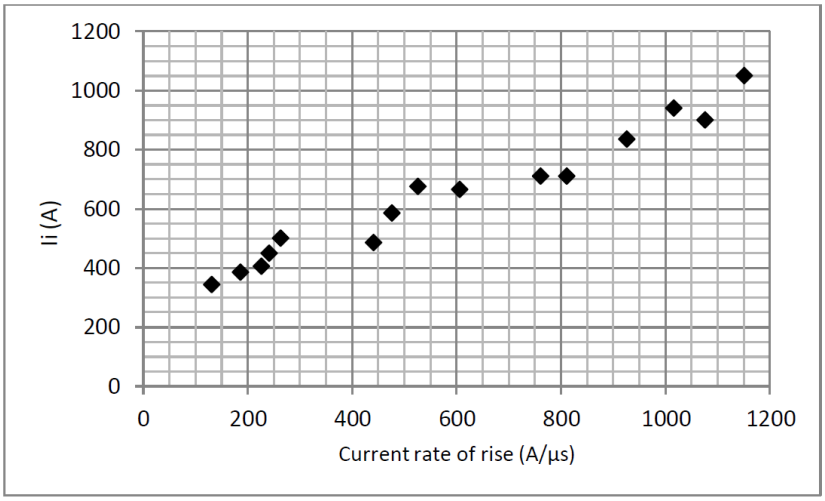


Рисунок 1.5 – Зависимость тока ионизации от скорости нарастания импульса тока [85]

В работе S. Liu с соавторами [74] с помощью регистраций рентгеновского излучения получены фотографии разрядов в толще песчаного грунта (рисунок 1.6). При амплитуде импульса тока 2,8 кА на рисунке наблюдаются отдельные искровые каналы. С помощью конечно-элементного моделирования авторам удалось установить, что остаточное удельное сопротивление в канале ρ_{res} составляет всего 0,001-0,003 % от исходного сопротивления грунта ρ_0, что сильно расходится с более ранними работами [75]. При влажности грунта 2-5 % авторы получили критическую напряженность электрического поля E_c = 100-150 кВ/м, что совпадает с данными, полученными Flanagan [55]. Это ещё одна работа, в которой авторы указывают на то, что при моделировании нельзя делать допущения о симметричной искровой зоне вокруг электрода, а необходимо проводить оптические методы регистрации.

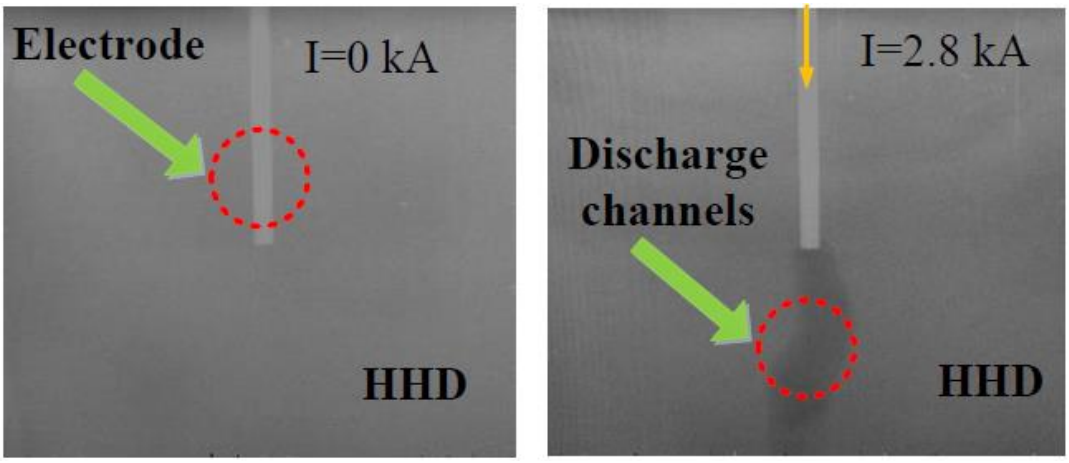
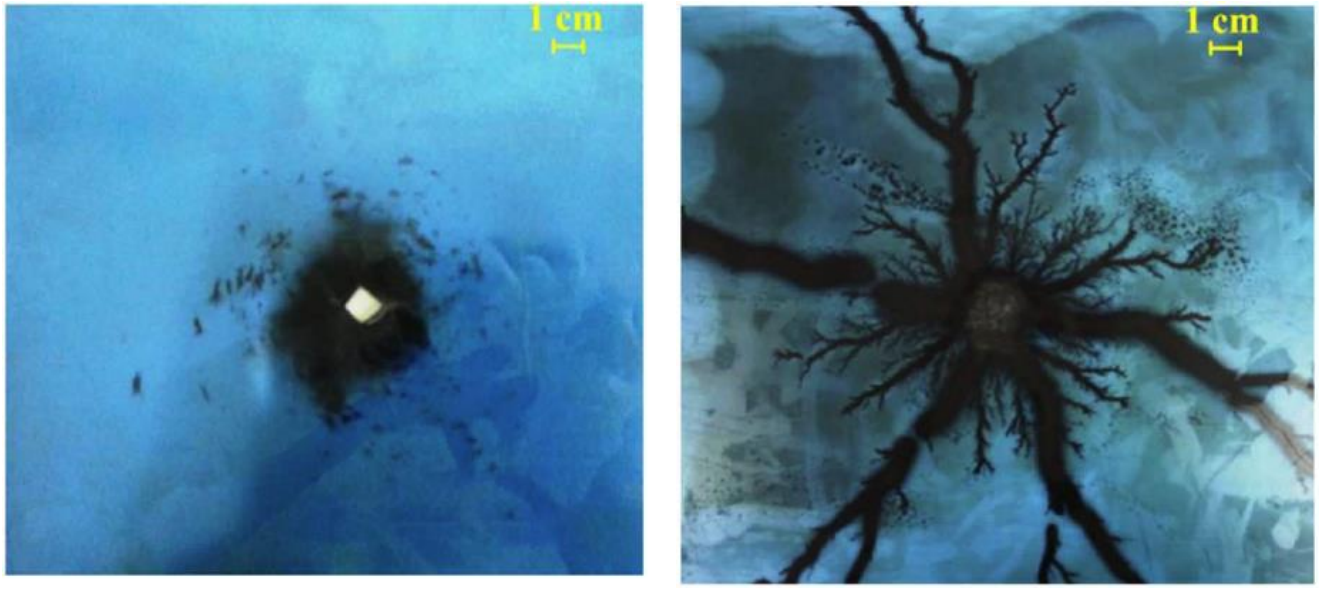


Рисунок 1.6 – Рентгеновские снимки разряда [74]

Как я уже писал раннее, процессы ионизации и искрообразования в грунте начинаются, когда напряженность электрического поля превышает критическое значение. Это значение варьируется от десятков до тысяч кВ/м в зависимости от метода измерения и свойств грунта. В работе [98] Zhang B. с коллегами для определения критической напряженности электрического поля используют коаксиальный цилиндрический пробник и регистрируют рентгеновское излучение для подтверждения факта ионизации (рисунок 1.7). Авторы предлагают определять начало ионизации по точке перегиба на кривой зависимости импульсного сопротивления R_{imp} от амплитуды приложенного напряжения и считают, что этот метод позволяет более точно фиксировать момент возникновения ионизации по сравнению с анализом осциллограмм тока и напряжения.



а б

Рисунок 1.7 – Рентгеновские фотографии: а – процесс ионизации, б – искровые каналы [98]

Важным результатом работы [98] является установление зависимости E_i от радиуса заземлителя. Экспериментально показано, что с увеличением радиуса электрода от 3 до 25 мм критическая напряженность снижается (например, для грунта с ρ = 260 Ом·м с 1478 до 522 кВ/м). Эта зависимость аналогична известной зависимости напряженности коронного разряда в воздухе и объясняется тем, что для тонких электродов поле спадает быстрее, и для поддержания ионизации требуется более высокая напряженность на поверхности. Авторы предложили эмпирическую формулу, учитывающую влияние радиуса: $E_i(r,\rho) = (19.916+30.861/r)\rho^{0.17}$, которая обобщает и уточняет ранее предложенную зависимость Oettle [86].

В работе [37] авторами выполнены экспериментальные исследования шести различных конфигураций вертикальных электродов (одиночные стержни, параллельные стержни и их комбинации) в грунте с удельным сопротивлением 1500 Ом·м. Стационарное сопротивление исследованных заземлителей составляло от 253 до 834 Ом. Такие значения характерны для скальных и песчаных грунтов Арктической зоны. При импульсах амплитудой до 9 кА авторы фиксируют снижение импульсного сопротивления Z_{imp} по сравнению со стационарным сопротивлением R_{DC} от 73% до 89% в зависимости от конфигурации электрода и амплитуды тока. При этом авторы отмечают, что для заземлителей с меньшим стационарным сопротивлением зависимость Z_{imp} от тока выражена слабее, что связано с индуктивными эффектами. Дальнейшее

увеличение амплитуды напряжения приводило к уменьшению импульсного сопротивления до 95% от стационарного значения до 20 Ом. Авторы также проводили эксперименты при разных полярностях импульсов. При отрицательной полярности напряжение пробоя было выше, чем при положительной, но при этом время до пробоя - меньше. Полученные в работе результаты показывают, что в высокоомных грунтах интенсивность искрообразования выше, что можно использоваться для обеспечения надежной грозозащиты объектов.

Все ученые, которые занимаются экспериментальными исследованиями процессов ионизации и искрообразований в грунтах в своих работах используют параметр импульсного сопротивления. При этом сопоставлять данные, полученные разными авторами практически невозможно, потому что все определяют значение импульсного сопротивления по разному. В статье [60] Harid N. с коллегами обобщили все способы определения импульсного сопротивления по осциллограммам и выделили 4 основных:

$Z_1 = V_p / I_p$ – отношение максимум напряжения (V_p) и тока (I_p) [48, 69];

$Z_2 = V(t_{Ip}) / I_p$ – значение напряжения ($V(t_{Ip})$) в момент достижения током максимума [72];

$Z_3 = V_p / I(t_{Vp})$ – значение тока в момент достижения напряжением максимума ($I(t_{Vp})$);

$Z_4 = V(t = 6\text{мкс}) / I(t = 6\text{мкс})$ – значение отношения на фиксированный момент времени 6 мкс. Этот метод описан Oettle в своей работе [86] и он предлагает 6 мкс, т.к. это время соответствует фронту тока первой компоненты молнии.

Как видно из формул выше при одних и тех же осциллограммах напряжения и тока значения импульсного сопротивления будут сильно отличаться, особенно для протяженных электродов, где проявляются индуктивные эффекты. Поэтому Harid N. в своей статье[60] предлагает использовать импульсный индекс $A_i = Z_i / R_{dc}$, где R_{dc} – сопротивление на постоянном токе (или промышленной частоте). Авторы провели сравнения для электродов различных размеров и конфигурации и получили, что для сосредоточенных заземлителей значения всех индексов близки между собой. Для протяженных электродов различия становятся существенными: для горизонтального электрода длиной 88 м индекс A_1 более чем в полтора раза выше индекс A_4.

Такой разброс в значениях говорит о том, что ни один из параметров Z_1-Z_4 не дает полной картины поведения заземлителя при импульсном воздействии и наиболее эффективно анализировать кривые динамического сопротивления ЗУ $z(t) = v(t) / i(t)$ [60]. Данный метод позволяет рассматривать поведение электрода на фронте импульса, при максимуме напряжения и тока и на спаде импульса.

Для измерения сопротивления ЗУ на практике используется обычно метод падения потенциала [64]. Hasan. H. в своей статье [61] исследовал влияние взаимного расположения потенциального и токового контура. Автор отмечает, что для исключения взаимного влияния контуров их необходимо располагать строго под углом 90 градусов. В данной диссертации я использовал цифровой осциллограф, подключенный к делителю напряжения и токовому шунту, чтобы можно было исследовать динамику изменения сопротивления электродов в течение всего импульса [17].

Как я уже писал раннее, критическая напряженность электрического поля зависит от параметров импульса и характеристик грунта. Существует несколько способов определения критических значений и в статье [44] Asimakopoulou F.E. с соавторами описали основные пять подходов:

- по вольт-амперной характеристике (появление петли гистерезиса);
- по поведению импульсного сопротивления $Z(t)$ (момент отклонения от кривой при низких напряжениях);
- по временной задержке между пиками тока и напряжения;
- по появлению второго пика в осциллограмме тока;
- по напряжению пробоя в квазиоднородном поле (для коротких промежутков).

Для расчета критической напряженности электрического поля обычно использую два подхода: на основе закона Ома с учетом площади поверхности электрода. В данном подходе предполагается, что удельное сопротивление грунта в зоне ионизации равно нулю. Во втором подходе используют отношение напряжения пробоя к длине промежутка. В таблице 1.3 [44] приведены экспериментальные значения критической напряженности электрического поля, полученные различными авторами для разных типов грунта. Как видно из таблицы значения варьируются от 13 кВ/м до 3000 кВ/м и более, что говорит об отсутствие единого подхода измерения и сильную зависимость результатов от методики эксперимента, типа грунта и конфигурации электродов.

Существует несколько работ, в которых авторы разработали формулы для расчета критической напряженности электрического поля. В работе [44] Asimakopoulou с коллегами провели критический анализ существующих формул, в том числе и классическую формулу Oettle [86] $E_0 = 241\rho^{0,215}$. Авторы отмечают, что использование данных эмпирических формул для различных грунтов приводят к существенным погрешностям, т.к. они не учитывают гранулометрический состав, пористость, влажность и частотные свойства грунта.

1.4 Анализ существующих математических моделей импульсного сопротивления

Sunde E.D. в своей монографии [94] используя метод среднего потенциала и теорию зеркальных изображений получил аналитические выражения для сопротивления заземлителей различной конфигурации. Для вертикального стержня длиной l и радиусом a сопротивление определяется по формуле:

$$R = \frac{\rho}{2\pi l}\left(\ln\frac{4l}{a} - 1\right) \tag{1.1}$$

где ρ – удельное сопротивление грунта, Ом·м;

l – длина электрода, м;

a – радиус электрода, м.

Для горизонтального электрода, заглубленного на глубину d сопротивление определяется, как

$$R = \frac{\rho}{\pi l}\left(\ln\frac{2l}{\sqrt{2ad}} - 1\right) \tag{1.2}$$

где ρ – удельное сопротивление грунта, Ом·м;

l – длина электрода, м;

a – радиус электрода, м;

d – глубина заглубления электрода, м;

Для конструкций, состоящих из нескольких лучей, получены более сложные зависимости, учитывающие взаимное экранирование лучей.

В своей работы Sunde E.D представляет заземлитель в виде длинной линии с распределенными параметрами: продольным импедансом Z и поперечным адмиттансом Y. Для гармонического воздействия получено выражение входного сопротивления:

$$Z_0 = \sqrt{Z/Y}\coth\left(\sqrt{ZY}\,l\right) \tag{1.3}$$

где Z – импеданс заземлителя, Ом;

Y – адмиттанс заземлителя, Ом;

l – длина заземлителя, Ом.

Для переходных процессов автор получил выражения, позволяющие определять напряжение на заземлителе при произвольной форме тока. В своих моделях Sunde учитывает продольное активное сопротивление.

Таблица 1.3 – Критические напряженности электрического поля [44]

Исследователь	$\rho(Ом \cdot м)$	$E_C(кВ/м)$
Towne [94]	130–686	29–104
Bellaschi [47]	90–150	2250–4100
Bellaschi et al. [48]	70–290	127–424
Liew and Darveniza [72]	50–540	110–300
Dick et al. [52]	12–25	13–221
Geri [58]	–	30–800
Asaoka et al. [42]	487 228 2059 365	1040 1330 1430 1240
Norinder [90]	–	327–360
Berger [90]	1000	497–537
Petropoulos [90]	290	830
Armstrong [41]	52–495	330–480
Korsuntcev [86]	100–470	800–1200
Loboda and Pochanke [77]	30–750	150–500
Loboda and Scuka [76]	40–2150	560–900
Liu et al. [75]	174–827	328–516
Espel et al. [54]	<1000 1000–25,000 >25000	800 800–1700 1700
Lima and Visacro [73]	80–10000	370–1440 312–882
Lee et al. [70]	134.3–336.5	1020–1650
Nor et al. [84]	2.7–5.5	520–660
Asimakopoulou et al. [45]	–	767–984
Asimakopoulou et al. [46]	400–880	660–938
Flanagan et al. [56]	–	2700–3000
Dabkowski [81]	–	720–810
Oettle [87]	–	600–1850
He et al. [62]	–	300–1700
Nor et al. [84]	2.7–5.5	790–900
Manna and Chowdhury [79]	67–10000	560–1432

В разделе 8.8 автор рассказывает о влиянии ионизации грунта на импульсные характеристики заземлителей и отмечает, что при критических напряжениях в грунте

образуются проводящие каналы, за счет чего увеличиваются эффективные размеры электрода. Хотя Sunde не предлагает количественной модели этого процесса, его идеи отразились в последующих исследования, в том числе работах Рябковой [33] и более поздних публикациях [50].

В статье [48] Bellaschi, Armington и Snowden вводят понятие эффективный радиус, который описывает зону ионизации. Согласно разработанной авторами модели с ростом импульсного тока I эффективный радиус электрода увеличивается пропорционально отношению тока к критическому току начала ионизации ($a_i = a_0 \cdot I/I_b$), а эффективная длина может быть представлена как функция тока $L_i = L_0 + k \cdot I$. Сами авторы отмечали, что точный физический механизм снижения сопротивления остается не до конца изученным [48].

В отечественной литературе основы моделирования протяженных заземлителей с учетом нелинейных процессов были заложены в работе А.Л. Вайнера и С.М. Фертика [6]. Авторы впервые предложили представлять горизонтальный заземлитель в виде длинной линии с распределенными параметрами, где погонная проводимость g является нелинейной функцией напряжения, что позволяет учесть искровые процессы в грунте. Авторы вводят коэффициент нелинейности β, характеризующий степень увеличения проводимости за счет ионизации. Апробация модели проводилась на заземлителях длиной от 20 до 150 м в грунтах с удельным сопротивлением от 500 до 10 000 Ом·м при импульсных токах с фронтом 4-13 мкс. В работе [35] авторы экспериментально показали существование рациональной длины протяженного заземлителя, превышение которой не приводит к снижению импульсного сопротивления (для ρ = 500 Ом·м – около 40 м, для ρ = 2500 Ом·м – около 60 м).

В статье[28] Корсунцев А.В. предложил описывать импульсное сопротивление сосредоточенных заземлителей с помощью двух безразмерных комплексов π_1 и π_2. Это позволило обобщать экспериментальные данные для электродов различных размеров.

В статье [5] А.Л. Вайнером выполнено исследование импульсных характеристик сложных заземлителей. В статье автор рассматривает горизонтальные протяженные заземлители, трех- и четырехлучевые заземлители, а также сетчатые заземлители с ячейками 10×10 м с общей площадью от 20×20 до 100×100 м в грунтах с удельным сопротивлением от 10^2 до $2 \cdot 10^3$ Ом·м. Вайнер А.Л. отмечает, что существует зона эффективного стекания импульсного тока ($r_{эфф}$), за пределами которой увеличение

размеров заземлителя практически не снижает его импульсного сопротивления. Для грунтов с $\rho \approx 100$ Ом·м $r_{эфф} \approx 20$ м, а при $\rho \geq 1500$ Ом·м она возрастает до 60-100 м. В статье показано, что место ввода тока влияет на сопротивление заземлителя. Автором получены импульсные коэффициенты для сложных заземлителей при токах свыше 10 кА. Исследовано распределение напряжения на поверхности земли в пределах ячейки сетки: максимальный перепад напряжения на расстоянии 5 м составил $0.24U_{0m}$, что важно для оценки шаговых напряжений.

Наряду с моделированием сложных заземлителей, в этот период активно развивались аналитические методы расчета одиночных электродов. Наиболее полное развитие этот подход получил в работах Е.Я. Рябковой. В монографии [33] предложены аналитические методы расчета импульсного сопротивления одиночных электродов, основанные на модели симметричной искровой зоны. В этой модели предполагается, что при превышении током некоторого критического значения $I_{пр}$ вокруг электрода образуется проводящая зона (искровая зона), сопротивление которой принимается равным нулю, а граница зоны определяется равенством напряженности поля электрической прочности грунта $E_{пр}$. Для полусферического электрода радиусом r_0 автор получает выражение для импульсного сопротивления (формула 1.4), которое при $I > I_{пр}$ не зависит от геометрического размера r_0, а определяется током, удельным сопротивлением грунта и его импульсными характеристиками (параметром k и $E_{пр}$) [33]. Параметр k, характеризующий снижение удельного сопротивления грунта в импульсном поле, определяется из экспериментальных вольт-амперных характеристик и для различных типов грунта (песок, глина, перегной) изменяется в широких пределах (от 0,01 до 0,215 см/кВ), причем его значения зависят как от удельного сопротивления, так и от длительности фронта импульса.

$$R_{и} = \frac{U}{I} = \sqrt{\frac{\rho}{2\pi l k}}\left(1{,}57 - \operatorname{arctg}\sqrt{\frac{1}{kE_{пр}} - 1}\right) \qquad (1.4)$$

где U – напряжение на электроде, В;

I – ток, стекающий с электрода в грунт, А;

ρ – удельное сопротивление грунта, Ом·м;

l – длина электрода, м;

k – коэффициент снижения удельного сопротивления грунта;

$E_{пр}$ – критическое значение напряженности электрического поля, кВ/м.

Для вертикального стержневого электрода длиной l и радиусом r_0 автором предложена более сложная модель, учитывающая, что поле стержня не является сферически симметричным. Принимая, что ток стекает равномерно по длине электрода, напряженность поля на его поверхности можно оценить как $E = \rho I / (2\pi l r_0)$. Приравнивая это значение $E_{пр}$, находим ток начала искрообразования. В предположении, что искровая зона также имеет цилиндрическую форму радиусом $r_ф$, из условия $E(r_ф) = E_{пр}$ получаем выражение для фиктивного радиуса (формула 1.5). Импульсное сопротивление вертикального электрода при наличии искровой зоны определяется по формуле 1.6, а импульсный коэффициент – по формуле 1.7.

$$r_ф = \frac{I\rho}{2\pi l E_{пр}} \tag{1.5}$$

где I – ток, стекающий с электрода в грунт, А;

ρ – удельное сопротивление грунта, Ом·м;

l – длина электрода, м;

$E_{пр}$ – критическое значение напряженности электрического поля, кВ/м.

$$R_и = \frac{\rho}{2\pi l}\ln\frac{2l}{r_ф} = \frac{\rho}{2\pi l}\ln\frac{4\pi l^2 E_{пр}}{I\rho} \tag{1.6}$$

где I – ток, стекающий с электрода в грунт, А;

ρ – удельное сопротивление грунта, Ом·м;

l – длина электрода, м;

$r_ф$ – радиус границы ионизации, м;

$E_{пр}$ – критическое значение напряженности электрического поля, кВ/м.

$$\alpha = \frac{R_и}{R} = \frac{\ln\frac{4\pi l^2 E_{пр}}{I\rho}}{\ln\frac{2l}{r_0}} \tag{1.7}$$

где $R_И$ – импульсное сопротивление электрода, Ом;

R – стационарное сопротивление электрода, Ом;

I – ток, стекающий с электрода в грунт, А;

ρ – удельное сопротивление грунта, Ом·м;

l – длина электрода, м;

r_0 – радиус электрода, м;

$E_{пр}$ – критическое значение напряженности электрического поля.

На рисунке 1.8 представлены зависимости импульсного коэффициента от произведения $I\rho$ для электродов длиной 2, 5 и 10 м при двух значениях электрической прочности (6 и 12 кВ/см).

Аналогичные выражения получены и для горизонтального электрода (формулы 1.8, 1.9, рисунок 1.9).

$$R_{\text{и}} \cong \frac{\rho}{2\pi l}\ln\frac{l^2}{2hr_{\text{ф}}} = \frac{\rho}{2\pi l}\ln\frac{\pi l^2 E_{\text{пр}}}{hI\rho} \tag{1.8}$$

где ρ – удельное сопротивление грунта, Ом·м;

l – длина электрода, м

h – глубина погружения электрода, м;

$r_{\text{ф}}$ – радиус границы ионизации, м;

$E_{\text{пр}}$ – критическое значение напряженности электрического поля.

$$\alpha = \frac{R_{\text{и}}}{R} = \frac{\ln\frac{\pi l^2 E_{\text{пр}}}{hI\rho}}{\ln\frac{l^2}{2hr_0}} \tag{1.9}$$

где $R_{\text{И}}$ – импульсное сопротивление электрода, Ом;

R – стационарное сопротивление электрода, Ом;

I – ток, стекающий с электрода в грунт, А;

ρ – удельное сопротивление грунта, Ом·м;

l – длина электрода, м;

r_0 – радиус электрода, м;

$E_{\text{пр}}$ – критическое значение напряженности электрического поля.

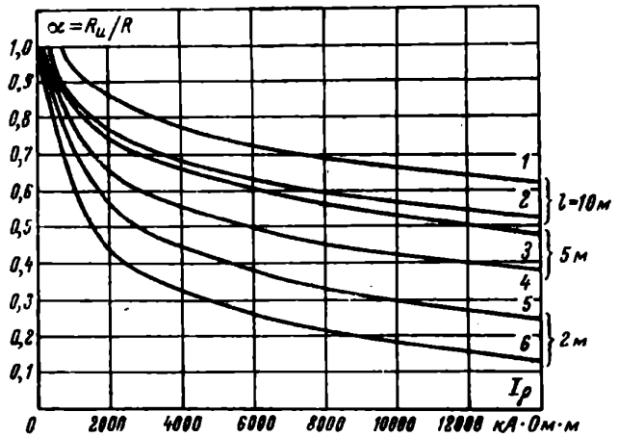
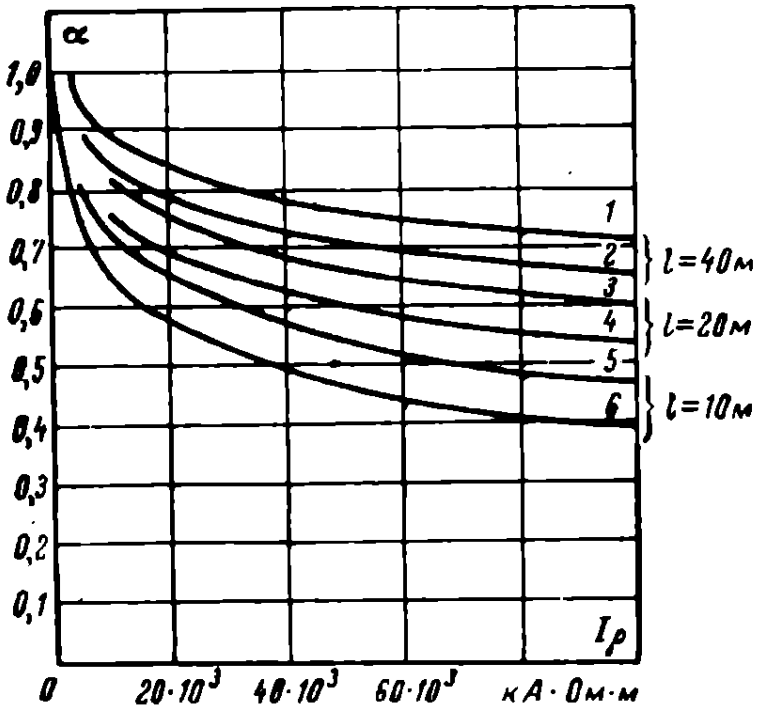


Рисунок 1.8 – Импульсные коэффициенты вертикальных электродов в зависимости от произведения $I\rho$, где1, 3, 5 – Епр = 12 кВ/см; 2, 4, 6 – Епр = 6 кВ/см [33]



1, 3, 5 – $E_{пр}$ = 12 кВ/см; 2, 4, 6 – $E_{пр}$ = 6 кВ/см

Рисунок 1.9 – Импульсные коэффициенты вертикальных электродов в зависимости от произведения I_ρ [33]

В монографии [33] Рябкова Е.Я. проводит сопоставление результатов аналитических расчетов с экспериментальными данными различных авторов (таблица 1.4).

