

**Осипова Анна Ивановна**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ЗАЗЕМЛЕНИЯ ОПОР  
КОНТАКТНОЙ СЕТИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА  
ОСНОВЕ ИНТЕГРАЦИИ С ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИЕЙ  
СВЯЗИ**

Специальность 2.9.3.      Подвижной состав железных дорог, тяга поездов  
и электрификация

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Ростов-на-Дону

2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС)

Научный руководитель      Жарков Юрий Иванович  
– доктор технических наук, профессор кафедры  
«Автоматизированные системы электроснабжения»  
ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет  
путей сообщения»

Официальные оппоненты      Митрофанов Александр Николаевич  
– доктор технических наук, профессор кафедры  
«Электроснабжение железнодорожного транспорта»  
ФГБОУ ВО «Самарский государственный университет  
путей сообщения»

Ковалёв Алексей Анатольевич  
– кандидат технических наук, доцент, заведующий  
кафедрой «Электроснабжение транспорта»  
ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет  
путей сообщения»

Ведущая организация      ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта»  
(ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ))

Защита состоится «13» октября 2023 г. в 14.00 на заседании диссертационного совета 44.2.005.03 на базе ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения» по адресу: 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2 (читальный зал).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО РГУПС по адресу: 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2 и на сайте <http://www.rgups.ru>.

Автореферат разослан «    »                      2023 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор

В.А. Финоченко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

*Актуальность темы исследования.* На электрифицированных железных дорогах имеют место короткие замыкания и режимы, действие которых может привести к повреждению элементов системы тягового электроснабжения. Чем быстрее произойдёт отключение повреждённого участка, тем меньше причинённый ущерб. Отключение повреждённых участков выполняется при помощи быстродействующих выключателей с автоматическими приводами, управление которых осуществляется при помощи релейной защиты.

Как известно, на участках постоянного тока, как и на участках переменного тока, все металлические части опор контактной сети, которые не находятся под напряжением, должны быть заземлены на рельс. Один из путей реализации данного требования – это использование схем группового заземления, при которых группа опор объединяется тросом, который в свою очередь особым образом подключается к рельсовому пути. Такое решение при наличии ряда очевидных преимуществ обладает существенным недостатком в случае использования на электрифицированных железных дорогах постоянного тока. Значительные токи тяговых нагрузок нормального режима в ряде случаев бывают соизмеримы с удалёнными токами короткого замыкания в системе с групповым заземлением опор, что может приводить к сбоям в работе релейной защиты участка.

Системы группового заземления одновременно выполняют задачу обеспечения электробезопасности для всех, находящихся вблизи опор контактной сети. При штатной работе системы группового заземления, когда все компоненты системы исправны, люди, находящиеся вблизи группы опор, на которых произошло короткое замыкание, будут защищены от поражения электрическим током. Однако, при обрыве троса группового заземления или нарушении соединения заземляющего спуска с рельсом, группа опор, объединённых тросом группового заземления, окажется под напряжением, что создаст потенциальную опасность электротравмы для всех, находящихся рядом.

Внедрение в систему группового заземления опор контактной сети дополнительного проводника, выполненного с помощью металлической оболочки оптоволоконного кабеля типа ОКГТ (оптоволоконные кабели встроенные в грозотрос), позволит существенно улучшить эксплуатационные характеристики существующей на сегодняшний день системы. Такой проводник, подключённый по разработанной схеме к существующим цепям группового заземления опор участка железной дороги, позволит снизить сопротивление петли короткого замыкания, и как следствие повысить значения токов КЗ. Кроме этого, наличие дополнительного проводника обеспечит повышение надёжности функционирования всей системы группового заземления опор, благодаря появлению дублирующего пути протекания токов при коротких замыканиях. Дополнительно следует отметить, что использование в качестве линии связи волоконно-оптического кабеля с металлической оболочкой типа ОКГТ позволит полностью исключить факт электротермической деградации внешней оболочки кабеля из-за влияния электромагнитных полей линий СЦБ (устройства сигнализации, централизации и блокировки) и продольного электроснабжения, горения сухой травы, вандализма и ряда прочих факторов.