Таблица 1.4 – Результаты сравнения расчетных импульсных сопротивлений с опытными данными и эквивалентные электрические прочности грунта [33]

Исходные опытные данные		Результаты расчета				$E_{пр}$ / $E_э$	$R'_и$ / $R_и$
I, А	$R_и$, Ом	$r_э$, см	$E_э$, кВ/см	$r'_ф$	$R'_и$		
6,25	1360	0,12	12,9	0,11	1380	1,08	1,01
15,6	1110	0,32	12,3	0,28	1145	1,14	1,03
31,2	805	0,72	11	0,57	968	1,27	1,07
62,5	696	1,62	9,9	1,14	787	1,41	1,13
125	505	3,45	9,2	2,28	612	1,52	1,21

Авторы сопоставляли 20 наборов данных для полусферы и 33 для вертикального стержня. Для полусферического электрода расхождение между расчетными и

экспериментальными данными составило +13 %, а для вертикально электрода – +16 % [33]. При этом расчетные данные всегда получались выше, чем экспериментальные. Рябкова Е.Я. указывает на две причины расхождений в данных. В расчетах автор использует напряженность электрического поля $E_{пр}$, измеренную в однородном поле, при этом в реальных грунт неоднороден и электрическое поле развивается неравномерно. Также делается допущение, что искровые каналы развиваются симметрично вокруг электрода, хотя это и не соответствует реальности (рисунок 1.3). Не смотря на эти причины, автор считает, что погрешность в 13-16 % является приемлемой для инженерных расчетов и полученные формулы можно использовать для предварительных расчетов импульсного сопротивления заземлителей.

Рябкова Е.Я. в своей монографии [33] также рассматривает протяженные заземлители (противовесы). Автор отмечает, что для расчета их импульсных характеристик необходимо учитывать распределенные параметры: индуктивность L и емкость C. В своей работе она рассматривала случай небольших амплитуд тока, чтобы можно было пренебречь искровыми процессами, а также предлагала не учитывать емкость для грунтов с удельным сопротивлением меньше 2500 Ом·м. На рисунке 1.10 приведена схема замещения протяженного заземлителя в виде длиной линии с распределенными параметрами инудктивности L и проводимости g.

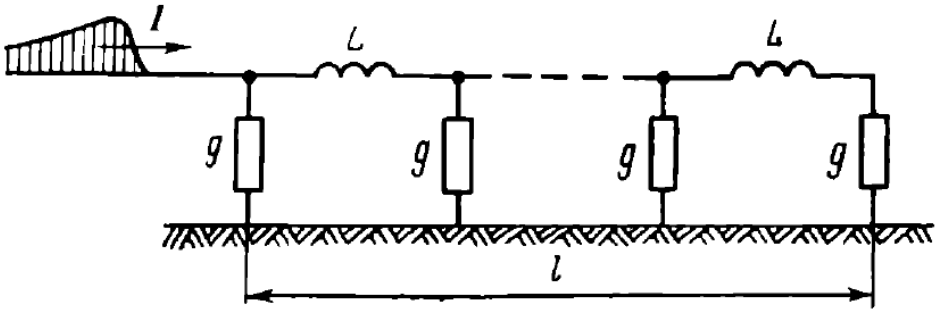


Рисунок 1.10 – Схема замещения заземлителя длиною l без учета его емкости при импульсном токе [33]

Для протяженных заземлителей автор рассматривала косоугольный импульс тока $i(0,t) = at$. Решая дифференциальные уравнения 1.10 – 1.11 можно получить выражения для напряжения на входе заземлителя (формула 1.12) и импульсного сопротивления (1.13).

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = L\frac{\partial i}{\partial t} \tag{1.10}$$

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = ug \tag{1.11}$$

где u – напряжение на электроде, В;

i – ток, протекающий в электроде, А;

t – время, мкс.

$$u(x,t) = \frac{a}{g}\left[t + 2T_1 \sum_{k=1}^{k=\infty} \frac{1}{k^2}\left(1 - e^{-\frac{t}{T_k}}\right)\cos\frac{k\pi x}{l}\right] \tag{1.12}$$

где u – напряжение на электроде, В;

t – время, мкс;

а – крутизна фронта импульса тока, А/мкс;

g – погонная проводимость, 1/Ом·м;

T_1 – постоянная времени, мкс;

T_k – постоянная времени k-ой гармоники, мкс;

l – длина электрода, м.

$$z\left(0,\tau_{\text{ф}}\right) = \frac{1}{gl}\left[1 + \frac{2T_1}{\tau_{\text{ф}}}\sum_{k=1}^{k=\infty}\frac{1}{k^2}\right] = R\left[1 + \frac{T_1\pi^2}{3\tau_{\text{ф}}}\right] = R + \frac{Ll}{3\tau_{\text{ф}}} \tag{1.13}$$

где $\tau_{\text{ф}}$ – длительность фронта импульса, мкс;

g – погонная проводимость, 1/Ом·м;

l – длина электрода, м;

T_1 – постоянная времени, мкс;

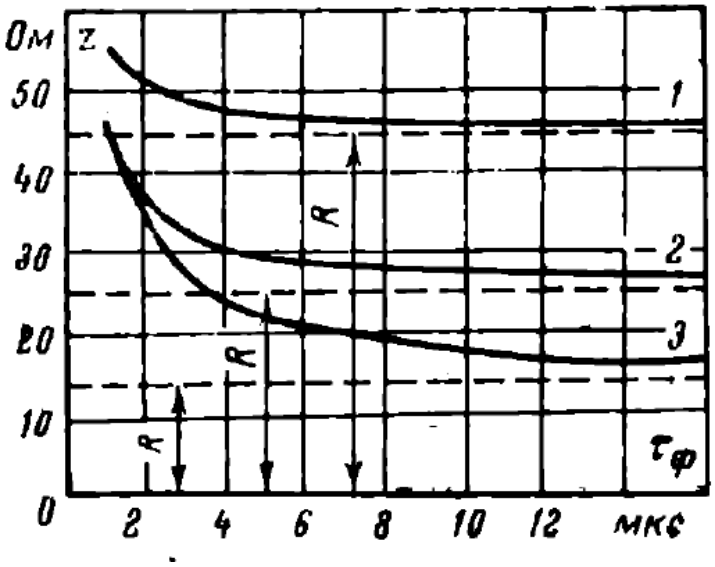
R – стационарное сопротивление электрода, Ом;

L – погонная индуктивность электрода, Гн/м.

Как видно из формулы 1.12 сопротивление протяженного заземлителя равно сумме стационарного сопротивления R и индуктивного сопротивления, зависящего от времени. В работе автор отмечает, что влияние индуктивности уменьшается с ростом длительности фронта импульса и увеличением удельного сопротивления грунта [33]. Также увеличение длины заземлителя приводит к увеличению индуктивной составляющей, что вполне закономерно.

На рисунке 1.11 приведены зависимости импульсного сопротивления от длительности фронта импульса для заземлителей длиной 20, 40 и 80 м. Из графиков видно, что при длительности фронта импульса более 6-8 мкс заземлитель длиной 20 м

практически перестает быть протяженным, его импульсный коэффициент стремится к единице [33].



1 – l = 20 м; 2 – l = 40 м; 3 – l = 80 м

Рисунок 1.11 – Импульсное сопротивление протяженных заземлителей в зависимости от длительности фронта импульса тока при ρ = 500 Ом·м [33]

В главе 8 монографии [33] рассматривается общий случай, когда необходимо учитывать как емкость заземлителя (для грунтов с $\rho > 2500$ Ом·м), так и искровые процессы. Схема замещения представляется длинной линией с нелинейными параметрами $g(u)$ и $C(u)$ (рисунок 1.12).

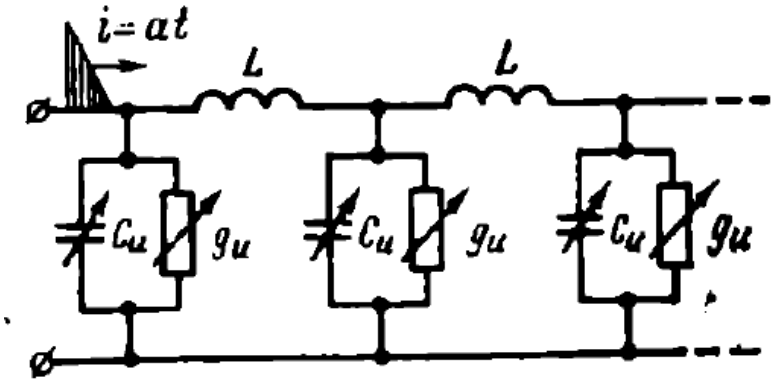


Рисунок 1.12 – Схема замещения для расчета протяженного заземлителя с учетом его емкости и искровых процессов в земле [33]

Автор отмечает, что в общем виде система нелинейных дифференциальных уравнений не имеет решения, и для практических расчетов предлагает использовать метод наложения потенциалов, развитый на основе подхода Sunde E.D. [94]. Суть метода заключается в том, что ток, стекающий с заземлителя, представляется в виде

суммы токов точечных источников, распределенных вдоль электрода. При этом учитывается, что из-за индуктивности ток распределяется неравномерно, и эффективная длина заземлителя, участвующая в отводе тока к данному моменту времени, меньше геометрической. На основе этого метода получены аналитические выражения для импульсного сопротивления протяженного заземлителя в первом приближении (без учета искрообразования) и во втором приближении.

Достоверность предложенных аналитических методов подтверждена сопоставлением с результатами полевых испытаний на действующей линии электропередачи 110 кВ в грунтах с высоким удельным сопротивлением (7000-12500 Ом·м). Эксперименты проводились на противовесах длиной 270 м на участках линии без молниеотвода. Работы проводились на небольших амплитудах тока, чтобы исключить искрообразования в грунтах. На рисунке 1.13 приведены характерные осциллограммы тока, напряжения и кривая импульсного сопротивления.

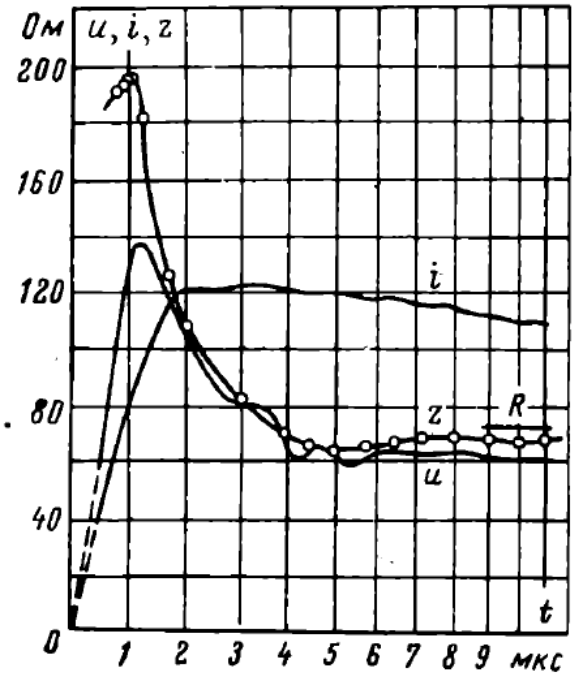
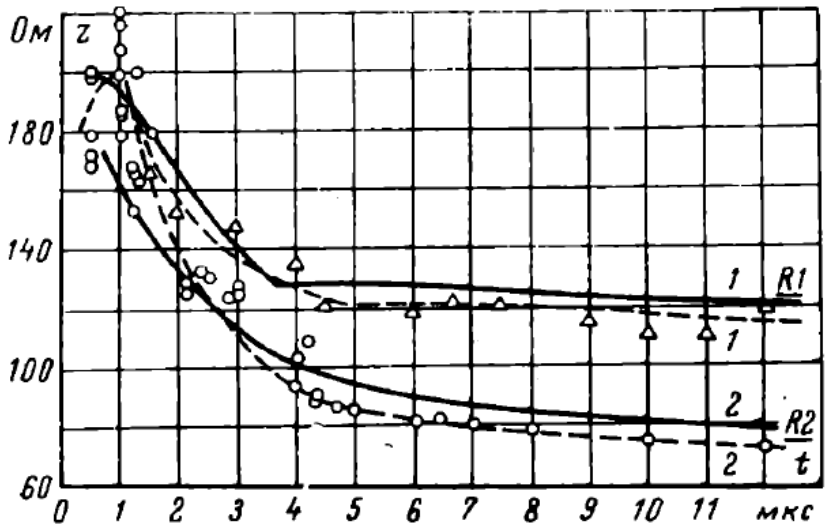


Рисунок 1.13 – Осциллограммы тока и напряжения и импульсное сопротивление заземлителя длиной 270 м при малом импульсном токе и $\rho \approx 8000$ Ом·м [33]

На рисунке 1.14 сравниваются расчетные значения импульсного сопротивления с результатами, полученными в ходе экспериментов.



—— – расчет; ----- – опытные кривые

1 – ρ = 12,5·10^3 Ом·м; 2 – ρ = 8·10^3 Ом·м

Рисунок 1.14 – Сравнение расчетных зависимостей импульсного сопротивления от времени с данных полевых испытаний при малых импульсных токах для заземлителя длиной 270 м [33]

Для двух значений удельного сопротивления грунта 12500 и 8000 Ом·м расхождение между расчетом и экспериментом не более 5-10%. На кривых виден излом в момент времени $t \approx 4$ мкс, связанный, по мнению автора, с приходом отраженной от конца противовеса волны. Как видно из рисунка при временах $t > 3$ мкс расчетные значения всегда превышают экспериментальные.

На рисунке 1.15 представлены полученные результаты для двух параллельных противовесов длиной по 270 м [33].

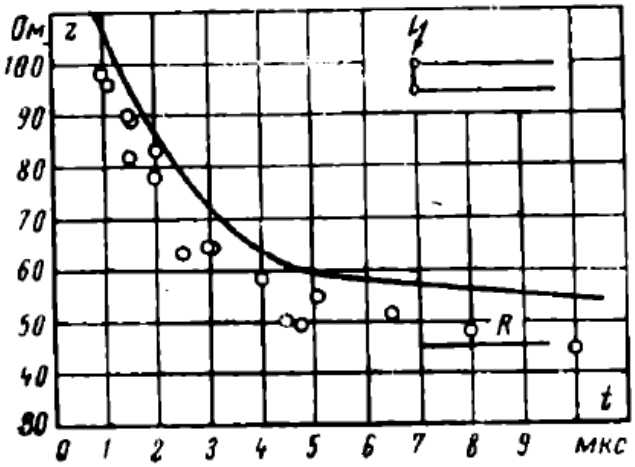


Рисунок 1.15 – Расчетная кривая и опытные точки импульсного сопротивления при малых импульсных токах для двух выделенных параллельных противовесов длиной 270 м при ρ = 6,7·10^3 Ом·м [33]

Эквивалентные удельные сопротивления, определённые по стационарному сопротивлению одного и двух противовесов, различаются – 8000 и 6700 Ом·м. Это связано с тем, что при увеличении размеров заземлителя электрическое поле проникает в более проводящий нижний слой грунта. Но несмотря на это, расчётные кривые $z(t)$ хорошо согласуются с экспериментальными данными. Расхождение не превышает 20 % [25]. Таким образом, описанные в монографии выражения дают приемлемую для практики точность расчета импульсного сопротивления, в том числе и для высокоомных грунтов.

В работе [86] Oettle E.E. выполнил литературный обзор значений критической напряженности электрического поля E_0. Автор отмечает, что эти значения находятся в широком диапазоне от 0,03 до 1,3 МВ/м и в основном подбираются для наилучшего согласования с экспериментом. На основе работ Корсунцева и собственных экспериментальных данных Oettle E.E. предложил обобщенную кривую для оценки импульсного сопротивления.

В более поздних работах авторы переходят от математического описания нелинейных процессов в грунтах к более физическому. В работе [93] Sekioka S. проводит аналогию между ионизацией грунта и процессами в электрической дуге и использует энергетический баланс в зоне ионизации, описываемый уравнениями Mayr [80]. В предложенной модели удельное сопротивление ионизированной зоны зависит от накопленной в ней энергии. Таким образом авторы описывают гистерезисные явления, наблюдаемые экспериментально. Модель учитывает четыре ключевых эффекта: зависимость от тока (зона ионизации растёт), зависимость от энергии (удельное сопротивление снижается с ростом энергии), процесс деионизации (сопротивление восстанавливается при снижении энергии) и гистерезис (кривые при нарастании и спаде тока различаются). Полученные с помощью модели расчетные данные импульсного сопротивления сравнивались с экспериментальными данными для стержневых заземлителей при токах до 30 кА. Данная модель наверно первая попытка создания физически-обоснованной модели ионизации грунта.

В книге «Lightning Protection» под редакцией Cooray V. [50] обобщены результаты многолетних исследований в области физики молнии и молниезащиты. Книга подготовлена ведущими специалистами и содержит информацию о физических

механизмах, методах экспериментальных исследований и инженерных подходах к проектированию систем грозозащиты.

Глава 12 "Soil Ionization" книги [50] представляет собой обзор физики ионизации грунта при протекании больших импульсных токов. Cooray детально анализирует структуру грунта как гетерогенной среды, состоящей из твердых частиц, воды и воздуха. По его мнению именно наличие воздушных включений является причиной пробоя при относительно невысоких напряженностях поля. Т.к. диэлектрическая проницаемость воды (около 80) во много раз превышает проницаемость воздуха – это приводит к локальному усилению поля в воздушных порах. Автор описывает два механизма пробоя – электрический (ионизация воздуха в порах) и тепловой (испарение влаги). На основе анализа экспериментальных данных Cooray приходит к выводу, что для грозовых импульсов с фронтом в несколько микросекунд основным является электрический механизм.

Глава 13 "Modelling of Grounding Electrodes under Lightning Currents" книги [50] посвящена математическому моделированию заземлителей при импульсных воздействиях. В работе описаны все существующие на тот момент модели импульсного сопротивления электродов с учетом процессов ионизации. Все их можно разделить на два типа. Первые основаны на изменении геометрии, когда ионизация грунта приводит как бы к увеличению радиуса или длины электрода. В моделях второго типа авторы работают не с изменением размеров, а с изменением удельного сопротивления грунта в зоне ионизации. Отдельно в главе рассматривают энергетические модели. Также Cooray проводит сравнение результатов применения всех моделей с экпсериментальными данными.

Авторы книги выделяют несколько ключевых нерешённые проблем. Они отмечают недостаток экспериментальных данных о динамике развития искровых каналов в реальных неоднородных грунтах. Как и многие другие авторы отмечают отсутствие общепринятых значений критической напряжённости электрического поля ионизации E_c. Также Cooray с коллегами говорит о сложности учёта дискретного (канального) характера разряда в инженерных моделях.

Помимо развития физических моделей совершенствовались и численные методы расчета. Они позволяли ученым отказаться от допущений о геометрии искровой зоны. В работе Lorentzou M.I. с соавторами [78] представлены две численные модели ионизации

грунта при импульсных воздействиях. Первая – модель с сосредоточенными параметрами, реализованная в программе EMTP. Вторая модель с распределёнными параметрами и с помощью нее авторы получили аналитические выражения для импульсного сопротивления. Lorentzou M.I. с коллегами разделяют их на модели с изменяемой геометрией электрода и модели с изменяемой проводимостью грунта. Для определения критической напряжённости поля авторы используют формулу Oettle [86] $E_c = 241 \cdot \sigma^{-0.215}$. Результаты моделирования сравнивали с экспериментальными данными для вертикальных стержней [72] и горизонтальных заземлителей длиной 8,1, 17 и 34 м [92].

В работе [40] Ala G. использует уже современный метод конечных разностей во временной области (FDTD) в сочетании с пространственно-временной функцией удельного сопротивления грунта. Свой метод он основывает на классической модели Liew–Darveniza [72]. Важной особенностью подхода является отсутствие необходимости в априорных допущениях о форме и размерах ионизированной зоны – она формируется автоматически в процессе расчета в зависимости от локальной напряженности электрического поля. Верификация модели выполнена путем сопоставления с аналитическим решением для полусферического электрода, а также с экспериментальными данными для одиночного стержня [72]. В качестве примеров применения представлены результаты моделирования для горизонтального и Т-образного электродов, демонстрирующие существенное снижение импульсного сопротивления при учете ионизации. Работа показывает, что современные численные методы позволяют отказаться от упрощенных геометрических моделей и более адекватно описывать сложные процессы в грунте.

Развитие численных методов моделирования ионизационных процессов в грунтах представлено в работе Г. Ала с соавторами [39]. Авторы предлагают классификацию существующих подходов, разделяя их на модели с изменяемой геометрией электрода и модели с изменяемой проводимостью грунта. В основу разработанной модели положен физический механизм пробоя воздуха в порах грунта, сопровождающийся локальным нагревом и образованием плазменных каналов. Модель реализована методом конечных разностей во временной области (FDTD) и не требует априорных допущений о форме ионизированной зоны. Верификация модели выполнена путем сопоставления с экспериментальными данными Liew A.C. [72] для одиночного стержневого заземлителя,

а также с результатами модели Cooray V. [51]. Параметрический анализ показал, что степень снижения импульсного сопротивления возрастает с увеличением удельного сопротивления грунта и уменьшением длины электрода, а также зависит от значения критической напряженности. Предложенная модель позволяет проводить расчеты для многослойных грунтов и сложных конфигураций заземлителей.

В работе [71] предложена численная модель импульсных процессов в заземлителях, сочетающая метод конечных элементов в пространственной области и метод конечных разностей во временной области (FEM-FDTD). Модель использует пространственно-временное изменение удельного сопротивления грунта в зависимости от локальной напряженности электрического поля. Выделены три зоны: нелинейной проводимости (с зависимостью $\rho = \rho_0 f(E)$), ионизации (с остаточным сопротивлением 7% от исходного) и искровая (с сопротивлением, равным сопротивлению проводника). Основная особенность модели заключается в том, что форма зоны ионизации определяется не заранее, как в других моделях, а формируется по результатам расчета электрического поля. Результаты моделирования автор сравнивает с полученными данными экспериментов для сети типов электродов и с данными других авторов [59]. В статье авторы показывают, что учет ионизации снижает расчетный потенциал заземлителя на 12-41 %, но может приводить к увеличению шагового напряжения.

Gazzana D.S. с соавторами в своей работе [57] использовали метод Transmission Line Modeling (TLM) для моделирования ионизации грунта. В своей работе авторы работе не с изменением геометрии электрода, а меняли только поперечную проводимость $G(t)$ в схеме замещения заземлителя. Индуктивность L и ёмкость C оставались неизменными. Авторы обосновывают это тем, что магнитная проницаемость не меняется, а диэлектрическая проницаемость грунта меняется незначительно. Значение проводимости в каждый момент времени рассчитывалось из условия превышения напряжённостью электрического поля критического значения E_{cr}. Для тока ионизации авторы использовали формулу CIGRE. Результаты моделирования сравнивались с экспериментальными данными Geri [58] для горизонтального электрода длиной 5 м. Изменение удельного сопротивления грунта от 270 до 1000 Ом·м показало, что влияние ионизации возрастает с увеличением сопротивления. Снижение максимального напряжения на электроде составило от 7,9 % для ρ = 270 Ом·м до 17,5 % для ρ = 1000 Ом·м.

В работе [88] Otani K. с соавторами провел сравнение результатов расчета с использованием FDTD-модели ионизации грунта, предложенной Ala с соавторами [39] с экспериментальными данными. Авторы рассматривали горизонтальные электроды длиной 8.1 и 34 м [91], вертикальные стержни длиной 1.5 м в грунтах с удельным сопротивлением от 228 до 2056 Ом·м [43], одиночный стержень длиной 1 м при биполярном импульсе [58] и группу из четырех параллельных стержней длиной 3.05 м [48]. Во всех случаях получено хорошее согласие расчетных и экспериментальных осциллограмм напряжения. Авторы обобщают диапазоны параметров модели: критическая напряженность E_c = 50-200 кВ/м, постоянная времени ионизации τ_1 = 0.5-2 мкс, постоянная времени деионизации τ_2 = 0.5-10 мкс, причем для быстро нарастающих токов требуется меньшее τ_1, а для медленно спадающих – большее τ_2. Показано, что степень снижения напряжения за счет ионизации возрастает с увеличением удельного сопротивления грунта (от 11-18% при ρ = 228 Ом·м до 52-57% при ρ = 2056 Ом·м) и уменьшается с ростом длины электрода (31% для 8.1 м против 8% для 34 м). Работа подтверждает, что модель Ala et al. [40] адекватно описывает ионизационные процессы в широком диапазоне условий.

Для численного моделирования импульсных процессов в заземлителях с учетом ионизации грунта предложен ряд эквивалентных схем. В работе Nicolopoulou E.P с соавторами [83] выполнен сравнительный анализ двух таких моделей на основе экспериментальных осциллограмм, полученных при воздействии импульсов 1.2/50 мкс на образцы грунта с различной влажностью.

Первая модель предложена Nor N.M. с соавторами [85]. Это двухпараметрическая схема с переключением. В ней сопротивление грунта в начальной стадии (до ионизации) определяется резистором R_1. После развития ионизации параллельно подключается ветвь с резистором R_2 и индуктивностью L. Она моделирует задержку развития ионизации. Параметры R_1 и R_2 определяются по осциллограммам напряжения и тока в моменты первого и второго пиков тока.

Вторая модель разработана Kalat W. с соавторами [68] и основана на нелинейной проводимости. Она описывается уравнением $i_{No} = Au^a$ и дифференциальным уравнением первого порядка. Это уравнение моделирует инерционность ионизационных процессов. Модель также включает линейные проводимости g_{LDC} и g_{LAC}, соответствующие

проводимости грунта при малых токах. Диэлектрические свойства грунта учитываются через ёмкость *C*.

Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными [83] показало следующее. Для грунтов, где наблюдается два пика тока модель Nor показала себя лучше. В то время, как модель Kalat-Loboda точнее описывает грунты с петлеобразной вольт-амперной характеристикой. Авторы отмечают, что обе модели требуют подбора параметров и не учитывают стадию деионизации.

В работе [2] Анненков В.З. предложил методику расчета импульсного сопротивления стержневого заземлителя, которая учитывает два последовательных этапа развития нелинейных процессов. Автор определяет три значения тока: ток начала нелинейности $I_н$, соответствующий отклонению вольт-амперной характеристики от линейного значения; ток начала искрообразования $I_а$, при котором нелинейность достигает значения, соответствующего пробивной напряженности грунта; и ток пробоя зоны искрообразования $I_{пр}$. Показано, что при $\beta < 1/2$ (где β – коэффициент нелинейности) расчет необходимо выполнять в два этапа: сначала только с учетом нелинейности, затем только с учетом искрообразования. Сопоставление результатов расчета с данными натурных испытаний [1] для различных типов грунтов показало хорошее согласование, что подтверждает адекватность предложенного подхода.

Для анализа грозозащиты воздушных линий электропередачи в расчетных схемах необходимо адекватное представление заземляющих устройств опор. В работе [83] Wu J. с коллегами представили три подхода к моделированию заземлителей:

1. Модель постоянного сопротивления (CR). В ней заземлитель представляется резистором, значение которого определяется как отношение пиковых значений напряжения и тока $R_{CR} = V_m / I_m$ или через импульсный коэффициент αR_0. Эта модель наиболее проста, но не учитывает динамику процессов.

2. Стандартная динамическая модель (SDR), рекомендованная CIGRE. В этой модели сопротивление изменяется во времени в зависимости от тока с учетом ионизации грунта: $R_{SDR}(t) = R_0/\sqrt{1 + I(t)/I_g}$, где I_g – ток ионизации, определяемый через критическую напряженность E_0 и удельное сопротивление грунта ρ.

3. Модель реального динамического сопротивления (RTDR), которая строится на основе экспериментальных осциллограмм как $R_{RTDR}(t) = U(t) / I(t)$. Эта модель наиболее точно отражает реальные процессы в заземлителе.

В статьей [97] Wu с коллегами сравнили результаты расчета грозозащиты для всех моделей. Модель CR занижала требуемый уровень тока на 20 % по сравнению с моделью RTDR. А модель SDR, в свою очередь, напротив, завышала значения на 10-20 %. Это связано с неучетом индуктивных эффектов на фронте импульса. Авторы приходят к выводу, что модель RTDR, соответствующая $R(t) = U(t) / I(t)$,, наиболее адекватна для описания переходных процессов.

Из работ, опубликованных в последние годы можно выделить статью Сергея Леонидовича Шишигина с коллегами [36], в которой помимо процессов ионизации учитываются ещё и частотные свойства грунта. Авторы предложили модифицированную формула СИГРЭ, в которой стационарное сопротивление R_0 заменили на сопротивление $r(t) = R_0 \ \ k(t)$. Оно учитывает изменение удельного сопротивления грунта во времени. Авторы вводят постоянные времени τ_1 и τ_2, описывающие процессы ионизации на фронте и деионизации на спаде импульса [35]. В данной модели ионизация моделируется через увеличение радиуса и длины электрода, а частотные свойства учитываются через дискретные переходные проводимости. Результаты моделирования Шишигин С.Л. сравнивает с данными Bellaschi [48], Geri [58], Sekioka [93], Liew [72], А.Н. Данилина [9, 12]. На основе моделирования авторы делают выводы, что при удельном сопротивлении грунта $\rho < 2000$ Ом·м основным фактором снижения перенапряжений является ионизация, а при $\rho > 2000$ Ом·м главную роль играют уже частотные свойства грунта.

1.5 Выводы по главе 1

1. Анализ современных требований к грозозащите электротехнических комплексов показывает, что заземляющие устройства играют важную роль в ограничении перенапряжений при ударах молнии. Данная проблема особо актуально в регионах с высоким удельным сопротивлением грунта, к которым относится Мурманская область и другие территории Арктической зоны РФ. В таких условиях стационарное сопротивление заземлителей может на порядок превышать нормативные значения.

2. При стекания с заземляющих устройств токов молний в окружающем грунте начинаются процессы ионизации и искрообразования. При превышении критической напряженности электрического поля в воздушных порах грунта развиваются частичные

разряды и формируются плазменные каналы. Интенсивность этих процессов определяется не только параметрами импульсного воздействия, но и характеристикой грунта, а также конфигурацией электродов.

3. Прямые оптические и рентгеновские наблюдения [99, 74] указывают на сложный, ветвящийся характер разрядов, но, к сожалению, эти работы не позволяют установить количественные закономерности. Особенно слабо процессы искрообразования изучены в высокоомных грунтах (ρ > 1000 Ом·м), где эффект снижения сопротивления за счет искрообразования может играть определяющую роль.

4. Проведенный анализ математических моделей импульсного сопротивления заземлителей показал, что их общим недостатком является допущение о сплошной симметричной зоны ионизации вокруг электрода. Это предположение не имеет прямого экспериментального подтверждения. Кроме того, все разработанные модели, апробированы на хорошо проводящих грунтах.

5. Необходимо разработать математическую модель импульсного сопротивления заземлителей, учитывающую искровые процессы в грунтах, для высокоомных грунтов, характерных для Арктической зоны РФ. Для это необходимо провести оптические и осциллографические исследования образования и развития искровых каналов в грунтах в лабораторных и полевых условиях.

ГЛАВА 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1 Лабораторный стенд для исследования искрообразования в грунтах

Для проведения экспериментальных исследований процессов искрообразования в грунтах при импульсных воздействиях был создан специальный лабораторный стенд [16], состоящий из металлического бака с песком, генератора импульсных напряжений (ГИН) и измерительного комплекса. Размеры бака: длина 700 мм, ширина 450 мм, глубина 400 мм [17] (рисунок 2.1). Внутренняя поверхность бака была покрыта медной фольгой и подключена к контуру заземления здания лаборатории. Это позволило создать эффект удаленный земли и исключить влияние внешних полей на распределение токов в грунте. Эксперименты проводились на импульсных напряжениях с амплитудой до 60 кВ, чтобы исключить пробой грунта на стенки бака.

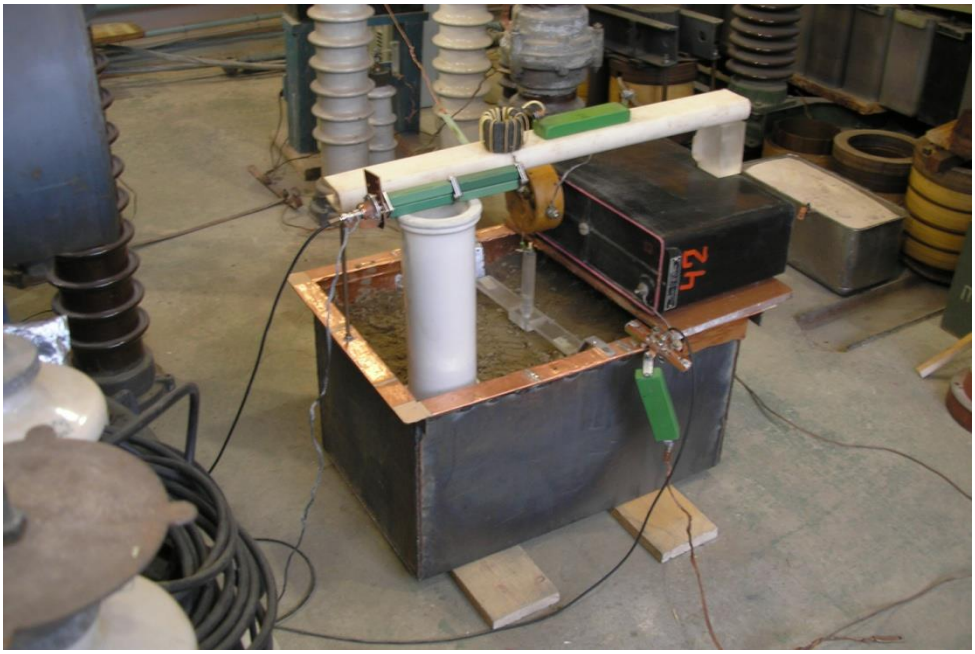


Рисунок 2.1 – Общий вид ванны с грунтом и импульсным генератором [17]

Бак заполнялся кварцевым песком фракцией 0-2 мм. Перед каждой серией опытов песок просушивался и заново увлажнялся до заданной влажности (5, 10, 20 %). Контроль влажности осуществлялся весовым методом.

Для определения удельного сопротивления грунта использовался коаксиальный пробник (рисунок 2.2), состоящий из двух металлических цилиндров длиной L и радиусами d и D ($d < D$). При подаче напряжения ток растекался от внутреннего цилиндра к внешнему через исследуемый грунт.

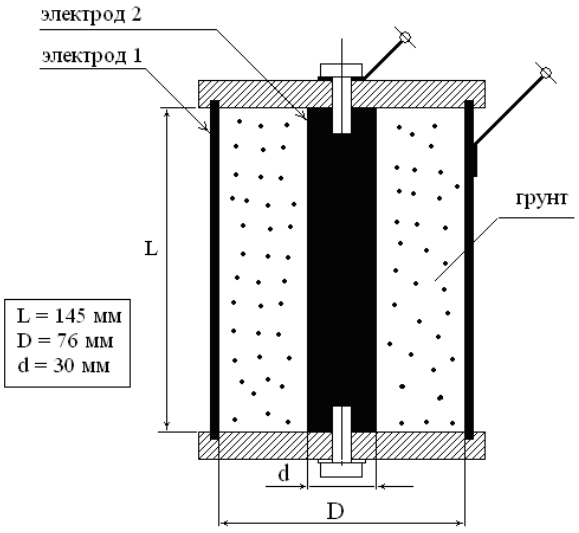


Рисунок 2.2 – Коаксиальный пробник для определения удельного сопротивления влажного грунта [17]

Выделим на расстоянии r от оси пробника ($d < r < D$) цилиндрический слой грунта толщиной dr и длиной L. Площадь боковой поверхности этого слоя равна $S(r) = 2\pi rL$. Плотность тока на данном радиусе составляет $J(r) = I / S(r)$, где I – полный ток, протекающий через пробник. Падение напряжения на элементарном слое по закону Ома в дифференциальной форме (формула 2.1):

$$dU = J(r) \cdot \rho \cdot dr = \frac{I\rho}{2\pi rL} dr \tag{2.1}$$

где $J(r)$ – плотность тока, А/м^2;

ρ – удельное сопротивление грунта, Ом·м;

I – полный ток, А;

r – расстояние от оси пробника, м;

L – длина пробника, м.

Интегрируя это выражение по радиусу от d до D, получаем полное напряжение между электродами (формула 2.2):

$$U = \int_d^D \frac{I\rho}{2\pi rL} dr = \frac{I\rho}{2\pi L} \ln \frac{D}{d} \tag{2.2}$$

где D – внешний радиус пробника, м;

d – внутренний радиус пробника, м;

I – полный ток, А;

ρ – удельное сопротивление грунта, Ом·м;

r – расстояние от оси пробника, м;

L – длина пробника, м.

Тогда сопротивление пробника (формула 2.3):

$$R = \frac{U}{I} = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{D}{d} \tag{2.3}$$

где U – напряжение на пробнике, В;

I – полный ток, А;

ρ – удельное сопротивление грунта, Ом·м;

L – длина пробника, м;

D – внешний радиус пробника, м;

d – внутренний радиус пробника, м.

Отсюда удельное сопротивление грунта (формула 2.4):

$$\rho = \frac{2\pi L R}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)} Ом \cdot м \tag{2.4}$$

где L – длина пробника, м;

R – сопротивление пробника, Ом;

D – внешний радиус пробника, м;

d – внутренний радиус пробника, м.

Таким образом, по измеренному электрическому сопротивлению R и размерам пробника (L, d, D) можно рассчитать удельное сопротивление грунта.

В качестве источника импульсного напряжения в экспериментах использовался генератор, собранный по схеме Аркадьева-Маркса. Принципиальная схема ГИН приведена на рисунке 2.3 [12]. Параметры генератора: зарядное напряжение $U_з$ – от 0 до 60 кВ; емкость ГИН в ударе $C_{гин}$ = 0,1-0,4 мкФ; гасящее сопротивление $R_г$ = 10-50 Ом; индуктивность $L_г$ = 2-20 мкГ. Для регулирования длительности импульса напряжения использовался дополнительный резистор $R_{доп}$, подключаемый параллельно выходу ГИН. Это позволяло изменять постоянную времени разряда $\tau = R_{доп} \cdot C_{гин}$ в диапазоне от 2,5 мкс до 1000 мкс за счет использования резисторов с сопротивлением от 50 Ом до 20 кОм. Длительность фронта импульса при этом не превышала 0,1 мкс.

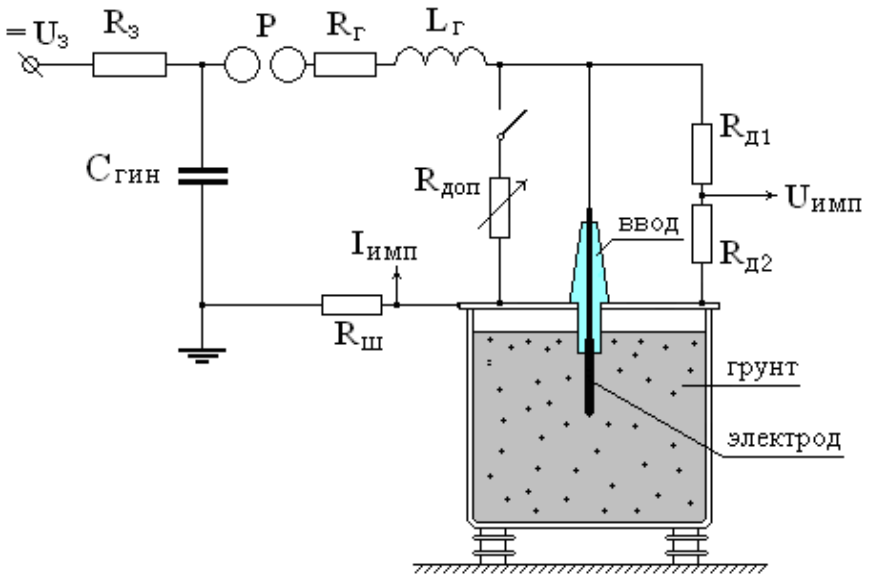


Рисунок 2.3 – Схема импульсного генератора, подключенного к нагрузке, где: Rз – зарядное сопротивление; Сгин – емкость ГИН; Р – разрядник; Rг, Lг – гасящие сопротивление и индуктивность; Rд1, Rд2 –делитель напряжения; Rш –токовый шунт; Rдоп - резистор для регулирования длительности импульса на нагрузке [12]

Ток, протекающий в электроде, и напряжение на нем измерялись с помощью цифрового осциллографа АКИП-4113/2 с полосой пропускания 100 МГц и частотой дискретизации 1 ГВыб/с. Для измерения напряжения на электроде использовался омический делитель, высоковольтное плечо которого было выполнено на основе последовательно соединенных резисторов общим сопротивлением 20 кОм [10]. Низковольтное плечо делителя имело сопротивление 50 Ом, что соответствовало волновому сопротивлению коаксиального кабеля, соединяющего делитель с осциллографом. Измерение тока, протекающего через электрод, выполнялось с помощью токового шунта сопротивлением 0,39 Ом. Сигналы с делителя напряжения и токового шунта подавались на осциллограф через согласующие элементы. Вся измерительная система вместе с кабелем РК-50 и согласующим сопротивлением на конце кабеля градуировалась для получения коэффициентов деления [17]. Схема измерительной системы приведена на рисунке 2.4.

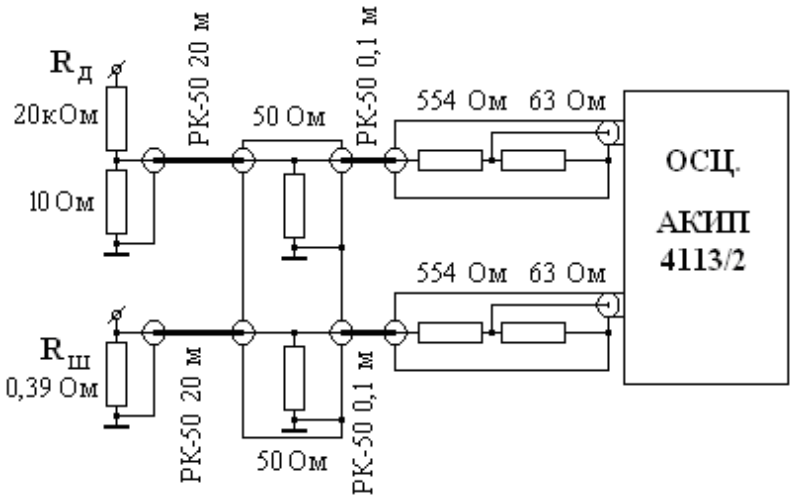


Рисунок 2.4 – Схема измерительной системы [17]

Опыты проводились на моделях заземлителей нескольких конструкций: дисковые электроды диаметром 21,5 мм и толщиной 1 и 3 мм; уголковые электроды 35×50 мм (имитация сечения прокатной стали); сферические электроды диаметром 30 мм и 50 мм [65]. Электроды закапывались в грунт на глубину 5 см (верхний край проводника от поверхности грунта), сферические электроды закапывались в грунт на половину диаметра.

2.2 Методики электрических измерений

В работе использовались две методики оптических исследований процессов искрообразований в толще грунта: съемка через прозрачную стенку и фотофиксация искровых каналов с помощью фотобумаги.

В первом случае использовался цилиндрический резервуар из стекла диаметром 300 мм и высотой 450 мм, заполненного кварцевым песком (рисунок 2.5). Электрод устанавливался таким образом, чтобы его край касался внутренней стенки резервуара, что позволяло наблюдать и фотографировать искровые каналы, развивающиеся в прилегающем к стенке слое грунта.

Схема генераторной установки, сопряженной со стеклянным резервуаром, приведена на рисунке 2.6 [12]. Съемка выполнялась с помощью цифрового фотоаппарата с открытым затвором, что обеспечивало регистрацию свечения искровых каналов в момент разряда.

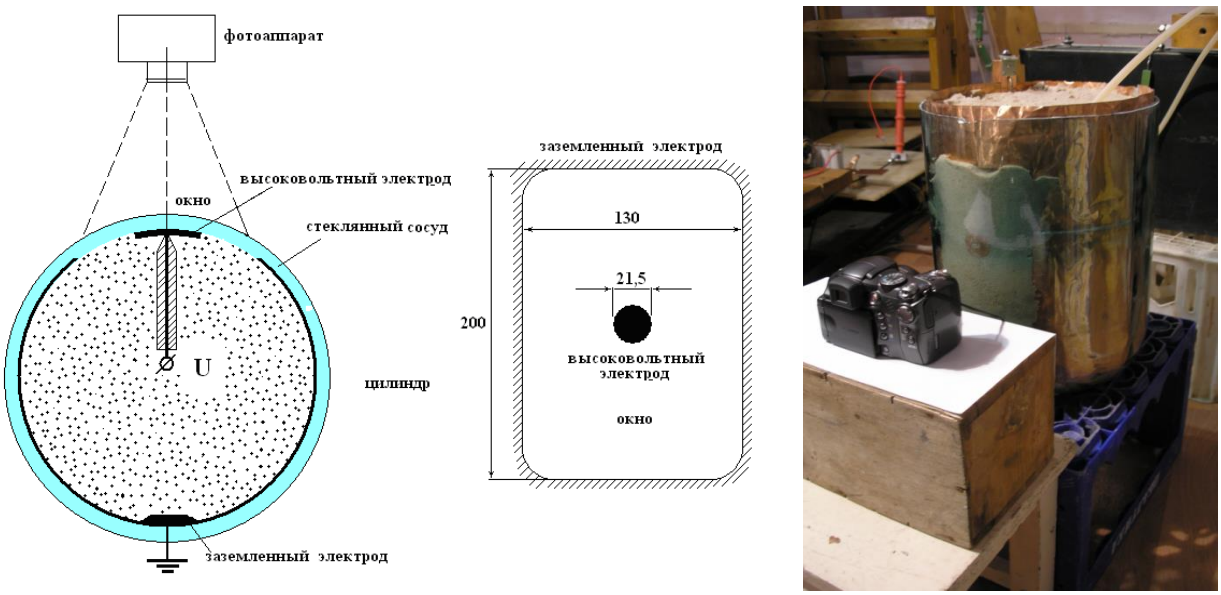


Рисунок 2.5 – Конструкция и фото устройства для оптических исследований искрообразования в грунте [12]

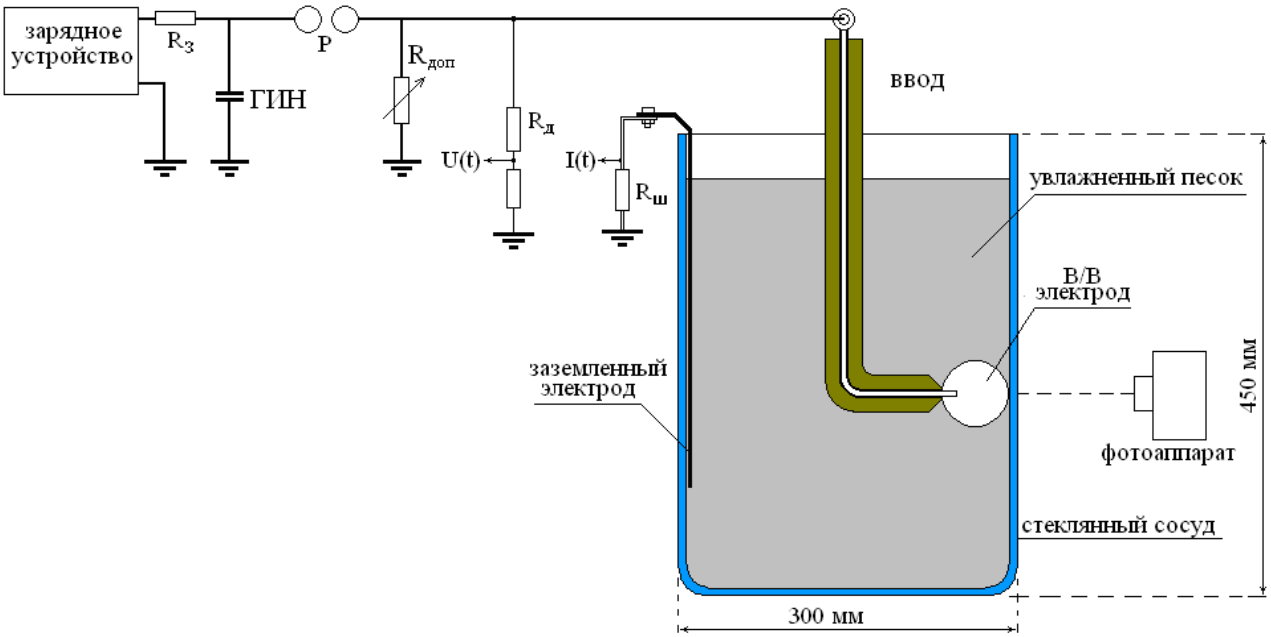


Рисунок 2.6 – Схема генераторной установки, сопряженной со стеклянным резервуаром с увлажненным кварцевым песком, в котором размещен электрод [12]

Метод с использованием фотобумаги заключался в следующем. В увлажненном грунте горизонтально размещался лист фотобумаги, на который устанавливался электрод (рисунок 2.7) [13]. При подаче импульсного напряжения искровые каналы, развивающиеся в грунте, оставляли на фотобумаге изображения. После извлечения из грунта лист проявлялся, в результате чего на бумаге становились видны потемневшие области, соответствующие траекториям искровых каналов. Полученные фотографии

сканировались для последующей компьютерной обработки. Данный метод позволял получать двумерные следы искровых каналов в горизонтальной плоскости.

Для того, чтобы оценить влияние стеклянного резервуара на распределение электрических полей было проведено моделирование в программе FEMM, решающей задачи электростатики для плоскопараллельных и осесимметричных схем [14]. Задача была оценить плотности тока на границе электрода с грунтом в экспериментальной установке (т.е. с наличием стеклянной стенки) и в однородной среде. Для этого были созданы две геометрические модели (рисунок 2.8) [14]. Первая (модель А) имитировала экспериментальные условия: электрод у стенки стеклянного цилиндра, среда представлена тремя областями – песок (ε = 50, σ = 0,0005 См/м), стекло (ε = 12, σ = 0) и воздух (ε = 1, σ = 0). Вторая (модель Б) соответствовала случаю размещения электрода в однородном песке.

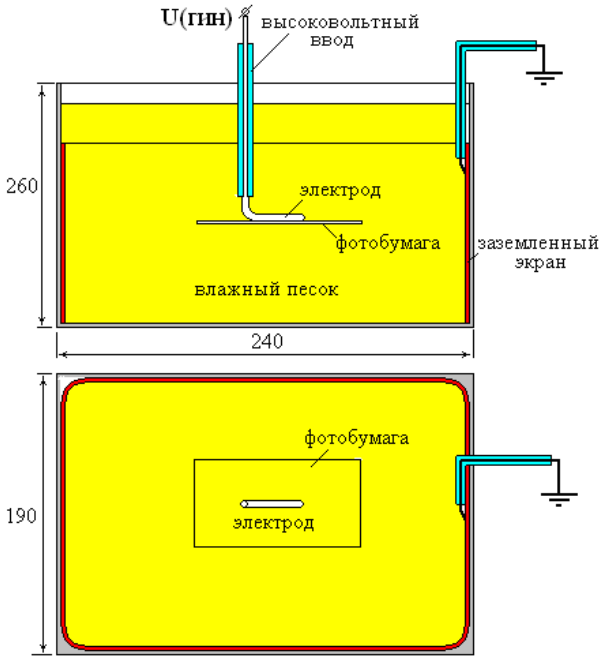


Рисунок 2.7 – Устройство для фиксации искровых каналов в грунте на фотобумаге [13]

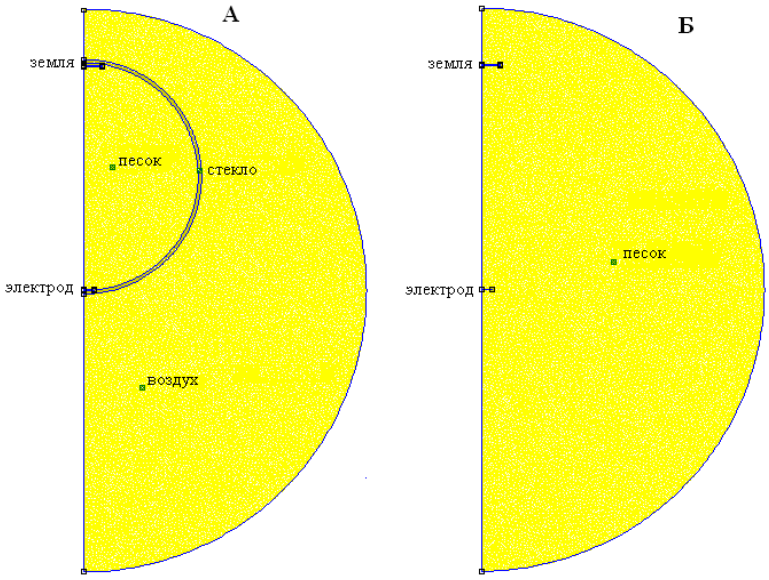


Рисунок 2.8 – Геометрические конфигурации для численного моделирования [14]: А – с учетом стеклянной стенки; Б – в однородной среде.

В качестве электрода использовался тонкий медный лист толщиной 0,3 мм и диаметром 20 мм, имитирующий сечение круглого проката. Распределение плотности тока для обеих моделей показано на рисунках 2.9 и 2.10.