**Степень разработанности темы исследования.** Существенный вклад в исследования вопросов повышения надёжности и эффективности функционирования устройств электроснабжения электрифицированных железных дорог постоянного тока внесли разработки К. Г. Марквардта, Б.И. Косарева, В.Н. Пупынина, М.П. Бадёра, М.В. Шевлюгина, Е.П. Фигурнова, Ю.И. Жаркова, В.П. Кручинина, А.С. Бочева, А.В. Котельникова, А.Б. Косарева, В.Е. Марского, Т.П. Добровольскиса, В.А. Зимакова, А.Т. Буркова, А.Н. Марикина, Ю.П. Васильева, А.Н. Митрофанова, В.Л. Григорьева, А.А. Ковалёва, К.Б. Кузнецова, Д.В. Лесникова, С.А. Филиппова, И.С. Демиденко, Р.С. Трифонова, и др. Однако, вопрос повышения надёжности работы релейных защит при возникновении удалённых коротких замыканий на участках постоянного тока требует дополнительных исследований в части увеличения токов КЗ в конце защищаемой зоны.

Таким образом, вопрос снижения сопротивления элементов цепи обратного тока при коротких замыканиях в тяговой сети остается актуальным. Кроме этого, использование в качестве волоконно-оптических линий связи, выполненных кабелем типа ОКГТ на электрифицированных железных дорогах, открывает новые возможности в совершенствовании существующих систем электроснабжения. Применительно к обозначенной проблеме возможно обеспечить снижение сопротивления цепи элементов системы группового заземления опор, за счёт использования металлической оболочки волоконно-оптических линий связи, выполненных кабелем ОКГТ и прокладываемых по опорам контактной сети с полевой стороны.

**Объектом исследования** являются устройства контактной сети участка железной дороги постоянного тока.

**Областью исследования** является групповое заземление опор контактной сети.

**Цель диссертационной работы** заключается в повышении надёжности и безопасности работы участков железной дороги постоянного тока за счёт совершенствования системы группового заземления опор контактной сети.

Для достижения поставленной цели сформулированы **следующие задачи:**

1 Проанализировать работу системы группового заземления опор контактной сети и влияние параметров элементов этой системы на чувствительность релейной защиты и надёжность отключения коротких замыканий.

2 Разработать принципы организации дополнительного заземления опор контактной сети на участках постоянного тока, предполагающие использование металлической оболочки волоконно-оптических линий связи, подвешиваемых на опорах контактной сети с полевой стороны и усовершенствовать систему группового заземления опор.

3 Разработать математическую модель и выполнить моделирование режимов работы системы заземления опор, включающей в себя в качестве дополнительного проводника металлическую оболочку волоконно-оптической линии связи (ВОЛС).

4 Оценить эффективность применения системы заземления опор, включающей в себя в качестве дополнительного проводника металлическую оболочку волоконно-оптической линии связи.

**Научная новизна** диссертационной работы. На базе комплексного исследования и научного обобщения полученных результатов разработаны

принципы организации дополнительного заземления опор контактной сети на участках постоянного тока железной дороги, а именно:

1 Разработаны принципы реализации системы группового заземления опор, отличающейся от традиционной наличием точек соединения троса группового заземления с металлической оболочкой ВОЛС, позволяющие снизить сопротивление петли короткого замыкания и потенциал прикосновения к опоре контактной сети при аварии.

2 Установлены расчётные соотношения между параметрами усовершенствованной системы группового заземления опор, параметрами тяговой сети участка электроснабжения и величиной токов короткого замыкания, на основании которых разработана математическая модель, используемая для расчёта уставок релейной защиты вдоль всей межподстанционной зоны.

3 Разработана эквивалентная схема замещения для расчёта показателей надёжности и выполнена оценка повышения надёжности усовершенствованной системы группового заземления опор контактной сети.

#### ***Теоретическая значимость результатов диссертационной работы:***

Разработана математическая модель и выполнено моделирование режимов работы системы заземления опор, включающих в себя металлическую оболочку волоконно-оптических линий связи. Представленные теоретические положения позволяют определить способы расчёта токов короткого замыкания, учитывающие различные схемы питания контактной сети, различные способы подключения металлической оболочки ВОЛС.

#### ***Практическая значимость результатов диссертационной работы:***

Предложена система двухуровневого группового заземления на металлическую оболочку ВОЛС на участках постоянного тока позволяющая:

1 Повысить чувствительность релейной защиты к удалённым коротким замыканиям за счёт увеличения минимальных токов короткого замыкания.

2 Снизить напряжение прикосновения к опорам контактной сети в момент КЗ, что повышает безопасность людей в зоне группового заземления опор.

3 Повысить надёжность отключения КЗ при обрыве троса группового заземления за счёт его дублирования металлической оболочкой ВОЛС.

***Методология и методы исследования.*** Для решения поставленных задач в работе использовались методы математического и компьютерного моделирования, анализа, сравнения и модельного эксперимента.

***Достоверность полученных результатов.*** Достоверность научных результатов, представленных в диссертационной работе, подтверждается верификацией