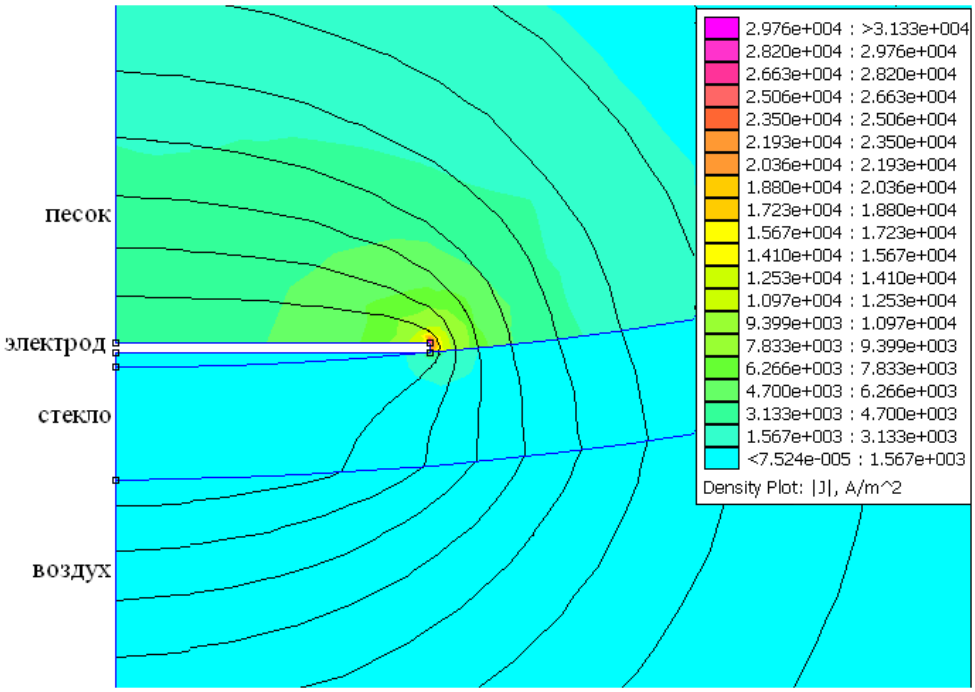


Рисунок 2.9 – Картина распределения плотности тока для модели со стеклянной стенкой [14]

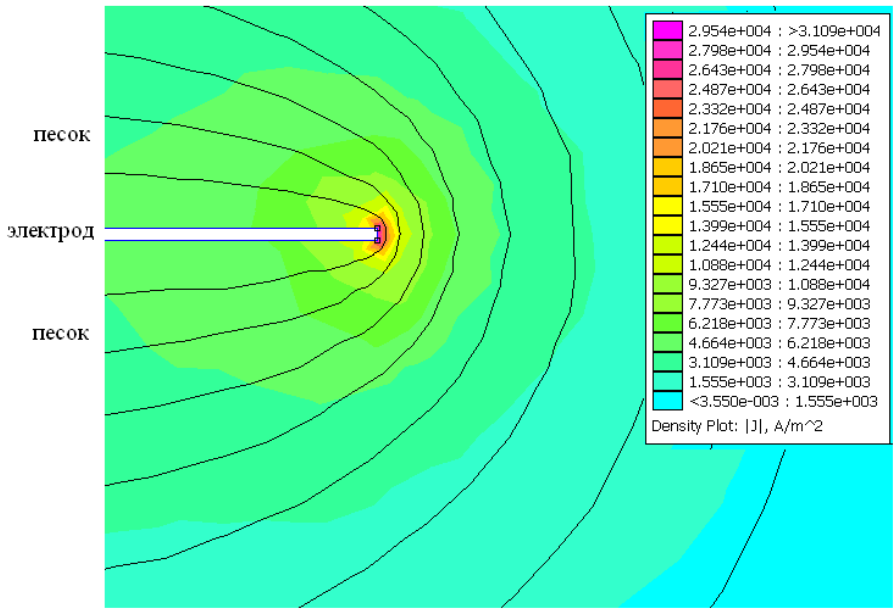


Рисунок 2.10 – Распределение плотности тока для модели электрода в однородном грунте [14]

Для сравнения была выбрана точка на краю электрода: в модели со стеклом плотность тока составила 22247 А/м², в однородной среде – 28303 А/м². Таким образом погрешность составила около 21 % [14].

На рисунке 2.11 приведены кривые распределения плотности тока вдоль электрода [14]. В обоих случаях наблюдается рост плотности тока к краю, однако в случае стеклянного резервуара плотность тока практически равна нулю на большей части поверхности и резкому увеличению лишь у кромки, что обусловлено нулевой проводимостью стекла [14].

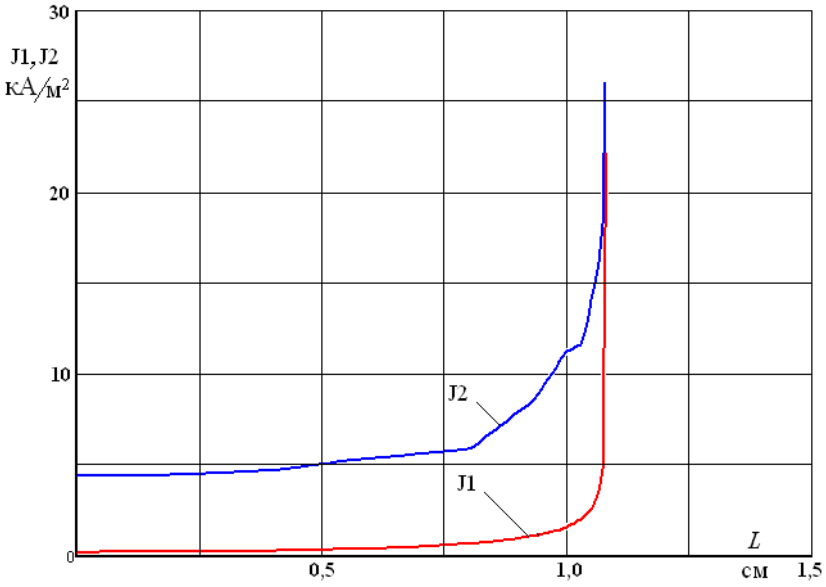


Рисунок 2.11 – Распределение плотности тока вдоль поверхности электрода [14]: J1 – со стеклянной стенкой; J2 – в однородном грунт.

2.3 Высоковольтный полигон

Для проведения экспериментов на электродах, соизмеримых по размерам с заземлителями реальных объектов электроэнергетики, был создан высоковольтный полигон на месте бывшего песчаного карьера вблизи г. Апатиты (Кольский полуостров) [18, 27]. Грунт на полигоне двухслойный: верхний слой глубиной до 0,5 м в основном состоял из морены (смесь песка с галькой), нижний – дроблеными скальными породами. Общее удельное сопротивление грунта составило 1100 Ом·м, что характерно для высокоомных грунтов Арктической зоны [10]. Схема проведения эксперимента приведена на рисунке 2.12 [10].

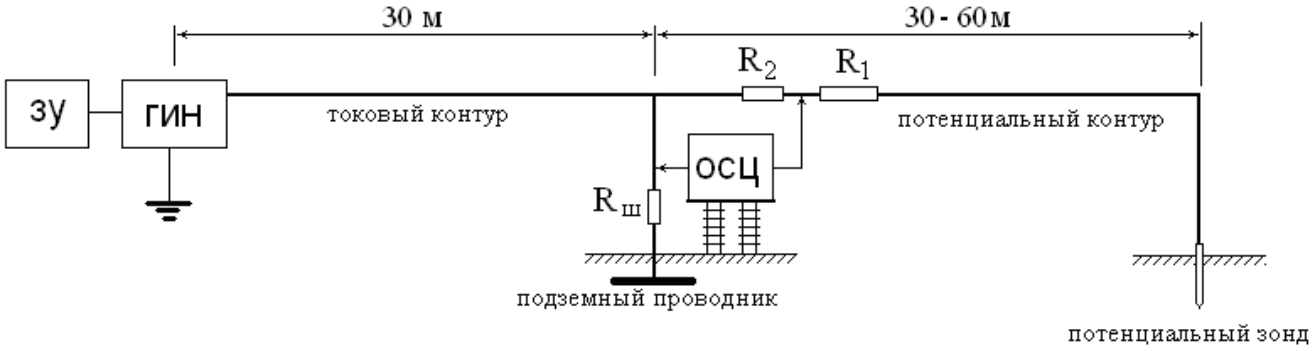


Рисунок 2.12 – Схема проведения эксперимента [10]

В качестве источника импульсных напряжений использовался генератор, выполненный по схеме Аркадьева–Маркса (рисунок 2.13). Генератор запитывался от выпрямительного устройства АИД-70, подключенного к бензогенератору [20].

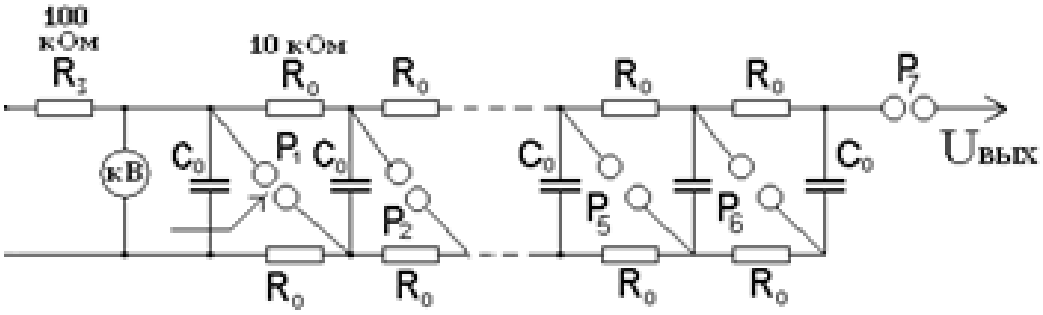


Рисунок 2.13 – Принципиальная схема генератора [20]

Генератор выполнен на основе импульсных конденсаторов ИК-100/0,4 и состоит из 6 ступеней, что позволяет получать на выходе импульсное напряжение до 360 кВ с регулировкой от 150 кВ (рисунок 2.14) [10]. Для получения меньших напряжений (10-150 кВ) уменьшалось число задействованных ступеней. Коммутация генератора принудительная: после заряда конденсаторов производилась механическая коммутация

первого разрядника. Контроль величины заряда конденсаторов осуществлялся по киловольтметру.



Рисунок 2.14 – Фото генератора импульсных напряжений [10]

Заземляющее устройство генератора состояло из двух соединенных между собой контуров: внешнего квадрата со стороной 6 м и внутреннего со стороной 2,5 м (рисунок 2.15) [10]. В качестве элементов заземления использовались стальные полосы шириной 50 мм и толщиной 4 мм. По углам внутреннего контура были вбиты вертикальные электроды диаметром 20 мм и длиной 1 м. Сопротивление контура заземления составило 66 Ом.

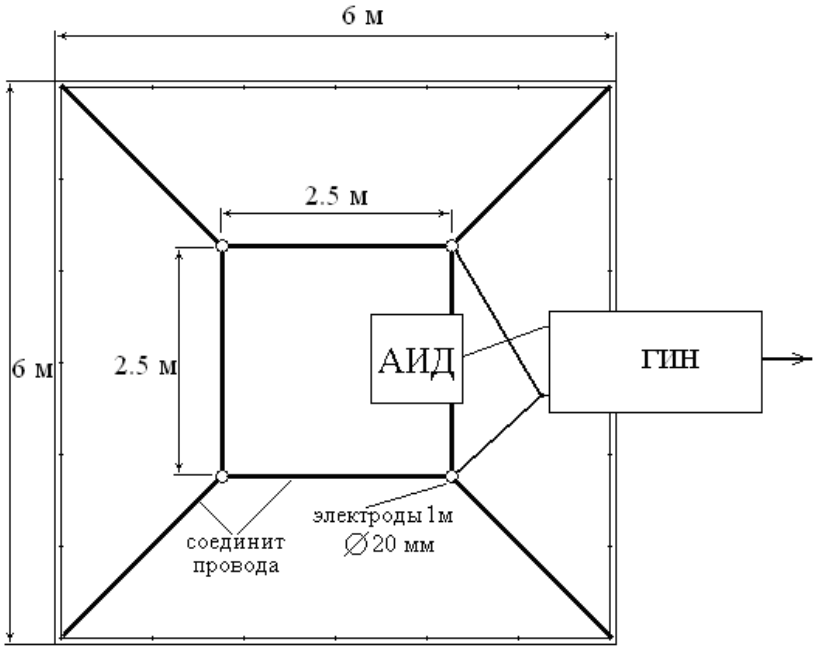


Рисунок 2.15 – Контур заземления генератора импульсных напряжений [10]

Для измерения импульсных напряжений на выходе генератора и на нагрузках использовался омический делитель напряжения. Высоковольтное плечо делителя было выполнено на основе семи последовательно соединенных резисторов по 30 кОм, общее активное сопротивление составило 221,5 кОм [10]. Для компенсации искажений импульсного напряжения параллельно резисторам высоковольтного плеча были включены импульсные конденсаторы. Низковольтное плечо делителя имело сопротивление 50 Ом, что соответствовало волновому сопротивлению коаксиального кабеля между делителем и осциллографом. Градуировочный коэффициент делителя с учетом согласованного подключения составил $K_Д$ = 56000.

Токи, протекающие через грунт, регистрировались с помощью мостового шунта, выполненного по схеме Пашена. Сопротивление шунта составило 0,39 Ом, градуировочный коэффициент $K_Ш$ = 0,016.

Сигналы с делителей напряжения и токового шунта через согласующие элементы и промежуточные делители поступали на цифровой осциллограф АКИП-4113/2. Измерительная схема приведена на рисунке 2.16 [10].

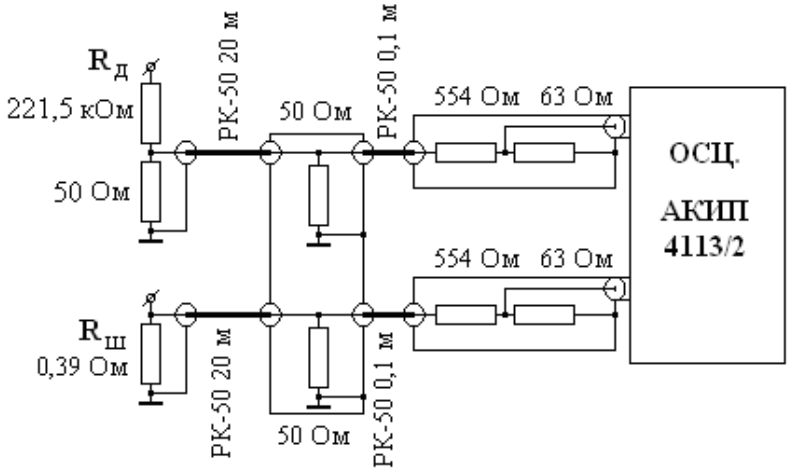


Рисунок 2.16 – Схема измерительного устройства [10]

В центре полигона была подготовлена канава глубиной 0,4 м и шириной 0,4 м, в которой можно было свободно размещать горизонтальные электроды длиной до 10. Эксперименты проводились на электродах нескольких типов [65]:

- вертикальные стержни диаметром 3,5 мм и длиной 200 мм;
- горизонтальные проводники диаметром 2,5 мм (медный провод), 10 мм (стальной пруток), 42 мм (алюминиевая труба), а также стальная полоса шириной 35 мм и толщиной 2,5 мм;
- полусферический электрод диаметром 140 мм.

Длина горизонтальных электродов варьировалась от 2 до 6 м. Горизонтальные электроды закапывались на глубину от 0 до 300 мм.

2.4 Выводы по главе 2

1. Создан лабораторный стенд для исследования процессов искрообразования в грунтах при импульсных воздействиях, состоящий из металлического бака с кварцевым песком, генератора импульсных напряжений по схеме Аркадьева-Маркса и измерительного комплекса на базе осциллографа АКИП-4113/2. Стенд позволял проводить эксперименты с амплитудой импульсов 10-60 кВ и длительностью импульса 2,5-100 мкс.

2. Для определения начала искрообразования в грунтах использовались кривые импульсного сопротивления электродов $R(t) = U(t) / I(t)$. Для получения кривых сопротивления и регистрации осциллограмм напряжения и тока была разработа измерительная система, состоящая из высоковольтного омического делителя напряжения, токового шунта и цифрового осциллографа.

3. Для оптических исследований образования и развития искровых каналов в грунте были разработаны две методики: съемка через стенку стеклянного резервуара с помощью цифрового фотоаппарата и фотофиксация искровых каналов на фотобумаге. С помощью программного комплекса FEMM проведена оценка влияния стеклянного резервуара на величину плотности тока в грунте.

4. Создан высоковольтный полигон вблизи г. Апатиты для экспериментов на электродах, соизмеримых по размерам с реальными заземлителями электротехнических комплексов. В качестве источника импульсов использовался ГИН с максимальной амплитудой на выходе 360 кВ с измерительной системой, аналогичной лабораторному стенду.

ГЛАВА 3 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Лабораторные исследования импульсного сопротивления электродов в высокоомном грунте

Экспериментальные исследования импульсного сопротивления электродов в высокоомном грунте проводились на лабораторном стенде, описанном в главе 2. В качестве грунта использовался кварцевый песок фракцией 0-2 мм. Исследования проводились при двух значениях влажности: 10 % и 20 %, что соответствовало удельному сопротивлению 1000 Ом·м и 1500 Ом·м соответственно. Амплитуда импульсного напряжения изменялась в диапазоне от 30 до 54 кВ. Эксперименты проводились на трех типах электродов: сферический (диаметр 30 мм) для создания относительно однородного поля, дисковый (диаметр 21,5 мм, толщина 1 мм) для создания резконеоднородного поля, и уголковый (35×50 мм, толщина 1 мм) для имитации сечения реальных заземлителей.

На рисунке 3.1 приведены типичные осциллограммы напряжения $U(t)$, тока $I(t)$ и расчетного импульсного сопротивления $R(t) = U(t) / I(t)$ для сферического электрода при влажности грунта 20 %, амплитуде напряжения 54 кВ и длительности импульса до полуспада 25 мкс [12, 26]. Как видно из рисунка в начальный момент времени сопротивление электрода составляет около 1,5 кОм. Спустя примерно 2,5 мкс после начала импульса начинается искрообразование и сопротивление практически мгновенно (менее 1 мкс) снижается до 0,8 кОм. Сопротивление электрода остается на минимальном значении некоторое время, длительность которого пропорциональна длительности импульса. По мере спада напряжения сопротивление восстанавливается за несколько мкс до исходного уровня. Такой характер изменения сопротивления характерен для однородного поля при высокой влажности грунта [12].

На рисунке 3.2 представлены зависимости минимального сопротивления сферического электрода от длительности импульса при различных амплитудах напряжения [12]. Кривые 1-5 соответствуют значениям постоянной времени 600, 500, 260, 125 и 50 мкс. Как видно из рисунка, увеличение длительности импульса приводит к снижению минимального сопротивления электрода: при τ = 600 мкс и U = 54 кВ сопротивление падает до 0,8 кОм, тогда как при τ = 50 мкс сопротивление снижается лишь до 1,2 кОм. При напряжениях 48 кВ и малых длительностях импульса (постоянная

времени τ = 50 мкс) сопротивление остается на уровне стационарного значения, что свидетельствует об отсутствии искровых процессов в грунте [12].

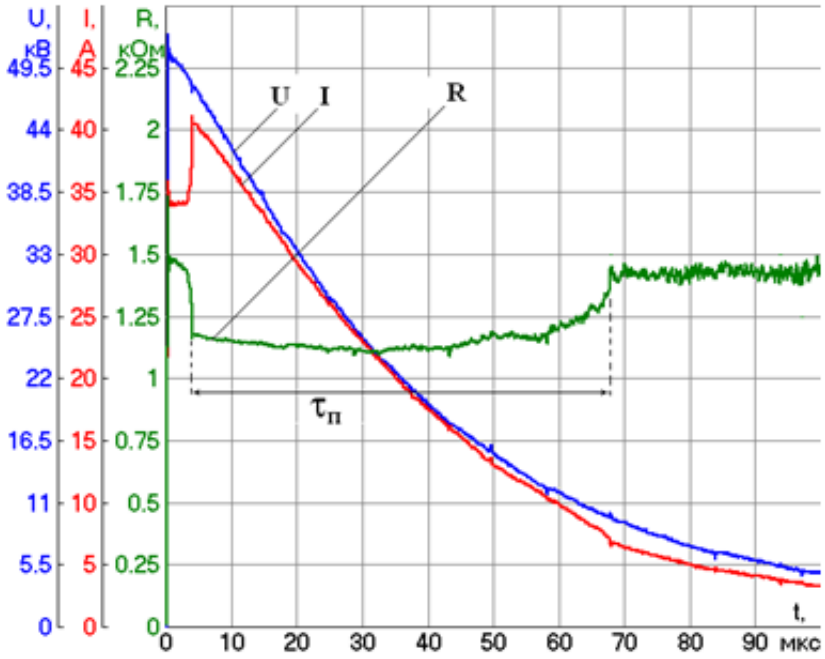
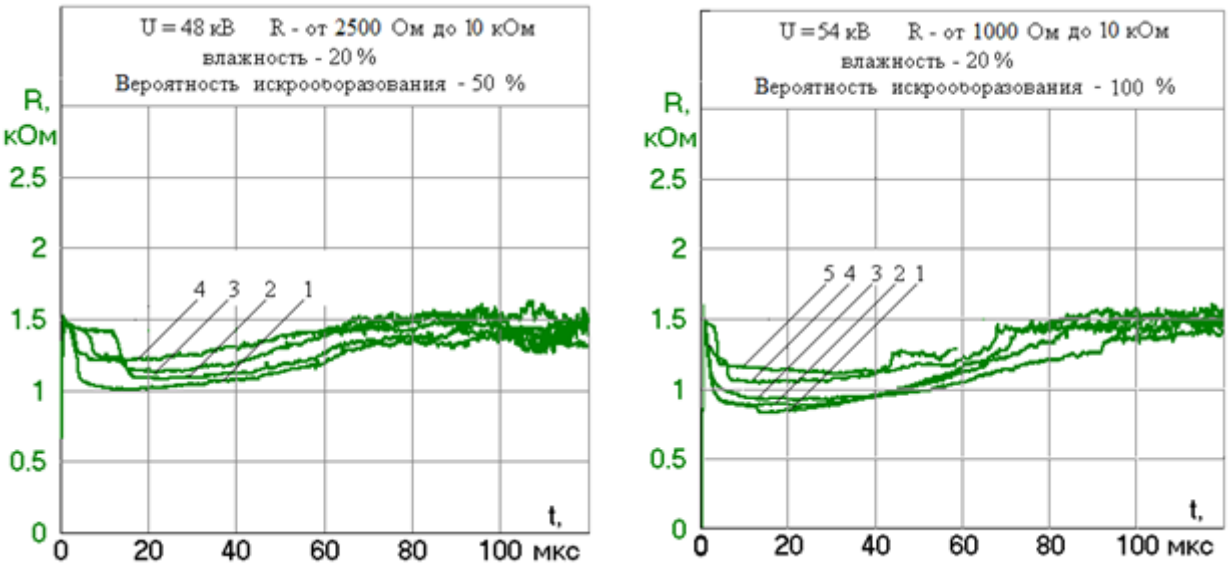


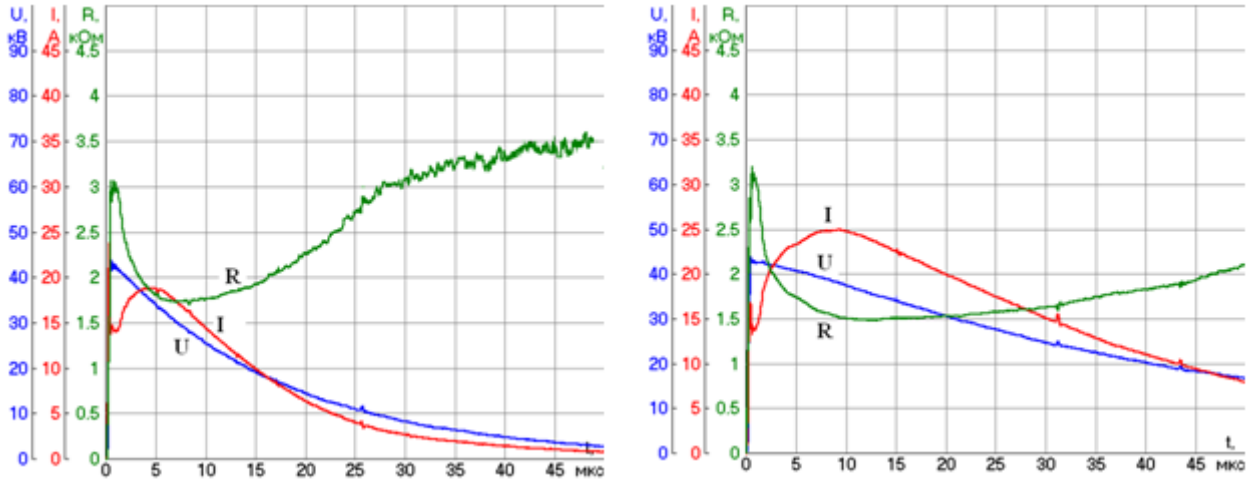
Рисунок 3.1 – Импульсные электрические параметры электрода при U = 54 кВ и τ = 25 мкс [12]

При снижении влажности грунта до 10 % характер изменения сопротивления становится иным [12]. На рисунке 3.3 приведены осциллограммы для сферического электрода при U = 42 кВ и различных длительностях. В отличие от случая с высокой влажностью, снижение сопротивления происходит более плавно, без резкого скачка.



1 – τ = 600 мкс, 2 – τ = 500 мкс, 3 – τ = 260 мкс, 4 – τ = 125 мкс, 5 – τ = 50 мкс

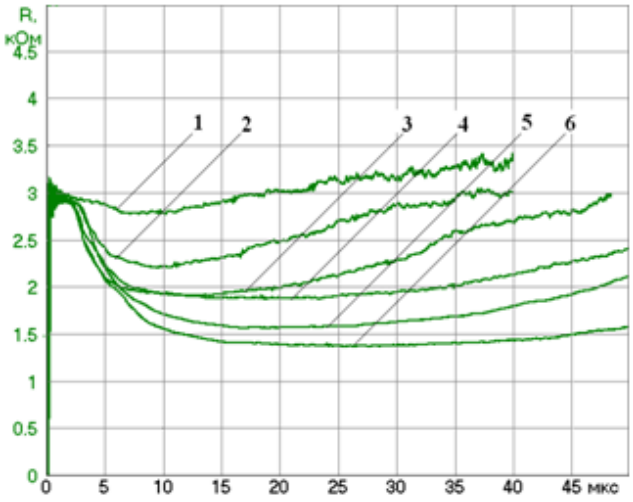
Рисунок 3.2 – Кривые импульсного сопротивления при разных длительностях импульса на электроде [12]



τ = 20 мкс τ = 125 мкс

Рисунок 3.3 – Импульсные электрические параметры электрода при U = 42 кВ и разных значениях постоянной времени [12]

На рисунке 3.4 представлены зависимости сопротивления от длительности импульса при U = 42 кВ и влажности 10 % [12]. Кривые 1-6 соответствуют различным значениям формирующего сопротивления (от 335 до 10200 Ом). Как и в предыдущей серии экспериментов видно, что с увеличением длительности импульса сопротивление снижается: при τ = 16,7 мкс минимальное сопротивление составляет около 2,8 кОм, при τ = 510 мкс – около 1,4 кОм. При данных параметрах импульса напряжения и влажности грунта статистический разброс сопротивления оказался весьма значительным: при одинаковых параметрах импульса сопротивление могло изменяться в пределах ±15 % [12].



1 – τ = 16,7 мкс, 2 – τ = 30,5 мкс, 3 – τ = 49 мкс, 4 – τ = 125 мкс, 5 – τ = 177 мкс, 6 – τ = 510 мкс

Рисунок 3.4 – Кривые импульсного сопротивления при разных длительностях импульса на электроде [12]

Для изучения процессов искрообразования в резконеоднородном поле использовался дисковый электрод диаметром 21,5 мм и толщиной 1 мм [12]. Эксперименты проводились при влажности грунта 10 % и трех значениях амплитуды импульсного напряжения: 30, 36 и 42 кВ. На рисунке 3.5 приведены типичные осциллограммы напряжения, тока и кривая сопротивления при напряжении U = 30 кВ и длительности импульса до полуспада 30 мкс (постоянная времени τ = 50 мкс) [26]. Как видно из рисунка снижение сопротивления начинается примерно через 2 мкс после начала импульса и носит достаточно плавный характер. Минимальное сопротивление составляет около 3,5 кОм.

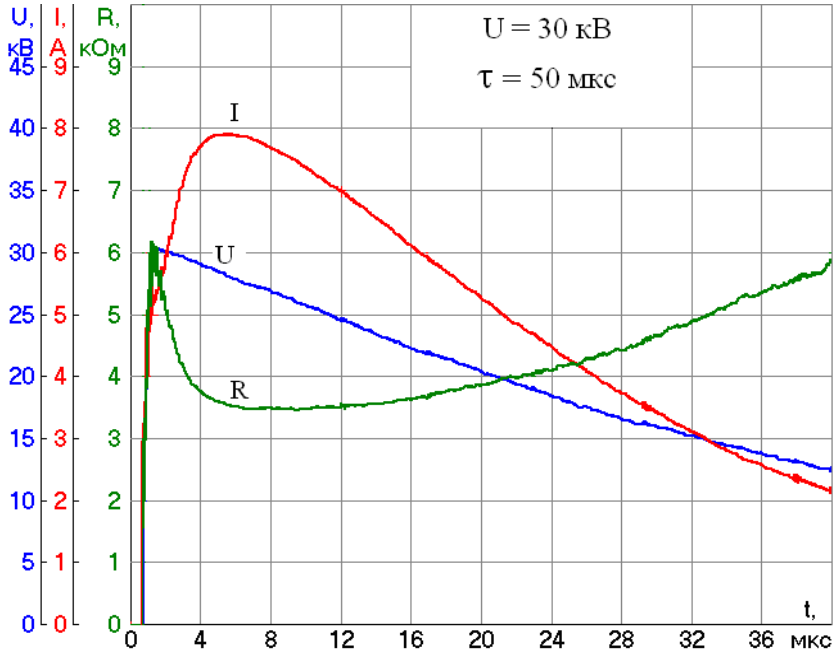


Рисунок 3.5 – Типичные осциллограммы напряжения, тока и кривая импульсного сопротивления при τ = 50 мкс [12]

На рисунке 3.6 приведены кривые импульсного сопротивления сопротивления при разных длительностях импульса и при амплитуде напряжения 30 кВ [12]. Как видно из рисунка, с увеличением постоянной времени τ от 2,5 до 1000 мкс сопротивление снижается с 6,6 до 2,9 кОм. При малых длительностях импульса (τ < 2,5 мкс) искровые каналы практически не развивается, о чем свидетельствует высокое сопротивление.

На рисунке 3.7 приведены кривые импульсного сопротивления при разной длительности импульса и амплитуде 36 кВ. Как видно, увеличение амплитуды до 36 кВ приводит к более значительному снижению сопротивления. При длительности импульса 2,5 мкс минимальное сопротивление составляет около 5,5 кОм, а при увеличении постоянной времени свыше 50 мкс остается на уровне около 2,5 кОм. Сравнение с

предыдущей серией экспериментов показывает, что увеличение амплитуды всего на 6 кВ приводит к дополнительному снижению сопротивления примерно на 1 кОм [12].

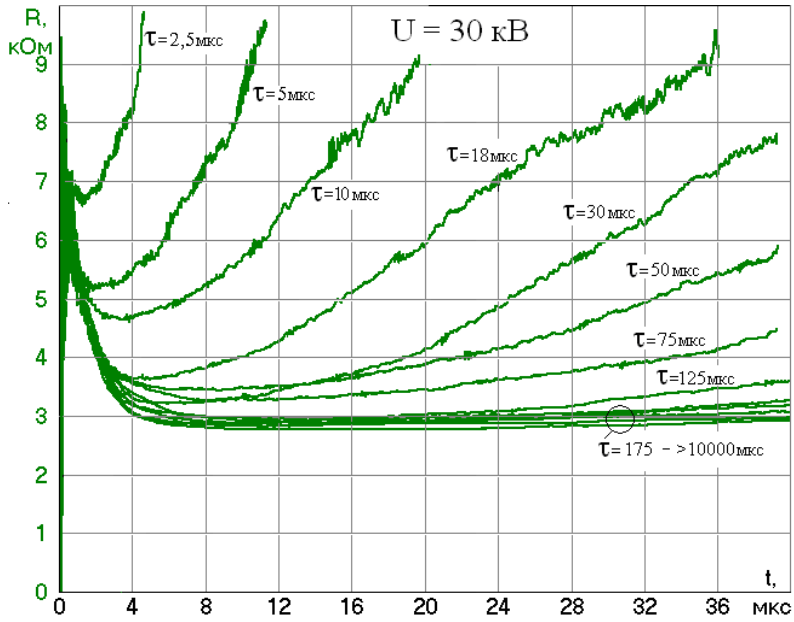


Рисунок 3.6 – Кривые импульсного сопротивления при разных длительностях импульса на электроде [12]

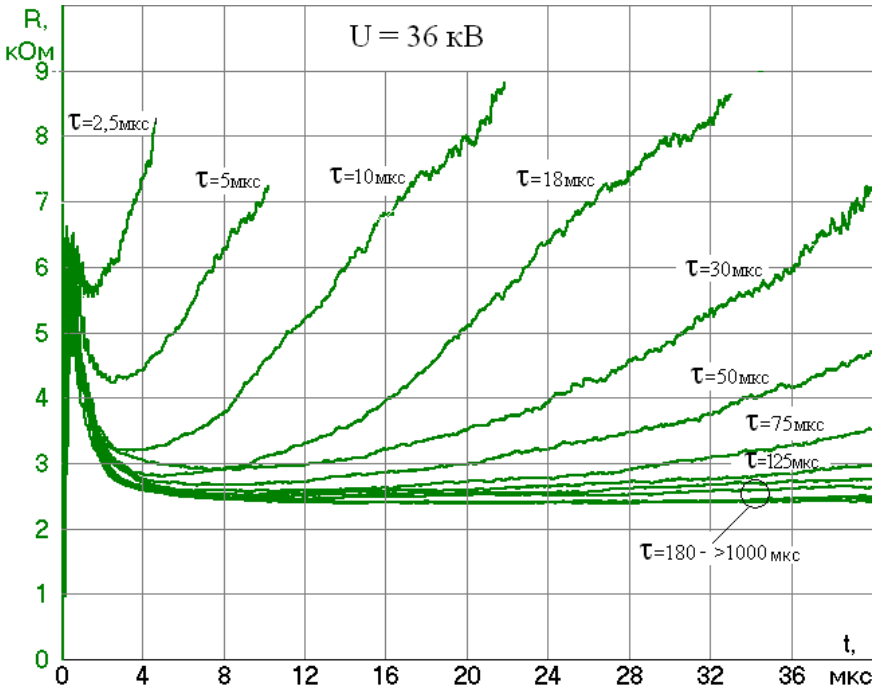


Рисунок 3.7 – Кривые импульсного сопротивления при разных длительностях импульса на электроде [12]

На рисунке 3.8 приведены результаты экспериментов при амплитуде напряжения U = 42 кВ. Как видно при данном значении напряжения сопротивление электрода начинает снижаться раньше и более интенсивно. При постоянной времени τ = 2,5 мкс сопротивление снижается до 3,8 кОм, а при τ = 75-1000 мкс достигает 1,8 Ом. Таким

образом, увеличение амплитуды с 30 до 42 кВ (в 1,4 раза) приводит к снижению сопротивления в 1,6-2,3 раза в зависимости от длительности.

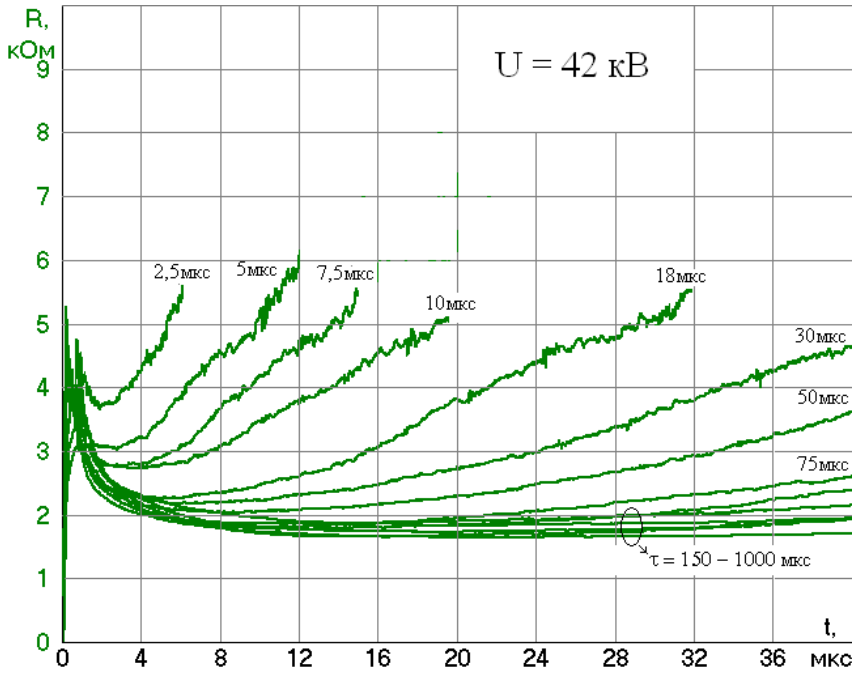
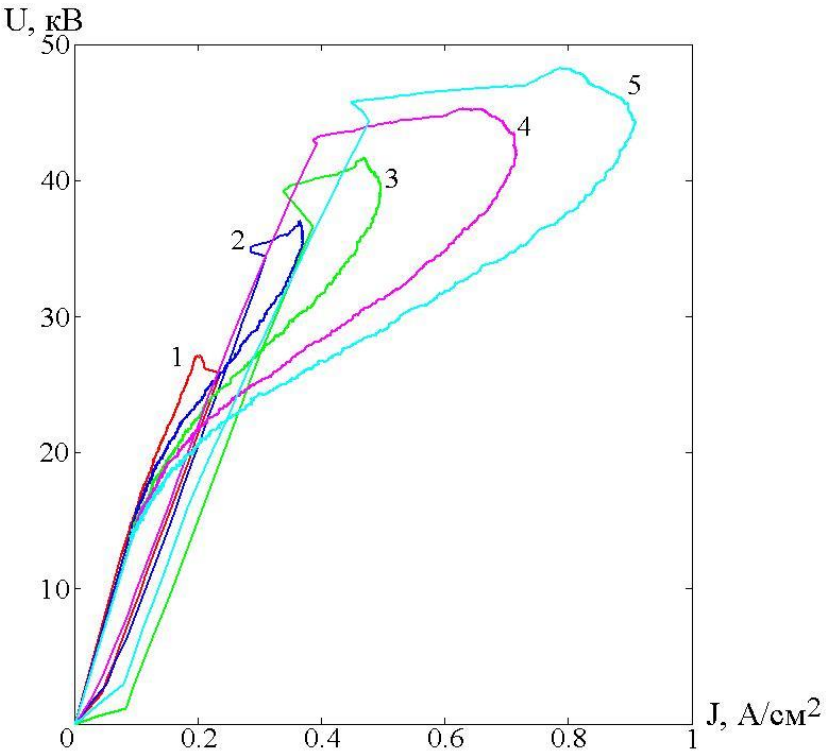


Рисунок 3.8 – Кривые импульсного сопротивления при разных длительностях импульса на электроде [12]

На рисунке 3.9 приведены вольт-амперные характеристики (ВАХ) дискового электрода, построенные по полученным экспериментальным данным. ВАХ имеют ярко выраженный гистерезис: значение тока на стадии спада импульса выше тока на стадии нарастания при одинаковых значениях напряжения [26]. При малых напряжениях (28 кВ) характеристика линейна и соответствует стационарному сопротивлению. Увеличение напряжения до 37 кВ приводит образованию нелинейных процессов в грунтах и появлению петля гистерезиса на ВАХ. Обратное направление кривой описывает процесс деионизации грунта при спаде напряжения. Определение E_c по петлеобразным вольт-амперным характеристикам, полученным из осциллограмм тока и напряжения, является наиболее точным и простым способом. 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 [26].



1 – 28 кВ, 2 – 37, 3 – 42, 4 – 45, 5 – 48 кВ

Рисунок 3.9 – Вольт-амперные характеристики увлажненного кварцевого песка при разных амплитудах импульса напряжения [26]

Ионизация на краях дисковых электродов носит многоискровой характер и наблюдается при плотностях тока $j > j_c$, где $j_c \approx 0{,}5$ А/см² – критическая плотность тока развития ионизационно-перегревной неустойчивости, полученная из данных по динамическим вольт-амперным характеристикам во влажном песке [26]. Время развития ионизационно-перегревной неустойчивости в газах составляет несколько микросекунд, после чего температура искрового канала повышается до 4000–5000 К и образуется термически ионизованная плазма. Во влажном песке вода и твердые частицы имеют высокую плотность по сравнению с воздухом, поэтому на развитие неустойчивости требуется больше времени для прогрева.

Для экспериментов на моделях реальных заземлителей использовался уголковый электрод 35×50 мм толщиной 1 мм, как модель уголковой стали. На рисунке 3.10 приведены кривые импульсного сопротивления электрода от длительности импульса при U = 30 кВ и влажности 10 % [12]. Как и во всех предыдущих сериях экспериментов, с увеличением постоянной времени τ от 2,5 до 1000 мкс сопротивление уголкового электрода снижалось с 3,2 до 2 кОм. Характер поведения сопротивления электрода

аналогичен случаю с дисковым электродом, что объясняется резконеоднородным полем в обоих случаях.

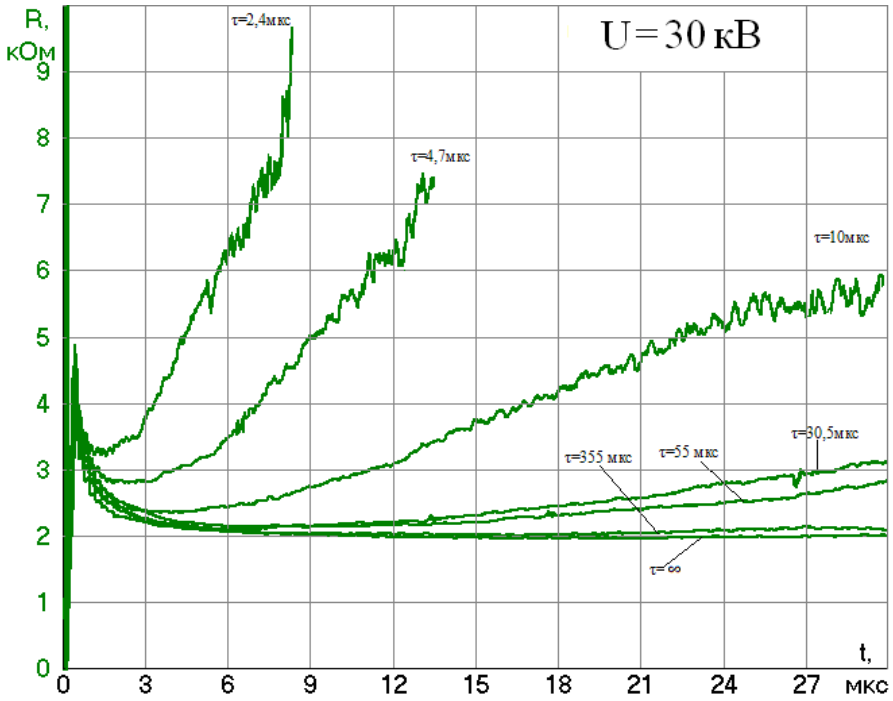


Рисунок 3.10 – Зависимости сопротивления электродной системы от длительности импульса [12]

На основе полученных осциллограмм напряжения и тока для сферического электрода была исследована зависимость критической напряженности электрического поля начала искрообразования от длительности импульса [15]. Эксперименты проводились при влажности грунта 5-7 % (ρ = 470-1290 Ом·м). На рисунке 3.11 приведена полученная зависимость. Как видно при длительности импульса 50 мкс критическая напряженность составляет 9,5 кВ/см. При уменьшении длительности импульса до 10 мкс критическая напряженность возрастает на 20 %. Такая зависимость схожа с характеристикой электрического пробоя газов и это говорит о том, что процессы ионизации происходят именно в воздушных включениях грунта.

Анализ полученных результатов говорит о том, что причиной образования искровых каналов при нелинейном растекании импульсного тока в грунте является ионизационно-перегревная неустойчивость, возникающая при плотности тока на электроде больше критической [26]. Развитие неустойчивости приводит к неоднородному распределению тока вдоль электрода, в результате чего возникают области, где плотностью тока выше и именно в них и образуются искровые каналы. Время развития неустойчивости во влажном песке выше времени в газах, что, скорее

всего, связано с необходимостью нагрева и испарения воды. Вероятнее всего, задержка начала искрообразования, которую мы наблюдали в опытах со сферическим электродом, обусловлена именно временем развития неустойчивости.

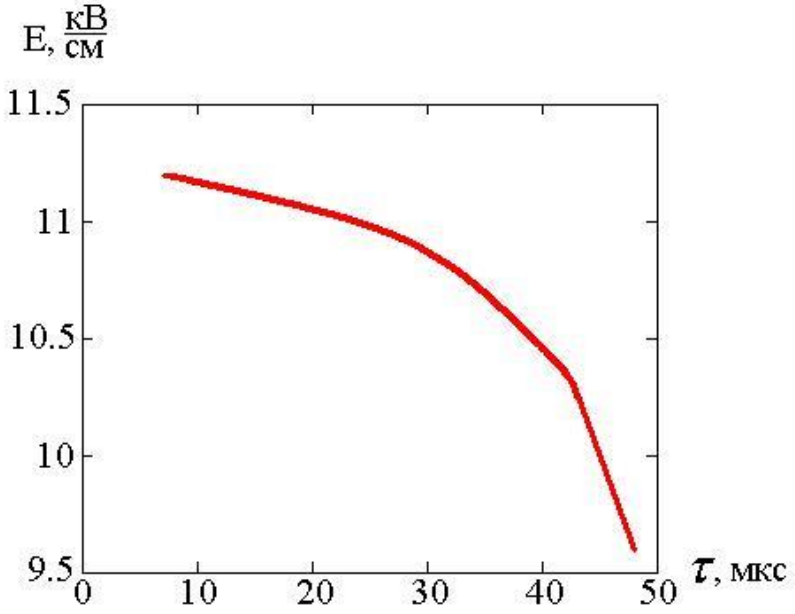


Рисунок 3.11 – Зависимость критической напряженности электрического поля от длительности приложенного импульса [15]

Для того, чтобы оценить скорость роста искровых каналов в грунте использовалась зондовая система. По осциллограммам напряжения на зонде определялось время прорастания канала от электрода до зонда, после чего рассчитывалась средняя скорость.

Эксперименты проводились при трех значениях амплитуды импульсного напряжения (38, 42 и 50 кВ) и трех расстояниях от электрода до зонда (15, 25 и 35 мм) [16]. Влажность грунта составляла 10 %. Результаты приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Скорость роста искровых каналов в грунте [16]

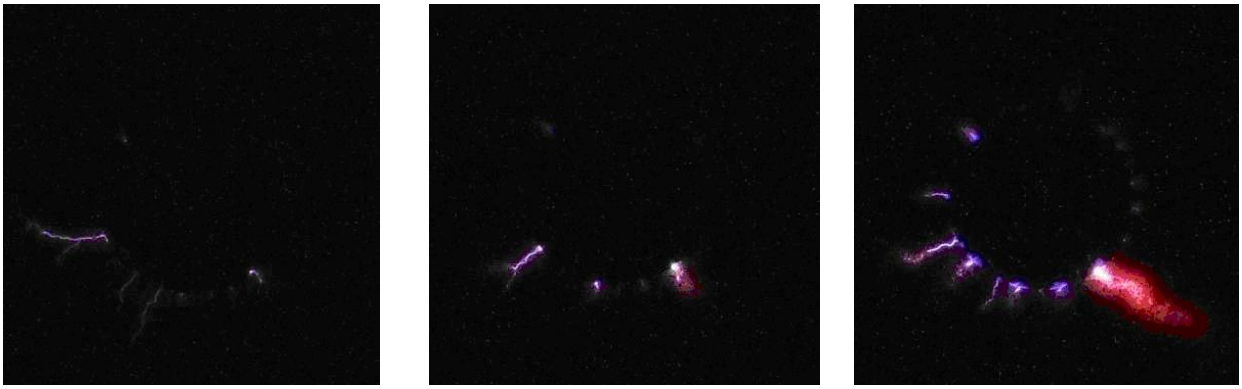
U, кВ	*S*, мм	*t*, мкс	*v*, мм/мкс	Вероятность захвата, %
38	15	1,51	9,9	60
38	25	1,99	12,6	40
38	35	3,28	7,3	12
42	15	1,24	12,1	68
42	25	1,79	14,1	48
42	35	1,72	20,6	31
50	35	1,19	29,4	68

Из таблицы видно, что скорость роста каналов увеличивается с ростом напряжения: при U = 38 кВ скорость составляет 7-13 мм/мкс, при U = 42 кВ – 12-21 мм/мкс, при U = 50 кВ достигает 29 мм/мкс. Зонд не всегда регистрировал проходил искрового канала, эта вероятность возрастала с увеличением напряжения и уменьшением расстояния.

3.2 Оптические наблюдения искровых каналов в объеме грунта

Методики проведения оптических исследований описаны в главе 2. Эксперименты проводились для дискового и уголкового электродов при влажности грунта 10 %. В случае со сферическим электродом зафиксировать искровые процессы не удалось при всех параметрах импульса. Это, скорее всего, связано с однородным распределением поля вокруг электрода, в результате чего интенсивность искрообразования небольшая [12].

На рисунке 3.12 представлены фотографии искрообразования вокруг дискового электрода диаметром 21,5 мм и толщиной 1 мм при амплитуде напряжения 42 кВ, влажности грунта 10 % и трех значениях длительности импульса [12].



а б в

а – 2,5 мкс, б – 50 мкс, в – 260 мкс

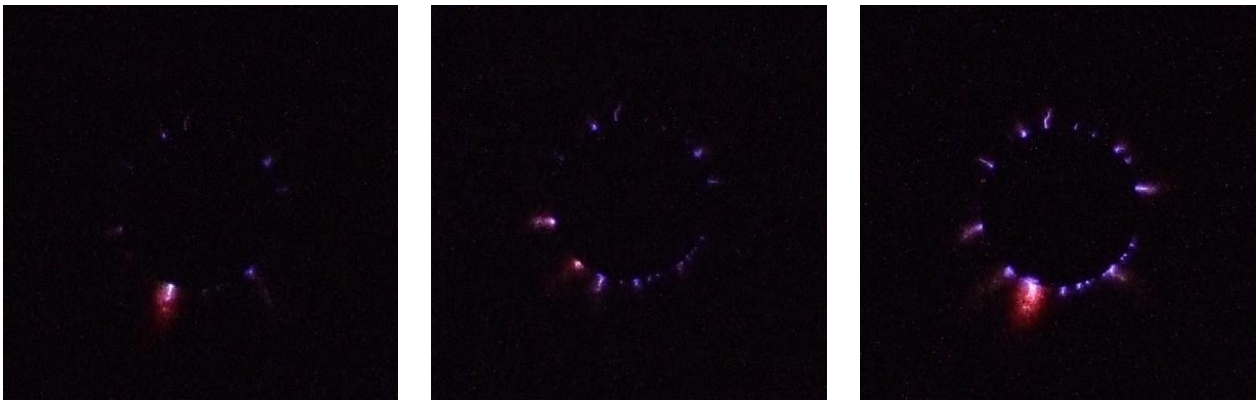
Рисунок 3.12 – Фотографии искровых каналов вокруг диска при амплитуде напряжения U = 42 кВ и разных длительностях приложенного импульса тока [12]

При τ = 2,5 мкс (рисунок 3.12, а) наблюдаются единичные тусклые искровые каналы, едва заметные на фотографии. Их длина не превышает нескольких миллиметров, свечение слабое. На осциллограммах в этом режиме фиксируется незначительное снижение сопротивления, что соответствует начальной стадии развития искрообразования.

При увеличении длительности импульса (постоянная времени τ = 10 мкс (рисунок 3.12, б) количество каналов возрастает, они становятся более яркими, при этом длина каналов не увеличивается. Каналы локализованы преимущественно на краю диска.

При τ = 260 мкс (рисунок 3.12, в) наблюдается интенсивное факельное свечение, охватывающее практически весь край электрода. Искровые каналы становятся более протяженными и яркими, их количество существенно возрастает. Свечение носит объемный характер, заполняя пространство вокруг электрода. В этом режиме сопротивление электрода достигает минимальных значений.

На рисунке 3.13 представлены фотографии искрообразования вокруг электрода, имеющего профиль круглого стержня при напряжениях 30, 36 и 42 кВ [12]. Увеличение амплитуды импульса напряжения приводит к увеличению количества искровых каналов вокруг электрода, яркости их свечения и длине.



30 кВ 36 кВ 42 кВ

Рисунок 3.13 – Фотографии искрообразования вокруг электрода, имеющего профиль круглого стержня в зависимости от напряжения [25, 67]

На рисунке 3.14 представлены фотографии искрообразования вокруг уголкового электрода 35×50 мм при амплитуде напряжения 30 кВ, влажности грунта 10 % и постоянной времени 510 мкс [12]. Свечение наблюдается в виде трех ярких факелов, развивающихся из углов электрода. Остальная поверхность электрода свечения не дает, что свидетельствует об отсутствии искровых каналов на этих участках. При меньших длительностях импульса искрообразование не фиксировалось.



Рисунок 3.14 – Фотография искрообразований в грунте вокруг электрода в виде уголка [12]

На рисунке 3.15 представлены фотографии искрообразования вокруг уголкового электрода при амплитуде напряжения 30 кВ, влажности грунта 20 % и трех значениях длительности импульса.

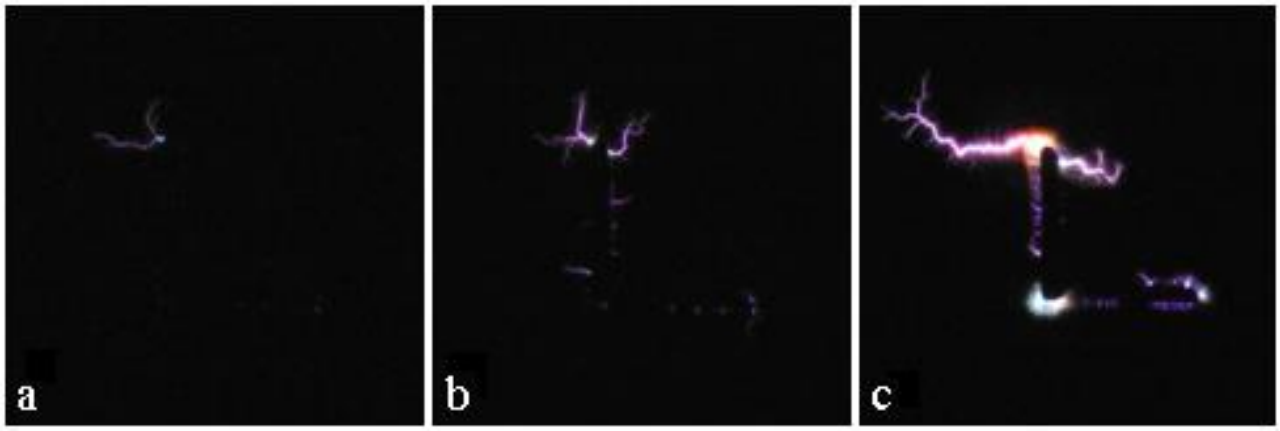


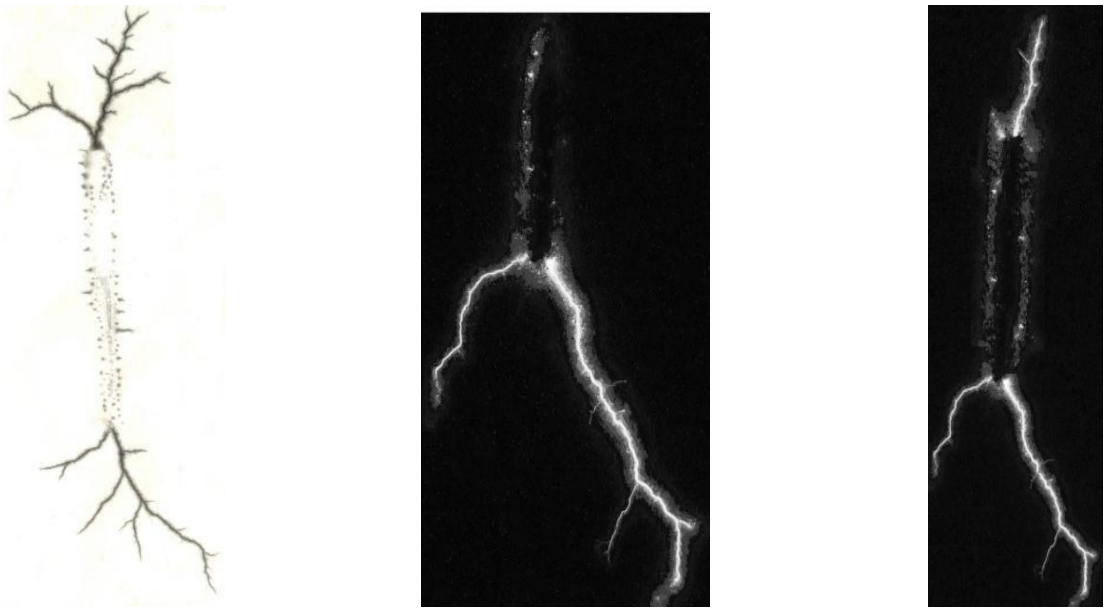
Рисунок 3.15 – Фотографии плазменных каналов вокруг уголка при амплитуде напряжения U=30 кВ и разных длительностях приложенного импульса тока [26]: a – 2 мкс, b – 30 мкс, c – 70 мкс

При τ = 2 мкс (рисунок 3.15, a) наблюдаются два очень тусклых искровых канала небольшой длины, развивающиеся с одного из углов электрода. При увеличении длительности импульса до 30 мкс (рисунок 3.15, b) в том же углу каналы становятся более протяженными и яркими, появляется свечение практически по всей поверхности электрода, но общее количество каналов не увеличивается. При длительности импульса 70 мкс (рисунок 3.15, c) свечение вокруг всего электрода становится более

интенсивным, но при этом общее количество каналов не меняется, а только их длина и яркость.

На рисунке 3.16а приведены результаты, полученные при использовании метода с фотобумагой для стержневого электрода. Из рисунка видно, что искровые каналы развиваются от торца электрода, где плотность тока максимальна. На рисунках 3.16, б,в приведены результаты съемки через стекло вокруг этого же электрода. Как видно из рисунков оба метода показывают очень схожие результаты.

В резконеоднородном поле искрообразование начинается с острых кромок электродов, где плотность тока и напряженность поля максимальны. При низкой влажности (10 %) развивается факельный разряд, характеризующийся объемным свечением, что, вероятно, связано с высокой концентрацией воздушных включений в грунте, в которых развиваются разряды. При высокой влажности (20 %) воздушные включения частично замещаются водой, что приводит к контракции тока и формированию отдельных искровых каналов.



а б в

Рисунок 3.16 – Фотографии искровых каналов вокруг вертикального электрода [24]

Увеличение длительности импульса при фиксированной амплитуде приводит к росту количества каналов, их длины и яркости, что объясняется повышением энерговклада в разряд. При малых длительностях ($\tau \leq 5$–10 мкс) искрообразование либо отсутствует, либо носит единичный характер, так как время развития ионизационно-перегревной неустойчивости превышает длительность импульса. При больших

длительностях ($\tau \geq 100$ мкс) процессы выходят на стационарный режим, и дальнейшее увеличение τ не приводит к существенному изменению характера искрообразования.

3.3 Полигонные испытания на электродах, соизмеримых с реальными заземлителями

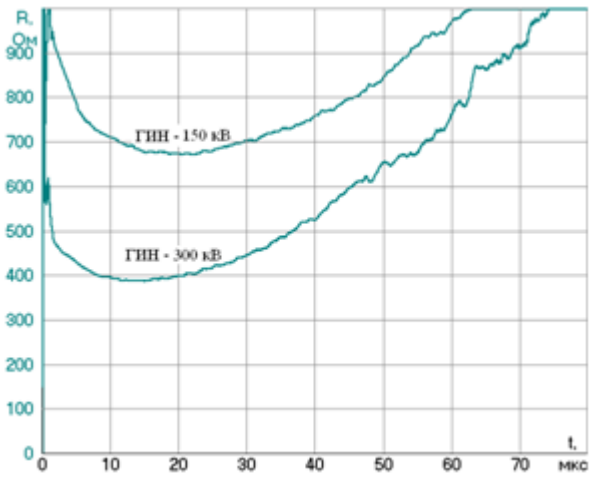
Для верификации результатов, полученных в лабораторных условиях, и оценки влияния масштабного фактора были проведены экспериментальные исследования на высоковольтном полигоне, расположенном вблизи г. Апатиты. Грунт полигона – песчано-гравийный, типичный для Кольского полуострова, с удельным сопротивлением 1100 Ом·м. В качестве источника импульсных напряжений использовался шестиступенчатый генератор Аркадьева–Маркса, формирующий импульсы положительной полярности с амплитудой до 450 кВ и длительностью фронта 1,0 ± 0,2 мкс.

В первой серии испытаний исследовались три типа сосредоточенных электродов: вертикальный стержень длиной 1 м и диаметром 20 мм, горизонтальный стержень длиной 2 м и диаметром 12 мм, а также полусферический электрод диаметром 140 мм. Полусфера была выбрана для создания относительно однородного поля, что позволяет оценить влияние неоднородности поля на процессы искрообразования. Осциллограммы расчетных импульсных сопротивлений сосредоточенных заземлителей, при подаче высоковольтных импульсов приведены на рисунке 3.17 [16]. Осциллограммы и зависимости сопротивлений представлены для импульсных напряжений 150 кВ и 300 кВ.

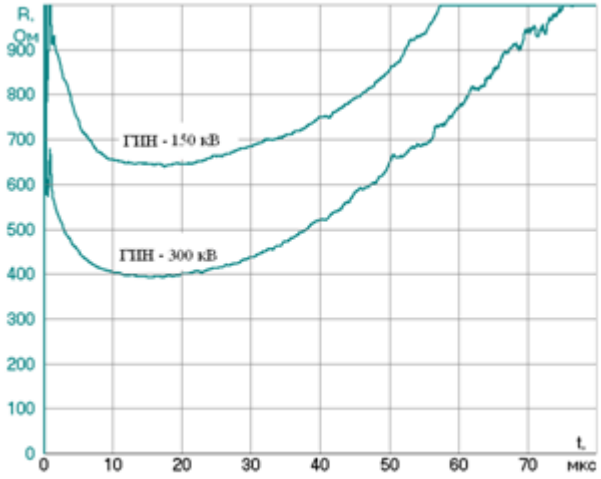
Приведенные на рисунке 3.17 зависимости показывают, что у сосредоточенных заземлителей различных конструкций при высоких напряженностях электрического поля изменение импульсного сопротивления электрода практически одинаково, что может говорить о совпадении характера развития искровых каналов. Таким образом, при напряженностях поля, значительно превышающих критические значения начала искрообразования, форма сосредоточенного электрода практически не влияет на его сопротивление.

Одной из задач работы было оценить влияние геометрии электродов на развитие искровых каналов и импульсное сопротивление электродов. Для этого были проведены эксперименты с тремя электродами разных типов, но с одинаковой площадью поверхности ($S \approx 1818$ см^2): горизонтальный стержень длиной 4,82 м и диаметром 12 мм

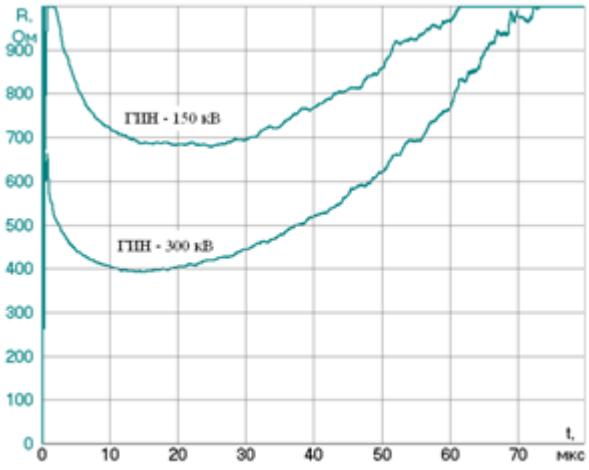
(резконеоднородное поле), горизонтальная труба длиной 1,36 м и диаметром 42 мм (умеренно неоднородное поле) и сферический электрод диаметром 340 мм (слабонеоднородное поле) [18]. Горизонтальные электроды укладывались в траншею на глубине 0,5 м, сфера закапывалась в грунт наполовину.



сферический электрод



вертикальный электрод



горизонтальный электрод на поверхности грунта

Рисунок 3.17 – Импульсные сопротивления электродов разных конструкций при разных напряжениях ГИН [16]

Результаты экспериментов приведены в таблице 3.2. Стационарное сопротивление стержня составило 785 Ом, трубы – 1500 Ом, полусферы – 3250 Ом. При амплитуде импульса 300 кВ у стержня было наименьшее импульсное сопротивление (230 Ом), у полусферы – наибольшее (650 Ом), у трубы было промежуточное значение (410 Ом). Для оценки интенсивности ионизации был рассчитан коэффициент снижения К равный отношению стационарного сопротивления к минимальному импульсному сопротивлению при амплитуде импульса 300 кВ. Как видно из таблицы самое большое

значение коэффициента снижения получилось для полусферы (5,0), что говорит о том, что образующиеся искровые каналы сильнее всего меняют площадь стекания тока в данном случае.

Таблица 3.2 – Сопротивление электродов в стационарном и импульсном режимах [18]

Тип электрода	Стационарное сопротивление $R_{ст}$, Ом	Минимальное импульсное сопротивление $R_{имп\ мин}$ (U = 168 кВ), Ом	Минимальное импульсное сопротивление $R_{имп\ мин}$ (U = 300 кВ), Ом	Коэффициент снижения $K = R_{ст}/R_{имп\ мин}$ (300 кВ)
Стержень (L=4,82 м, d=12 мм)	785	280	230	3,41
Труба (L=1.36 м, D=42 мм)	1500	540	410	3,65
Полусфера (Dш=340 мм)	3250	950	650	5,00

На рисунках 3.18-3.20 представлены осциллограммы напряжения, тока и расчетного импульсного сопротивления для всех трех типов электродов при амплитуде 300 кВ [18]. На всех кривых наблюдаются три характерные фазы: начальный ёмкостный выброс тока (t < 2 мкс), фаза интенсивного снижения сопротивления за счет развития ионизации (2 < t < 20 мкс) и фаза восстановления (t > 20 мкс).

Для горизонтального стержня (рисунок 3.18) снижение сопротивления происходит быстрее всего, минимальное значение достигается за 8-10 мкс [18]. Это связано с резкой неоднородностью электрического поля у торца электрода, где напряженность электрического поля сильно превышает критическое значение, за счет чего быстрее происходит рост искровых каналов. Для горизонтальной трубы (рисунок 3.19) минимум достигается за 13 мкс. Для полусферического электрода (рисунок 3.20) процесс снижения сопротивления самый медленный, минимум достигается за 15-20 мкс, несмотря на то, что коэффициент снижения при этом максимален.

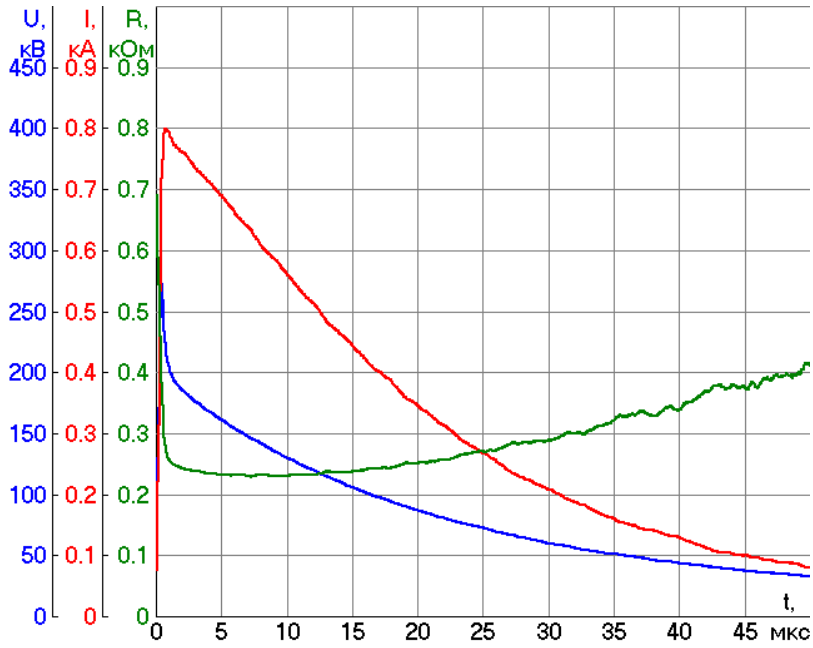


Рисунок 3.18 – Импульсные характеристики горизонтального стержневого электрода при амплитуде воздействия 300 кВ [18]

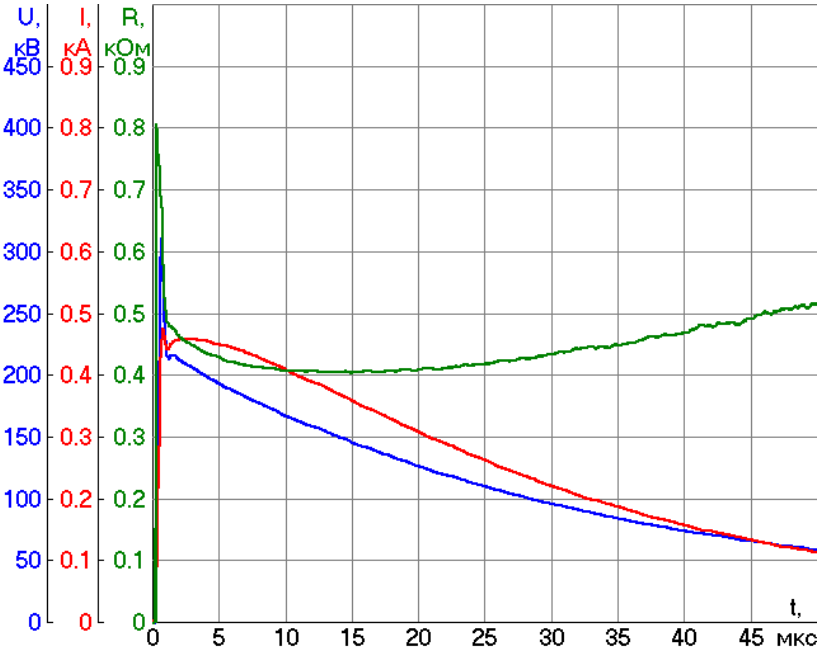


Рисунок 3.19 – Импульсные характеристики горизонтального трубчатого заземлителя при амплитуде воздействия 300 кВ [18]

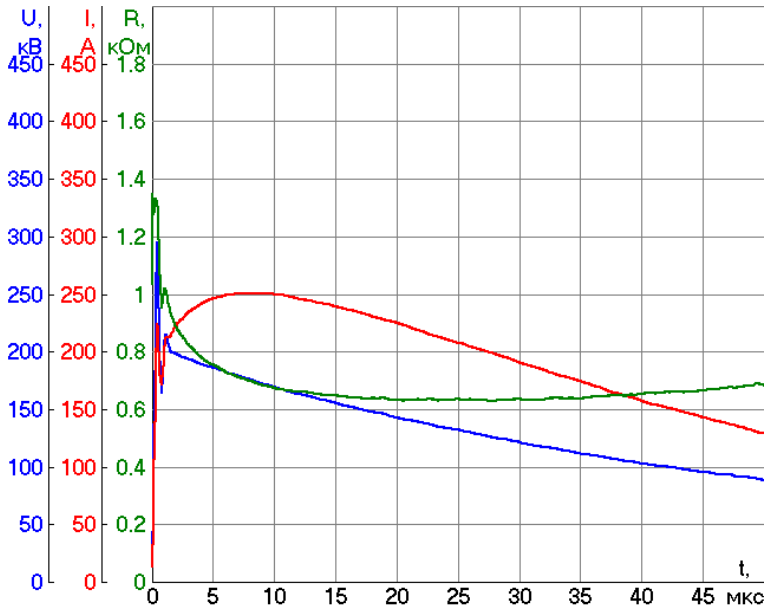


Рисунок 3.20 – Импульсные характеристики полусферического заземлителя при амплитуде воздействия 300 кВ [18]

Для того чтобы оценить влияние длины и диаметра электрода на его импульсное сопротивление были проведены эксперименты с горизонтальными электродами длиной 2 и 6 м из проводников разного диаметра: медный провод 2,5 мм, стальной пруток 10 мм. Электроды закапывались в грунт на глубине 0,3 м. Эксперименты проводились при двух значениях импульсного напряжения 150 кВ и 300 кВ. На рисунке 3.21 приведены полученные кривые импульсного сопротивления электродов.

Для электрода длиной 2 м провод диаметром 2,5 мм имеет импульсное сопротивление 400 Ом при 150 кВ и 290 Ом при 300 кВ; пруток диаметром 10 мм – 460 Ом при 150 кВ и 300 Ом при 300 кВ (таблица 3.3). Снижение сопротивления происходит относительно медленно: минимум достигается через 10-15 мкс. При этом наблюдается заметное влияние диаметра проводника: более толстый пруток имеет несколько большее сопротивление, что может быть связано с меньшей плотностью тока и, как следствие, менее интенсивным искрообразованием.

Для электрода длиной 6 м ситуация меняется. Сопротивление провода диаметром 2,5 мм составляет 260 Ом при 150 кВ и 200 Ом при 300 кВ; пруток диаметром 10 мм – 260 Ом при 150 кВ и 200 Ом при 300 кВ. Снижение сопротивления происходит значительно быстрее: минимум достигается уже через 5-8 мкс. При этом диаметр проводника практически не влияет на импульсное сопротивление, в обоих случаях значения одинаковы при всех уровнях напряжения.

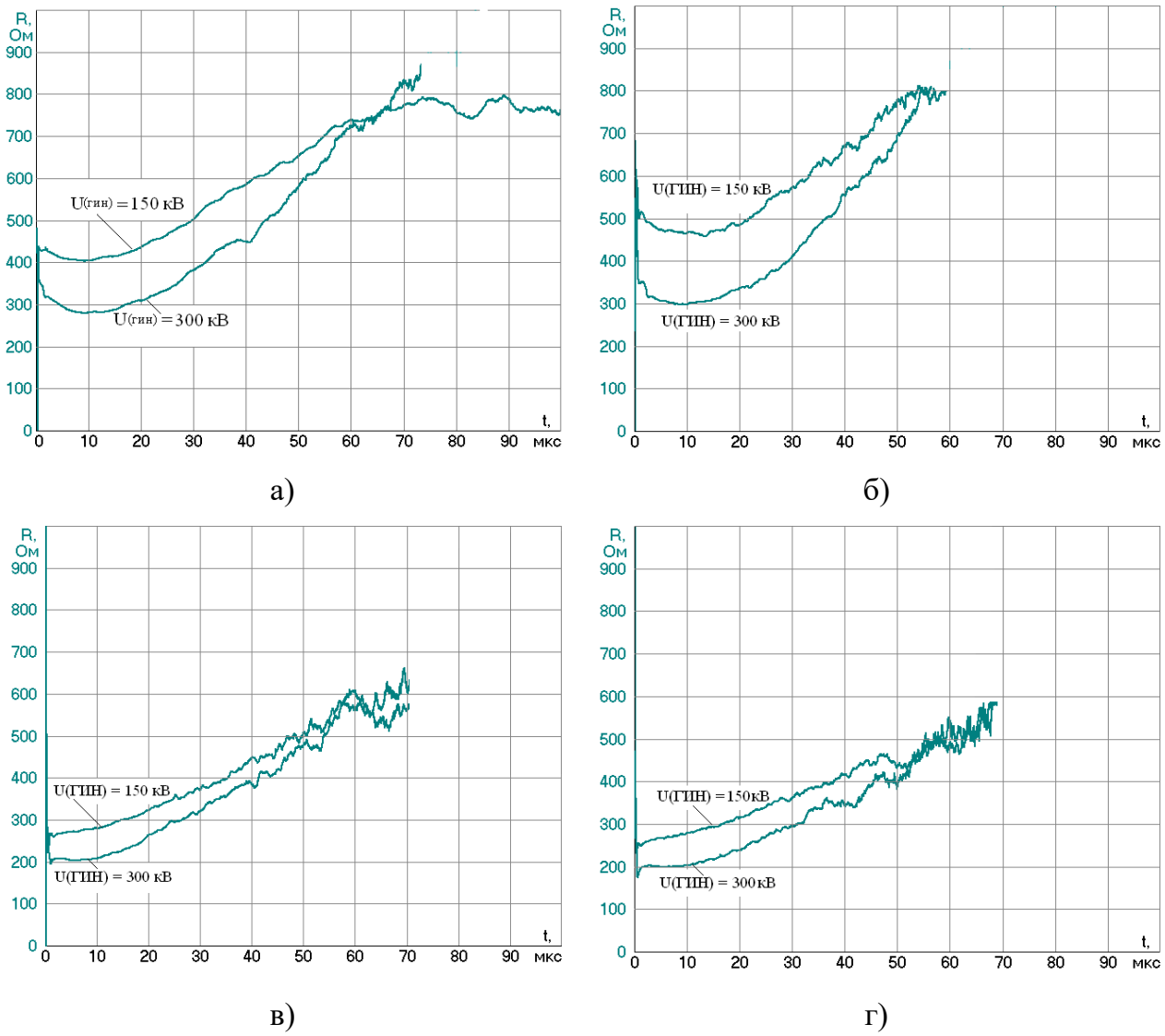


Рисунок 3.21 – Расчетные зависимости импульсных сопротивлений электродов длиной 2 м и 6 м [16], где а) провод диаметром 2,5 мм и длиной 2 м; б) пруток диаметром 10 мм и длиной 2 м; в) провод, диаметром 2,5 мм и длиной 6 м; г) пруток, диаметром 10 мм и длиной 6 м

Полученные результаты показывают, что в случае протяженных заземлителей (длиной 6 м и более) диаметр электрода не оказывает существенного влияния на импульсное сопротивление. Скорее всего, это связано с тем, что сопротивление снижается за счет развития искровых каналов вдоль поверхности электрода, а не увеличения его сечения. Для заземлителей длиной 2 м влияние диаметра заметно, это связано с тем, что при увеличении диаметра электрода увеличивается его площадь поверхности и при этом уменьшается начальная плотность тока. Также на коротких заземлителях ограниченно пространство для развития искровых каналов.

Таблица 3.3 – Импульсное сопротивление протяженных горизонтальных электродов [16]

Электрод	Длина, м	$R_{мин}$ (150 кВ), Ом	$R_{мин}$ (300 кВ), Ом
Провод 2,5 мм	2	400	290
Пруток 10 мм	2	460	300
Провод 2,5 мм	6	260	200
Пруток 10 мм	6	260	200

Для исследования эффекта экранирования были проведены эксперименты на электродах, состоящих из 2, 3 и 4 лучей одинаковой суммарной длиной 16 м (рисунок 3.22). Электроды были сделаны из медного провода диаметром 3 мм и закапывались в грунт на глубину 0,3 м. Эксперименты проводились при двух амплитудах импульсного напряжения 210 и 360 кВ [20].

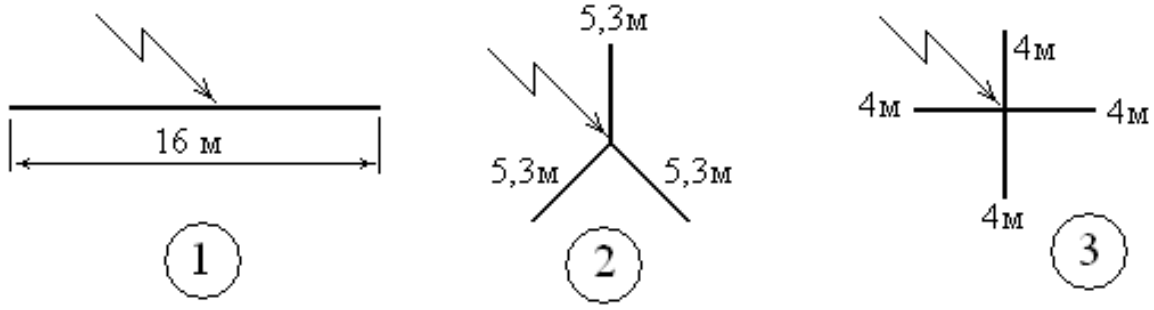


Рисунок 3.22 – Модели заземлителей [20]

Результаты, полученные в ходе данной серии экспериментов, приведены в таблице 3.4. Как видно из таблицы, увеличение количества лучей приводит к росту минимального импульсного сопротивления: при 210 кВ – с 120 до 130 Ом, при 360 кВ – с 100 до 115 Ом. Это можно объяснить взаимным экранированием электродов, при сближении лучей их искровые зоны перекрываются, в результате чего снижается эффективность растекания тока. Таким образом наиболее эффективно с точки зрения грозозащиты выполняют свои функции заземлители, состоящие из минимального количества лучей.

Таблица 3.4 – Импульсное сопротивление многолучевых заземлителей [16]

Число лучей	$R_{мин}$ (U=210 кВ), Ом	$R_{мин}$ (U=360 кВ), Ом
2	120	100
3	125	105
4	130	115

Для исследования распределения потенциалов вокруг заземлителей использовалась зондовая система, состоящая из двух измерительных зондов, размещаемых на различных расстояниях от электрода [22, 66]. Измерения проводились для полусферического электрода диаметром 140 мм при напряжении 160 кВ. На рисунке 3.23 приведены совмещенные осциллограммы потенциалов грунта на различных расстояниях от электрода.

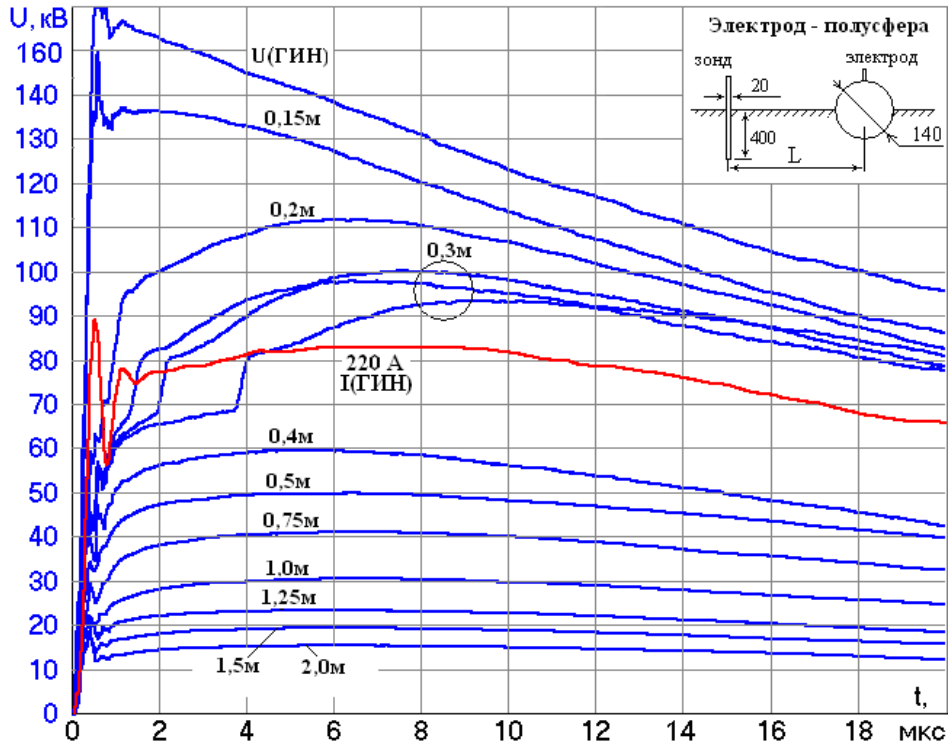


Рисунок 3.23 – Совмещенные осциллограммы измеренных потенциалов грунта в зависимости от расстояния до полусферического электрода [16]

При расстоянии 0,2 м через 0,5 мкс после подачи импульса наблюдается резкий излом кривой потенциала, что свидетельствует о пробое грунта и формировании искрового канала до зонда. При расстоянии 0,4 м и более потенциал изменяется плавно, так как эти точки находятся вне зоны искровых каналов.

На рисунке 3.24 представлено распределение максимального потенциала в грунте в зависимости от расстояния до электрода. Для сравнения приведены расчетные значения, полученные в программе FEMM без учета ионизации. Экспериментальные значения потенциала значительно ниже расчетных в ближней зоне (до 2 м), что объясняется развитием искровых каналов, снижающих эффективное удельное сопротивление грунта. При расстояниях более 2 м экспериментальные и расчетные значения сближаются, так как влияние искровых каналов ослабевает.

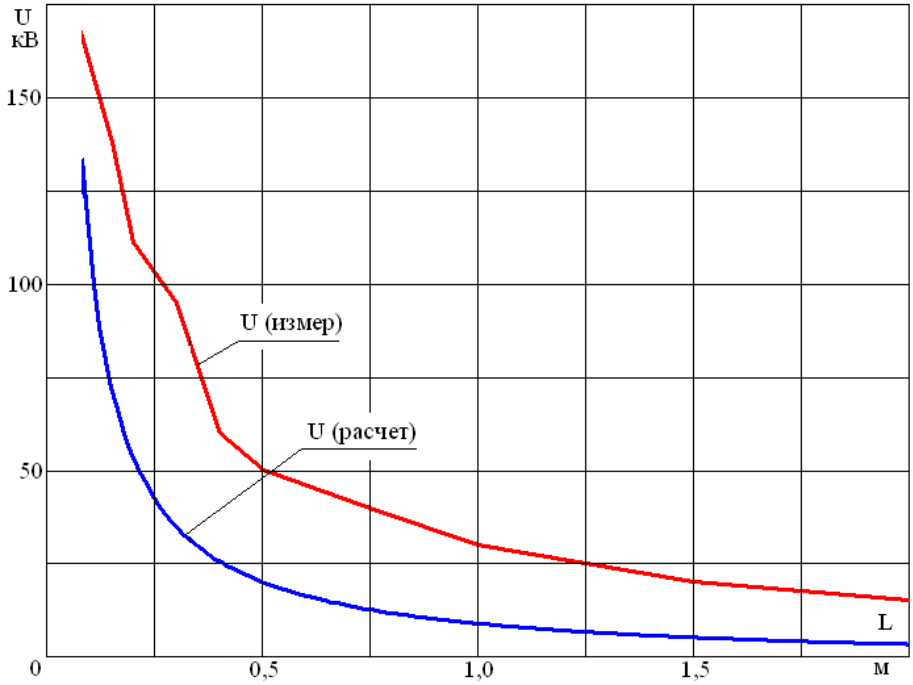


Рисунок 3.24 – Распределение потенциала в грунте [16]

3.4 Выводы по главе 3

По результатам экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Установлено, что снижение импульсного сопротивления электродов в высокоомном увлажненном песке (ρ = 1000-1500 Ом·м) зависит не только от амплитуды, но и длительности импульса напряжения. При увеличении длительности импульса сопротивление дискового электрода снижалось с 1100 до 530 Ом (в 2,1 раза), при увеличении амплитуды на 12 кВ – с 700 до 500 Ом (в 1,4 раза). Существенное

влияние длительности импульса на импульсное сопротивление говорит о том, что процессы ионизации и искрообразования достаточно медленные и на их развитие требуется некоторое время.

Для сферического электрода (однородное поле) характерно наличие временной задержки начала искрообразования (2,5-5 мкс), для электродов с резконеоднородным полем (диск, уголок) искрообразование начинается при меньших амплитудах и протекает более интенсивно.

Получены вольт-амперные характеристики увлажненного грунта, имеющие ярко выраженный гистерезис, что подтверждает нелинейный характер искровых процессов.

2. Разработанный методики оптической регистрации искровых каналов в объеме грунта позволили впервые получить фотографии плазменных каналов для дискового и уголкового электродов. Установлено, что характер искрообразования зависит от влажности грунта. При влажности 10 % развивается факельный разряд с объемным свечением; при влажности 20 % формируются локализованные каналы с четкими границами. Увеличение амплитуды и длительности импульса приводит к росту количества каналов, их длины и яркости.

3. Эксперименты на сосредоточенных электродах показали, что при одинаковой площади поверхности (1818 см²) полусферический электрод имеет наибольший коэффициент снижения сопротивления (K = 5,0), а стержневой – наименьший (K = 3,41). Это объясняется тем, что при равной площади у полусферы напряженность электрического поля одинаковая вокруг всего электрода и ионизация развивается равномерно по всей поверхности. Скорость снижения сопротивления также зависит от геометрии: минимум достигается быстрее у стержня (8-10 мкс), медленнее у полусферы (15-20 мкс).

Для протяженных горизонтальных заземлителей установлено, что при длине 6 м и более диаметр электрода практически не влияет на импульсное сопротивление ($R_{мин}$ = 180-200 Ом), тогда как при длине 2 м влияние диаметра заметно ($R_{мин}$ = 290-460 Ом). Снижение сопротивления у протяженных электродов происходит в 1,5-2 раза быстрее, чем у сосредоточенных.

Эксперименты на многолучевых электродах показали, что увеличение числа лучей с 2 до 4 при фиксированной суммарной длине приводит к росту импульсного сопротивления на 8-15 % из-за взаимного экранирования искровых зон.

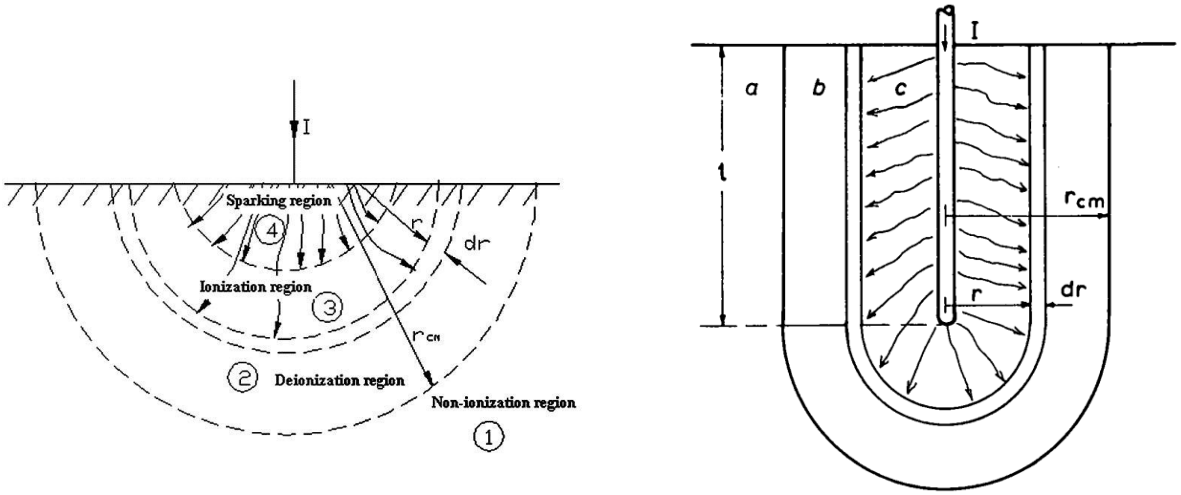
Экспериментальные значения распределения потенциалов в грунте в ближней зоне электрода значительно ниже расчетных, что объясняется развитием искровых каналов, снижающих удельное сопротивление грунта.

4. В лабораторных условиях определена скорость роста искровых каналов в зависимости от напряжения и расстояния. Установлено, что скорость увеличивается с ростом напряжения: при U = 38 кВ – 7-13 мм/мкс, при U = 42 кВ – 12-21 мм/мкс, при U = 50 кВ достигает 29 мм/мкс. Вероятность захвата канала зондом возрастает с увеличением напряжения.

ГЛАВА 4 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИМПУЛЬСНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДА

4.1 Обоснование предлагаемого подхода

В разделе 1.4 проведен анализ работы отечественных и зарубежных авторов, посвященных математическим моделям импульсного сопротивления заземлителей. Общим для большинства этих моделей является фундаментальное допущение о формировании вокруг электрода сплошной симметричной искровой зоны (рисунок 4.1). Это допущение возникло в ранних экспериментальных работ, в которых отсутствовала возможность прямого наблюдения процессов в объеме грунта, и закрепилось в теоретических разработках, начиная с классических исследований Bellaschi [48], продолженных в работах Liew и Darveniza [72], Sekioka [93], Cooray [51] и многих других.



а б

Рисунок 4.1 – Сравнение моделей искрообразования:
а – Liew и Darveniza [72], б – Sekioka [93]

Согласно этому допущению, при превышении критической напряженности электрического поля в приэлектродной области происходит ионизация грунта, его проводимость резко возрастает, а зона ионизации расширяется симметрично во все стороны, образуя проводящий чехол [11]. В рамках такого подхода снижение сопротивления электрода объясняется увеличением его эффективного радиуса, после чего сопротивление рассчитывается по классическим формулам для уединенного электрода с подстановкой эквивалентного радиуса $r_э$ вместо геометрического r_0. Различия между моделями касаются главным образом способа определения $r_э$ (через

критическую напряженность поля, через энергетический баланс, через ток ионизации) и учета динамики процесса (инерционность ионизации, гистерезис). Однако все они постулируют симметричное и сплошное развитие искровой зоны.

Это предположение, несмотря на его широкое распространение, никогда не имело прямого экспериментального подтверждения. Более того, отдельные косвенные данные указывали на его ограниченность. Так, в работах Рябковой [33] с помощью фиксации на фотобумаге были получены изображения, свидетельствующие о несимметричности искровой зоны и наличии отдельных каналов. Однако отсутствие оптических методов регистрации в объеме грунта не позволяло сделать однозначных выводов о структуре искрообразования. В результате допущение о сплошной зоне продолжало использоваться в моделях как единственно возможное упрощение, позволяющее получить аналитические выражения для сопротивления.

Разработанная в рамках настоящей диссертации методика оптической регистрации искровых каналов в объеме грунта (глава 2) позволила получить визуальные данные о структуре искрообразования. Экспериментальные исследования, выполненные в главе 3, показали, что реальная картина искрообразования принципиально иная, чем предполагается в классических моделях. На фотографиях, полученных для дискового и уголкового электродов (рисунок 4.2), отчетливо видно, что искровые каналы развиваются не симметрично, а преимущественно от острых кромок и торцов электрода, где плотность тока и напряженность поля имеют наибольшие значения. Искровые процессы представляют собой отдельные плазменные образования, а не сплошную проводящую область. Каналы могут распространяться в объеме грунта на значительные расстояния, достигая при больших длительностях импульса десятки миллиметров. Причем их количество, длина и яркость зависят от амплитуды и длительности импульса, а также от влажности грунта.

Важно отметить, что при влажности 20 % каналы имеют четкие границы и развиваются в виде отдельных нитей, а при влажности 10 % наблюдается факельный разряд с объемным свечением. Однако ни в одном из экспериментов не наблюдалось формирование сплошной симметричной зоны, как описано в классических моделях.



Рисунок 4.2 – Фотография процессов искрообразования вокруг электродов в виде диска и уголка [53, 19]

В классических моделях снижение сопротивления определяется увеличением эффективного радиуса электрода, и сопротивление описывается выражением вида (формула 4.1):

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{r_Э}{r_0} \tag{4.1}$$

где ρ – удельное сопротивление грунта, Ом·м;

L – длина электрода, м;

$r_Э$ – эффективный радиус электрода, м;

r_0 – радиус электрода, м.

При развитии искровых каналов от торцов электрода механизм снижения сопротивления иной. Плазменные каналы, имея высокую проводимость (на несколько порядков выше проводимости окружающего грунта), фактически увеличивают длину электрода. Ток, стекающий с заземлителя в грунт, распределяется по каналам, которые эффективно увеличивают длину электрода [17]. Сопротивление в этом случае определяется не радиусом зоны ионизации, а суммарной длиной, складывающейся из геометрической длины электрода и протяженности искровых каналов. Разработанная модель основана на этом физическом представлении и учитывает характер искрообразования, динамику развития каналов во времени, стадии ионизации и деионизации, а также зависимость длины каналов от параметров импульсного воздействия и свойств грунта.

4.2 Математическое описание модели и верификация

Полученные экспериментальные данные показали, что искрообразование в грунте имеет канальный характер. Поэтому для описания импульсного сопротивления предлагается рассматривать искровые каналы не как увеличение радиуса электрода, а как его эквивалентное удлинение. Такой подход и положен в основу модели, описанной ниже. Основные допущения предлагаемой модели:

1. Удельное сопротивление плазмы в искровом канале пренебрежимо мало по сравнению с удельным сопротивлением грунта, поэтому канал рассматривается как идеальный проводник.

2. Искровые каналы развиваются преимущественно с торца электрода (для вертикальных и горизонтальных стержней) или с острых кромок (для уголковых электродов) [17]. В модели это учитывается введением эквивалентной длины, складывающейся из геометрической длины электрода и суммарной протяженности искровых каналов.

3. Развитие каналов во времени имеет инерционный характер: на стадии нарастания тока их длина увеличивается по экспоненциальному закону, на стадии спада – уменьшается.

4. Влияние каналов на распределение тока в грунте учитывается через изменение граничных условий при решении уравнения для потенциала.

Предполагается, что у стенок искрового канала происходит растекание тока, т.е. также формируется распухающий чехол, проходящий те же стадии, что и вокруг самого подземного проводника [11]. Для теоретического представления такой модели представим схематически искровые процессы, как показано на рисунке 4.3.

Рассмотрим вертикальный электрод длиной L и радиусом r0, погруженный в однородный грунт с удельным сопротивлением ρ. Ток I стекает с электрода в грунт. Для определения сопротивления растеканию необходимо найти распределение потенциала в грунте.

Поле вокруг вертикального электрода не является строго цилиндрическим из-за наличия торца. Однако для инженерных расчетов часто используют приближение, при котором ток считается стекающим равномерно с боковой поверхности цилиндра. При таком допущении линии тока направлены радиально от оси электрода, а эквипотенциальные поверхности представляют собой коаксиальные цилиндры.

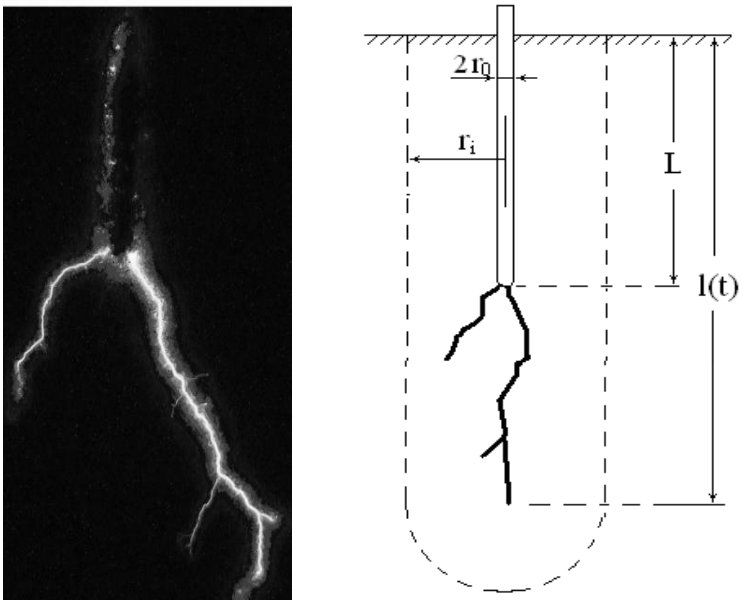


Рисунок 4.3 – Искрообразование и ионизация вокруг вертикального электрода в грунте [11]

Выделим цилиндрический слой грунта радиусом r и толщиной dr. Площадь боковой поверхности этого слоя (через которую проходит ток) складывается из площади боковой поверхности цилиндра 2πrL и площади двух торцевых поверхностей (верхней и нижней) 2πr². Однако для вертикального электрода, заглубленного в грунт, стекание с торца также происходит, поэтому полная площадь поверхности, через которую протекает ток на радиусе r, составляет (формула 4.2):

$$S(r) = 2\pi rL + 2\pi r^2 = 2\pi r(L + r) \tag{4.2}$$

где L – длина электрода, м;

r – радиус электрода, м.

Плотность тока на этом радиусе (формула 4.3):

$$j(r) = \frac{I}{S(r)} = \frac{I}{2\pi r(L + r)} \tag{4.3}$$

где $S(r)$ – площадь поверхности, м^2;

L – длина электрода, м;

r – радиус электрода, м.

По закону Ома в дифференциальной форме падение напряжения на слое dr равно (формула 4.4):

$$dU = j(r) \cdot \rho \cdot dr = \frac{I \cdot \rho}{2\pi r(L + r)} dr \tag{4.4}$$

где $j(r)$ – плотность тока, А/м^2;

ρ – удельное сопротивление грунта, Ом·м;

I – ток, А;

L – длина электрода, м;

r – радиус электрода, м.

Полное напряжение между электродом и удаленной землей (принимаем потенциал земли за ноль) получается интегрированием от поверхности электрода r_0 до бесконечности (формула 4.5):

$$U = \int_{r_0}^{\infty} \frac{I \cdot \rho}{2\pi r(L + r)} dr \tag{4.5}$$

где ρ – удельное сопротивление грунта, Ом·м;

I – ток, А;

L – длина электрода, м;

r – радиус электрода, м.

Отсюда сопротивление вертикального электрода при напряженности электрического поля ниже критического (формула 4.6) [17]:

$$R = \int_{r_0}^{\infty} \frac{\rho dr}{2\pi r^2 + 2\pi rL} \tag{4.6}$$

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.

На стадии нарастания тока, когда $0 \le t \le t_m$, изменение сопротивления можно описать уравнением (формула 4.7) [17]:

$$R(t) = \int_{r_0}^{r_i} \frac{\rho_0 e^{-t/\tau_1} dr}{2\pi \cdot r^2 + 2\pi \cdot r \cdot l(t)} + \int_{r_i}^{\infty} \frac{\rho_0 dr}{2\pi \cdot r^2 + 2\pi \cdot r \cdot l(t)} \tag{4.7}$$

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 (формула 4.8) [23]:

$$l(t) = L + nM(1 - e^{-\alpha \cdot t/\tau_m}) \tag{4.8}$$

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.

При $t \succ \tau_m$, наступает стадия затухания тока, и сопротивление электрода определяется уравнением (формула 4.9) [11]:

$$R(t,r) = \int_{r_0}^{r_i} \frac{\rho_0(1 - e^{-t/\tau_2})dr}{2\pi \cdot r^2 + 2\pi \cdot r \cdot l(t)} + \int_{r_i}^{\infty} \frac{\rho_0 dr}{2\pi \cdot r^2 + 2\pi \cdot r \cdot l(t)} \tag{4.9}$$

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 (формула 4.10) [11]:

$$l(t) = L + nM \cdot e^{-\beta \cdot t/\tau_m} \tag{4.10}$$

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.

Таким образом, система уравнений (4.6)–(4.10) полностью определяет динамику импульсного сопротивления электрода в процессе развития и затухания искровых каналов [11].

Параметры модели определяются из экспериментальных данных, полученных в главе 3. Вопросом при расчете сопротивлений подземных проводников по предложенной модели является определение радиуса зоны ионизации в стадиях нарастания и затухания тока, а также значение максимальной длины искровых каналов [11]. Из рисунка 4 видно, что обычно возникает несколько искровых каналов, а диаметр каждого канала меньше чем диаметр электрода. При этом можно сделать допущение, что сумма всех искровых каналов nM образует канал такого же диаметра, как и электрод, тогда остается только определить длину данного канала.

Напряженность электрического поля вокруг вертикального электрода (формула 4.11) [11]:

$$E = \frac{\rho \cdot I}{2\pi \cdot r^2 + 2\pi \cdot r \cdot l} \tag{4.11}$$

где ρ – удельное сопротивление грунта, Ом·м;

I – ток, А;

l – длина электрода, м;

r – радиус электрода, м.

Из данной формулы, зная критическое значение электрического поля и значение максимального тока, можно определить длину l, которая и будет являться суммой длин электрода и всех каналов [11]. Из этой же формулы можно определить значение радиуса зоны ионизации. Оставшиеся коэффициенты определяются эмпирическим путем при сравнении с экспериментальными данными.

Для проверки адекватности предложенной математической модели проведено сравнение расчетных данных с результатами экспериментальных исследований [11]. Верификация выполнена для вертикального электрода диаметром 6 мм и длиной 70 мм, погруженного в грунт с удельным сопротивлением ρ = 1000 Ом·м. Импульсное воздействие осуществлялось напряжением амплитудой 30 кВ с длительностью фронта 1 мкс и длительностью импульса до спада на половину амплитуды 32 мкс.

На рисунке 4.4 представлены осциллограммы напряжения $U(t)$, тока $I(t)$ и расчетного динамического сопротивления $R(t) = U(t) / I(t)$, полученные в ходе эксперимента [11]. Видно, что в начальный момент времени сопротивление электрода

составляет около 3 кОм, что соответствует стационарному значению. При достижении током значения, соответствующего критической плотности тока, начинается развитие искровых каналов, и сопротивление начинает снижаться. Минимальное сопротивление (около 1,1 кОм) достигается через 20 мкс после начала импульса, после чего сопротивление постепенно восстанавливается.

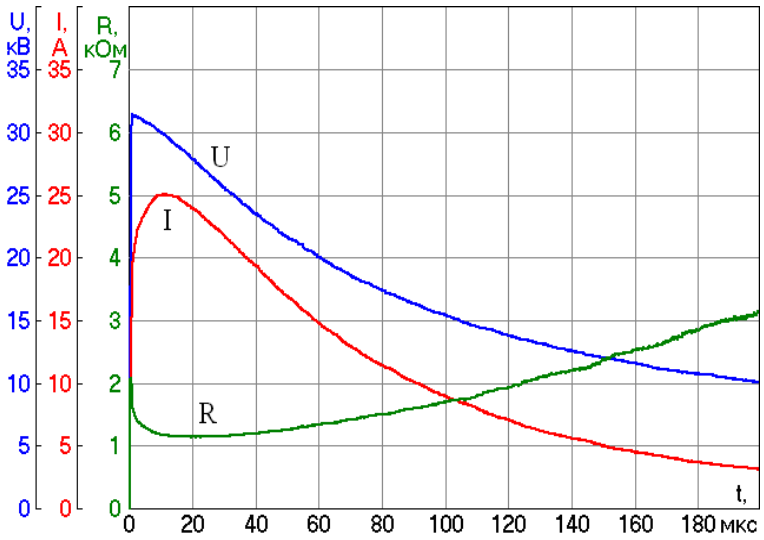
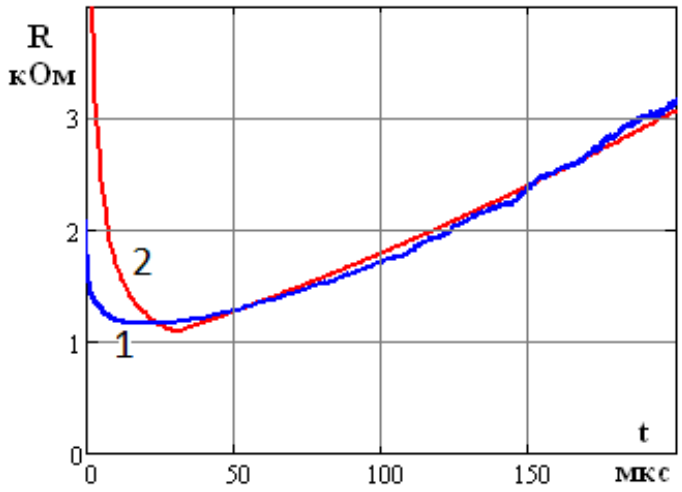


Рисунок 4.4 – Кривые напряжения, тока и динамического сопротивления [11]

На рисунке 4.5 приведено сравнение экспериментальной кривой сопротивления (кривая 1) с результатами расчета по предложенной модели (кривая 2) [11].



1 – экспериментальные данные, 2 – результаты моделирования

Рисунок 4.5 – Кривые динамического сопротивления сосредоточенного электрода [11]

Как видно из рисунка, расчетная кривая хорошо согласуется с экспериментальными данными [11]. На участке минимума сопротивления ($t \approx 20–30$ мкс) расхождение не превышает 5 %. На фронте импульса ($t < 20$ мкс) расчетное сопротивление несколько завышено, что объясняется тем, что в модели не учитываются

емкостные процессы, возникающие в измерительной цепи и в самом электроде в начальный момент времени. На спаде импульса (t > 30 мкс) расчетные и экспериментальные значения также хорошо согласуются.

Таким образом, предложенная модель адекватно описывает динамику импульсного сопротивления вертикального электрода в условиях развития искровых каналов и может быть использована для инженерных расчетов заземляющих устройств.

4.3 Выводы по главе 4

По результатам разработки и верификации математической модели импульсного сопротивления электрода можно сформулировать следующие основные выводы.

1. На основе экспериментально установленного в главе 3 контрагированного (канального) характера искрообразования предложен новый подход к математическому описанию процесса, в котором искровая зона рассматривается не как сплошная проводящая область, а как эквивалентное увеличение длины электрода за счет развития плазменных каналов от острых кромок и торца электрода.

2. Разработана математическая модель, включающая:

– выражение для эквивалентной длины электрода с учетом количества и длины искровых каналов;

– классическую формулу сопротивления для вертикального электрода при отсутствии ионизации;

– уравнения динамики сопротивления на стадиях нарастания и спада тока;

– зависимости длины каналов от времени;

– выражение для определения радиуса зоны ионизации через критическую напряженность поля.

3. Параметры модели определены из экспериментальных данных, полученных в главе 3.

4. Верификация модели показала хорошее согласие расчетных и экспериментальных данных. На участке минимума сопротивления расхождение не превышает 5 %, на фронте импульса – 12 % (обусловлено неучетом емкостных процессов в измерительной цепи). Это подтверждает адекватность модели и возможность ее использования для инженерных расчетов.

5. Предложенная модель, в отличие от классических подходов, учитывает реальную геометрию искрообразования и позволяет более достоверно описывать

динамику импульсного сопротивления электродов в высокоомных грунтах. Она может быть использована при проектировании заземляющих устройств, особенно в регионах с высоким удельным сопротивлением грунта, где эффект искрообразования играет определяющую роль.

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 (Rмин = 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анненков, В.З. Искрообразование в земле вокруг заземлителей молниезащиты / В.З. Анненков // Электричество. – 1993. – № 12. – С. 15-20.

2. Анненков, В.З. Способ расчета импульсного сопротивления стержневого заземлителя / В.З. Анненков // Электричество. – 2012. – № 1. – С. 54-58

3. Базелян, Э.М. Физика молнии и молниезащиты / Э.М. Базелян, Ю.П. Райзер. – М.: Физматлит, 2001. – 320 с.

4. Базелян, Э.М. Развитие импульсного разряда вдоль поверхностей воды и грунта / Э.М. Базелян, А.В. Хлапов, А.В. Шкилев // Электричество. – №9, 1992. – с. 19-23.

5. Вайнер, А.Л. Импульсные характеристики сложных заземлений / А.Л. Вайнер // Электричество. – 1966. – № 3. – С. 23-26.

6. Вайнер, А.Л. Методика расчета и проектирования сложных грозозащитных заземляющих устройств / А.Л. Вайнер, С.М. Фертик // Электричество. – 1956. – № 8. – С. 40-46.

7. Василяк, Л.М. Нелинейное растекание импульсного тока и электрический пробой в грунте / Л. М. Василяк, С. П. Ветчинин, В. А. Панов [и др.] // Теплофизика высоких температур. – 2014. – Т. 52, № 6. – С. 825. – DOI 10.7868/S0040364414060180.

8. Василяк, Л.М. Электрический пробой при растекании импульсного тока в песке / Л. М. Василяк, С. П. Ветчинин, В. А. Панов [и др.] // Прикладная физика. – 2014. – № 4. – С. 20-25.

9. Данилин, А.Н. Зондовые измерения процессов растекания импульсных токов в увлажненном грунте / А.Н. Данилин, В.В. Ивонин // Труды Кольского научного центра РАН. – 2014. – № 7 (26). – С. 31–35.

10. Данилин, А.Н. Высоковольтный полигон для исследования процессов искрообразования в грунтах при стекании больших импульсных токов с заземлителей / А.Н. Данилин, В.В. Ивонин // Труды Кольского научного центра РАН. – 2014. – № 7(26). – С. 26-30.

11. Данилин, А.Н. Динамическая модель импульсного сопротивления сосредоточенных электродов / А.Н. Данилин, В.В. Ивонин // Труды Кольского научного центра РАН. – 2016. – № 5-13(39). – С. 18-24.

12. Данилин, А.Н. Лабораторные исследования процессов искрообразования в увлажненном грунте в зависимости от амплитуды и длительности импульсного напряжения на заземленном устройстве / А.Н. Данилин, В.В. Ивонин, Д.В. Куклин // Труды Кольского научного центра РАН. – 2013. – № 4(17). – С. 38-55.

13. Данилин, А.Н. Оптические исследования высоковольтных импульсных процессов на поверхности проводников в грунте / А.Н. Данилин, В.В. Ивонин // Труды Кольского научного центра РАН. – 2015. – № 2(28). – С. 40-44.

14. Данилин, А.Н. Оценка корректности оптических наблюдений процессов искрообразования вокруг электродов, размещенных в увлажненном грунте / А.Н. Данилин, В.В. Ивонин // Труды Кольского научного центра РАН. – 2013. – № 4(17). – С. 32-37.

15. Данилин, А.Н. Развитие ионизационно-перегревной неустойчивости в грунтах / А.Н. Данилин, В.В. Ивонин // Труды Кольского научного центра РАН. – 2017. – Т. 8, № 1-14. – С. 7-12.

16. Данилин, А.Н. Экспериментальные исследования импульсных характеристик сосредоточенных заземлителей / А.Н. Данилин, В.В. Ивонин // Труды Кольского научного центра РАН. – 2014. – № 3(22). – С. 27-32.

17. Данилин, А.Н. Лабораторные исследования нелинейных входных сопротивлений заземлителей электроэнергетических устройств в условиях высокого удельного сопротивления грунта / А.Н. Данилин, В.Н. Селиванов, П.И. Прокопчук [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. – 2011. – № 2(5). – С. 39-54.

18. 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.

19. Ивонин, В.В. Ионизация грунта при растекании нелинейных импульсных токов с заземлителей / В.В. Ивонин // Электроэнергетика глазами молодежи : труды VI международной научно-технической конференции, Иваново, 09–13 ноября 2015 года / ответственный редактор: Тютиков В.В., д.т.н., профессор, проректор по научной работе ИГЭУ. Том 1. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2015. – С. 474-477.

20. Ивонин, В.В. Исследование импульсных сопротивлений электродов различных типов с одинаковой площадью поверхности / В.В. Ивонин // Труды Кольского научного центра РАН. – 2018. – Т. 9, № 8(17). – С. 122-126. – DOI 10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.8.122-126.

21. Ивонин, В.В. Исследование нелинейных процессов в грунтах при воздействии импульсов напряжения с крутыми фронтами / В.В. Ивонин // Труды Кольского научного центра РАН. – 2018. – Т. 9, № 3-16. – С. 24-29. – DOI 10.25702/KSC.2307-5252.2018.16.3.24-29.

22. Ивонин, В.В. Исследование распределения потенциалов на поверхности грунта вокруг протяженного заземлителя / В.В. Ивонин, А.Н. Данилин // Труды Кольского научного центра РАН. – 2015. – № 8(34). – С. 5-8.

23. Ивонин, В.В. Математическая модель импульсного сопротивления вертикального заземлителя / В.В. Ивонин // Электроэнергетика глазами молодежи - 2017 : Материалы VIII Международной научно-технической конференции, Самара, 02–06 октября 2017 года. Том 1. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2017. – С. 120-123.

24. Ивонин, В.В. Моделирование искровых процессов в грунтах вокруг сосредоточенных заземлителей / В.В. Ивонин // Электроэнергетика глазами молодежи - 2016 : Материалы VII Международной молодёжной научно-технической конференции. В 3-х томах, Казань, 19–23 сентября 2016 года. Том I. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2016. – С. 143-146.

25. Ивонин, В.В. Нелинейные процессы в грунтах при стекании импульсных токов с заземлителей / В.В. Ивонин, А.Н. Данилин // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. – 2017. – № 14. – С. 357-360.

26. Ивонин, В.В. Оптические изображения искровых каналов при растекании импульсных токов в грунте / В.В. Ивонин, А.Н. Данилин, Б.В. Ефимов [и др.] // Успехи прикладной физики. – 2016. – Т. 4, № 4. – С. 355-361.

27. Ивонин, В.В. Распределение потенциалов в плохо проводящих грунтах вокруг протяженных 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.

28. Корсунцев, А.В. Применение теории подобия к расчету импульсных характеристик сосредоточенных заземлителей / А.В. Корсунцев // Электричество. – 1958. – № 5. – С. 31-35.

29. Костенко, М.В. Перенапряжения и защита от них в воздушных и кабельных передачах высокого напряжения / М.В. Костенко, К.П. Кадомская, М.Л. Левинштейн, И.А. Ефремов. – Л.: Наука, 1988. – 302 с.

30. Марголин, Н.Ф. Токи в земле / Н. Ф. Марголин, д-р техн. наук. – Москва ; Ленинград : изд-во и тип. Госэнергоиздата, 1947 (Москва : 13-я тип. Огиз'а). – 195 с.

31. Новикова, А.Н. Вопросы грозозащиты воздушных линий в условиях севера Кольского полуострова: требования, опыт эксплуатации ВЛ 110-150 кВ, методика расчета / А. Н. Новикова, О. В. Шмараго, Б. В. Ефимов [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. – 2011. – № 2(5). – С. 9-23.

32. Правила устройства электроустановок. – 7-е изд. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003.

33. Рябкова, Е.Я. Заземления в установках высокого напряжения / Е.Я. Рябкова. – М.: Энергия, 1978. – 226 с.

34. 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.

35. Смирнов, И.Н. Модели и методы расчета заземлителей в грунте с частотно и токозависимыми параметрами: диссертация ... кандидата технических наук : 2.4.1. / Смирнов Иван Николаевич; [Место защиты: ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» ; Диссовет У.2.4.1.39]. - Вологда, 2024. - 105 с. : ил.

36. Шишигин, С.Л. Расчет заземлителей с учетом ионизации и частотных свойств грунта / С.Л. Шишигин, Д.С. Шишигин, И.Н. Смирнов // Известия РАН. Энергетика. – 2022. – № 6. – С. 46-63. – DOI: 10.31857/S0002331022060024.

37. Abdul Ali, A.W. On the Characterisations of the Impulse Breakdown in High Resistivity Soils by Field Testing / A.W. Abdul Ali, N.M. Nor // Energies. – 2021. – № 14. – 2401. https://doi.org/10.3390/en14092401.

38. Ahmeda, M. Earthing performance of transmission line towers / M. Ahmeda. – PhD thesis. – Cardiff : Cardiff University. – 2012. – 176 p.

39. Ala, G. Soil Ionization Due to High Pulse Transient Currents Leaked by Earth Electrodes / G.Ala, M.L.D. Silvestre, F. Viola, E. Francomano // Progress In Electromagnetics Research B. – Vol. 14. – 2009. – Pp. 1-21. doi:10.2528/PIERB09022103.

40. Ala, G. Soil ionization in earth electrodes by a finite difference time domain scheme / G. Ala, F. Viola // 2004 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (IEEE Cat. No.04CH37559), Silicon Valley, CA, USA. – 2004. – Vol.3. – pp. 850-855. doi: 10.1109/ISEMC.2004.1349934.

41. Armstrong, H.R. Grounding electrode characteristics from model tests / H.R. Armstrong // AIEE Trans. – 1953. – № 72 (2). – pp. 1301–1306.

42. Asaoka, Y. Development of calculation model for grounding resistance of rod electrodes exposed to large lightning impulse current / Y. Asaoka, H. Motoyama, H. Mathubara // Proc. 28th Int. Conf. Lightning Protection, Kawazawa, Japan. – 2006. – pp. 692-697.

43. Asaoka, Y. Development of grounding resistance analysis model of rod electrode considering the effect of large-current characteristic for distribution lines (in Japanese) / Y. Asaoka, H. Motoyama, H. Matsubara, H. Sugimoto // IEEE Trans. PowerEnergy/ – 2005. – № 125. – pp. 979-987.

44. Asimakopoulou, F.E. Methodologies for determination of soil ionization gradient / F.E. Asimakopoulou, I.F. Gonos, I.A. Stathopulos // Journal of Electrostatics. – 2012. – Vol. 70, Issue 5. – P. 457–461. – DOI: 10.1016/j.elstat.2012.07.003.

45. Asimakopoulou, F.E. Estimation of uncertainty regarding soil breakdown parameters / F.E. Asimakopoulou, I.F. Gonos, I.A. Stathopulos // IET Sci.Meas. Technol. – 2011. – № 5 (1). – pp. 14-20.

46. Asimakopoulou, F.E. I-V curves for the determination of the ionization voltage in soil samples / F.E. Asimakopoulou, I.F. Gonos, I.A. Stathopulos // Proc. 17th Int. Symp. High Voltage Engineering, Hannover, Germany. – 2011.

47. Bellaschi, P. L. Impulse and 60-cycle characteristics of driven grounds / P.L. Bellaschi // AIEE Transactions. – 1941. – vol. 60. – pp. 123-128.

48. Bellaschi, P.L. Impulse and 60-Cycle Characteristics of Driven Grounds-II / P.L. Bellaschi, R.E. Armington, A.E. Snowden // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. – 1942. – Vol. 61. – № 6. – P. 349-363.

49. Cassie, A.M. Arc Rupture and Circuit Severity: A New Theory / A.M. Cassie. – CIGRE, Paris, France, Report no. 102. – 1939.

50. Cooray, V. Lightning Protection / V. Cooray. – London: IET. – 2010. – 1056 p.

51. Cooray, V. Physical model of surge current characteristics of buried vertical rods in the presence of soil ionization / V. Cooray, M. Zitnik, M. Manyahi, R. Montano, M. Rahman, Y. Liu // Journal of Electrostatics. – Vol. 60. – No. 2-4. – 2004. – pp. 193-202. doi:10.1016/j.elstat.2004.01.017.

52. Dick, W.K. Impulse and alternating current tests on grounding electrodes in soil environment / W.K. Dick, H.R. Holliday // IEEE Trans. Power Syst. PAS. – № 97 (1). – 1978. – pp. 102-108.

53. 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.

54. Espel, P. Electrical parameters associated with discharges in resistive soils / P. Espel, R.R. Diaz, A. Bonamy, J.N. Silva // IEEE Trans. Power Del. – № 19 (3). – 2004. – pp. 1174-1182.

55. Flanagan, T.M. Electrical Breakdown Characteristics of Soil / T.M. Flanagan, C. E. Mallon, R. Denson, I. Smith // IEEE Trans. Nucl. Sci. – Vol. NS-29. – No.6. – pp. 1887-1890. – 1982.

56. Flanagan, T.M. Electrical breakdown properties of soil / T.M. Flanagan, C.E. Mallon, R. Denson, R.E. Leadon // IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-28 (6). – 1981. –pp. 4432-4439.

57. Gazzana, D.S. The Transmission Line Modeling Method to Represent the Soil Ionization Phenomenon in Grounding Systems / D.S. Gazzana, A.S. Bretas, G.A.D. Dias, M. Telló, D.W.P.Thomas, C. Christopoulos // IEEE Transactions on Magnetics. – vol. 50. – №. 2. – pp. 505-508. – 2014. doi: 10.1109/TMAG.2013.2283714.

58. Geri, A. Behaviour of grounding systems excited by high impulse currents: the model and its validation / A. Geri // IEEE Transactions on Power Delivery. – vol. 14. – № 3. – pp. 1008-1017. – 1999. doi: 10.1109/61.772347.

59. Geri, A. Non-linear behaviour of ground electrodes under lightning surge currents: computer modelling and comparison with experimental results / A. Geri, G.M. Veca, E. Garbagnati, G. Sartorio // IEEE Transactions on Magnetics. – vol. 28. – № 2. – pp. 1442-1445. – 1992. doi: 10.1109/20.123966.

60. Harid, N. On the Analysis of Impulse Test Results on Grounding Systems / N. Harid, H. Griffiths, S. Mousa, D. Clark, S. Robson, A. Haddad // IEEE Transactions on Industry Applications. – vol. 51. – № 6. – pp. 5324-5334. – 2015. doi: 10.1109/TIA.2015.2442517.

61. Hasan, H. Characterization of horizontal earth electrodes: Variable frequency and impulse responses / H. Hasan, H. Hamzehbahmani, S. Robson, H. Griffiths, D. Clark, A. Haddad // 2015 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Stoke on Trent, UK. – 2015. – pp. 1-5. doi: 10.1109/UPEC.2015.7339970.

62. He, J. Soil Ionization Phenomenon Around Grounding Electrode under Lightning Impulse / J. He, Y. Gao, R. Zeng, B. Zhang, X. Liang // Proc. VIII Int. Symp. Lightning Protection, Brazil. – 2005.

63. He, J. Experimental Studies of Impulse Breakdown Delay Characteristics of Soil / J. He, B. Zhang, R. Zeng, B. Zhang // IEEE Transactions on Power Delivery. – vol. 26. – № 3. – pp. 1600-1607. – 2011. doi: 10.1109/TPWRD.2011.2140403.

64. IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System / in IEEE Std 81-2012 (Revision of IEEE Std 81-1983). –pp.1-86. – 2012. doi: 10.1109/IEEESTD.2012.6392181.

65. Ivonin, V.V. Experimental Investigation of Impulse Resistance of Different Type Grounding Electrodes / V.V. Ivonin // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020, Vladivostok, 06–09 октября 2020 года. – Vladivostok, 2020. – P. 9271586. – DOI 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271586

66. Ivonin, V.V. Experimental Investigation of Potentials Distribution in High Resistivity Soil / V.V. Ivonin // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020, Vladivostok, 06–09 октября 2020 года. – Vladivostok, 2020. – P. 9271375. – DOI 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271375.

67. Ivonin, V.V. Influence of nonlinear processes in soils on the impulse resistance of grounding electrodes / V.V. Ivonin // Journal of Physics: Conference Series, Vladivostok,

07–08 октября 2021 года. – Vladivostok, 2021. – P. 012061. – DOI 10.1088/1742-6596/2096/1/012061.

68. Kalat, W. Implementation of the dynamic model of surge soil conduction for transient behaviour of grounding electrodes simulations using ATP of EMTP / W. Kalat, M. Loboda, Z.Pochanke // In 22nd International Conference on Lightning Protection Proceedings. – 1994. – pp. 1-6.

69. Kosztaluk, R. Experimental Study of Transient Ground Impedances / R. Kosztaluk, M. Loboda, D. Mukhedkar // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. – vol. PAS-100. – no. 11. – pp. 4653-4660. – 1981. doi: 10.1109/TPAS.1981.316807.

70. Lee, B.H. Analysis of soil ionization under impulse currents / B.H. Lee, G.H. Park, H.G. Kim, K.S. Lee // J. Elect. Eng. and Technol. – №4 (1). – 2009. – pp. 98-105.

71. Li, J. Numerical and Experimental Investigation of Grounding Electrode Impulse-Current Dispersal Regularity Considering the Transient Ionization Phenomenon / J. Li, T. Yuan, Q. Yang, W. Sima, C. Sun, M. Zahn // IEEE Transactions on Power Delivery. – vol. 26. – no. 4. – pp. 2647-2658. – 2011. doi: 10.1109/TPWRD.2011.2158860.

72. Liew, A.C. Dynamic model of impulse characteristics of concentrated earths / A.C. Liew, M. Darveniza // Proc. IEE. – 1974. – Vol. 121, No. 2. – P. 123-135.

73. Lima, J.L.C. Experimental developments on soil ionization / J.L.C. Lima, S. Visacro // Proc. Int. Conf. Grounding and Earthing & 3rd Int. Conf. Lightning Physics and Effects, Florianopolis, Brazil. – 2008. – pp. 174-179.

74. Liu, S. Visualization of the inner discharge of soil under impulse current and calculation of the ionization parameters / S. Liu, W. Sima, T. Yuan, D. Luo, Y. Bai, M. Yang // 33rd Int. Conf. Light. Prot. ICLP. – 2016. doi:10.1109/ICLP.2016.7791480.

75. Liu, Y.Q. The residual resistivity in soil ionization region around grounding system for different experimental results / Y.Q. Liu, N. Theethayi, R.M. Gonzalez, R. Thottappillil // Proceeding. IEEE Int. Symp. Electromagn. Compat. – Vol 2. – pp. 794-799. – 2003.

76. Loboda, M. On the transient characteristics of electrical discharges and ionization processes in soil / M. Loboda, V. Scuka // Proc. 23rd Int. Conf. Lightning Protection, Firenze, Italy. –1996. – pp. 539-544.

77. Loboda, M. Experimental study of electric properties of soil with impulse current injections / M. Loboda, Z. Pochanke //Proc. 18th Int. Conf. on Lightning Protection, Munich, Germany. – 1985. – pp. 191-198.

78. Lorentzou, M.I. Modeling of soil ionisation for lightning studies / M.I. Lorentzou, N.D. Hatziargyriou, B.C. Papadias, S. Sekioka // Proceedings of the 5th International Conference on Power Systems Transients (IPST). – Rio de Janeiro, Brazil. – 2001. – p. 555-560.

79. Manna, T.K. Generalized equation of soil critical electric field Ec based on impulse tests and measured soil electrical parameters / T.K. Manna, P. Chowdhury // IET Gener. Transm. Distrib. – № 1 (5). – 2007. – 811-817.

80. Mayr, O. Beitrage zur theorie des statschen und des dynamischen lichtbogens / O. Mayr // Arch. fur Elektrotechnik. – vol. 37. – pp. 588-608. – 1943.

81. Mousa, A.M. Breakdown gradient of the soil under lightning discharge conditions / A.M. Mousa // Proc. Int. Aerospace and Ground Conf., Atlantic City, U.S.A. – 1992. – № 67. – pp. 1-12.

82. Nayel, M. Study Transient Impedance of Spherical Electrode Buried in the Ground / M. Nayel // Proceedings of the 14th International Middle East Power Systems Conference (MEPCON'10), Cairo University, Egypt, December 19-21. – 2010. – Paper ID 260.

83. Nicolopoulou, E.P. Comparison of circuit models for the simulation of soil ionization / E.P. Nicolopoulou, F.E. Asimakopoulou, I.F. Gonos, I.A. Stathopulos // International Conference on Lightning Protection (ICLP), Vienna, Austria. – 2012. – pp. 1-6. doi: 10.1109/ICLP.2012.6344371.

84. Nor, N.M. Determination of threshold electric field Ec of soil under high impulse currents / N.M. Nor, A. Haddad, H. Griffiths // IEEE Trans. Power Del – № 20 (3). – 2005. – 2108-2113.

85. Nor, N.M. Characterization of ionization phenomena in soils under fast impulses / N.M. Nor, A. Haddad, H. Griffiths // IEEE Transactions on Power Delivery. – vol. 21. – no. 1. – pp. 353-361. – 2006. doi: 10.1109/TPWRD.2005.852352.

86. Oettle, E.E. A new general estimation curve for predicting the impulse impedance of concentrated earth electrodes / E.E. Oettle // IEEE Trans. Power Del. –№ 3(4). – 1988. – pp. 2020-2029.

87. Oettle, E.E. The characteristics of electrical breakdown and ionization processes in soil / E.E. Oettle // Trans. SAIEE. – 1988. – pp. 63-70.

88. Otani, K. FDTD surge analysis of grounding electrodes considering soil ionization / K. Otani, Y. Baba, N. Nagaoka, A. Ametani, N. Itamoto // Electric Power Systems Research. – vol. 113. – 2014. – pp. 171-179. doi: 10.1016/j.epsr.2014.02.032.

89. 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.

90. Petropoulos, G.M. The high-voltage characteristics of earth resistances / G.M. Petropoulos // J. IEE. – №95. – 1948. – pp. 59-70.

91. Sekioka, S. Development of a nonlineargrounding resistance model for high impulse currents (in Japanese) / S. Sekioka, H. Hayashida, T. Hara, A. Ametani // Trans. IEE Japan. – № 118. –1998. – pp. 92-101.

92. Sekioka, S. Measurements of grounding resistances for high impulse currents / S. Sekioka, H. Hayashida, T. Hara, A. Ametani // IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution. – 1998. – Vol. 145, No. 6. – P. 693-699. DOI: 10.1049/ip-gtd:19982009.

93. Sekioka, S. Current-dependent grounding resistance model / S. Sekioka, M. Lorentzou, M.P. Philippakou, J.M. Prousalidis // IEEE Trans. Power Deliv. – 2006. – Vol. 21, No. 1. – P. 194-201.

94. Sunde, E.D. Earth conduction effects in transmission systems. / E.D. Sunde. – New York: Dover Publications, 1968.

95. Towne, H.M. Impulse characteristics of driven grounds / H.M. Towne // Gen. Elect. Rev. – 1929. – Vol. 31, No. 11. – P. 605–609.

96. Uman, M.A. The Art and Science of Lightning Protection / M.A. Uman. – Cambridge University Press, 2008.

97. Wu, J. Influence of grounding impedance model on lightning protection analysis of transmission system / J. Wu, J. He, B. Zhang, R. Zeng // Electric Power Systems Research. – vol. 139. – 2016. – pp. 133-138. doi: 10.1016/j.epsr.2015.11.022.

98. Zhang, B. Onset electric field of soil ionisation around grounding electrode under lightning / B. Zhang, Z. Li, S. Wang // High Voltage. – 2020. – Vol. 5, Iss. 5. – pp. 614-619. DOI: 10.1049/hve.2019.0209.

99. Zhang, B. Spatially discontinuous ionization phenomenon in inhomogeneous soil / B. Zhang, J. He, R. Zeng // Sci. China Technol. Sci. – № 53. – pp. 918-921. – 2010.. https://doi.org/10.1007/s11431-010-0114-4.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Акт внедрения результатов исследования

УТВЕРЖДАЮ
Первый заместитель директора – главный инженер
Исаев И.А.
«21» мая 2026 г.

АКТ
внедрения результатов диссертационного исследования
Ивонина Виктора Владимировича
соискателя ученой степени кандидата технических наук
по научной специальности
2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Комиссия в составе:

Председатель научно-технического совета Мурманского филиала ПАО «Россети Северо-Запад», первый заместитель директора – главный инженер Исаев И.А.;

Члены научно-технического совета Мурманского филиала ПАО «Россети Северо-Запад»: заместитель главного инженера по эксплуатации – начальник управления ТПиРОиРОЭХ Рябев К.В., начальник службы эксплуатации Михайлов А.Р., ведущий инженер отдела технического развития и инноваций Милославова А.А. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы на тему «Система заземления электротехнических комплексов с развитием искровых каналов в высокоомных грунтах Арктической зоны», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, используются в деятельности Мурманского филиала ПАО «Россети Северо-Запад» при уточнении ожидаемых уровней грозовых перенапряжений на опорах ВЛ в высокоомных грунтах. В частности, используются:

– математическая модель импульсного сопротивления вертикального заземлителя, учитывающая развитие искровых каналов от торца электрода;

– экспериментальные данные о влиянии длительности импульсного воздействия и влажности грунта на сопротивление заземляющих устройств.

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.

Члены совета:

Заместитель главного инженера по эксплуатации – начальник управления ТПиРОиРОЭХ — Рябев К.В.

Начальник службы эксплуатации — Михайлов А.Р.

Ведущий инженер отдела технического развития и инноваций — Милославова А.А.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2026666075

Программа расчета импульсного сопротивления вертикального заземлителя с учётом искровых каналов в высокоомных грунтах

Правообладатель: ***Ивонин Виктор Владимирович (RU)***

Автор(ы): ***Ивонин Виктор Владимирович (RU)***

Заявка № **2026665477**
Дата поступления **09 мая 2026 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ ***28 мая 2026 г.***

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов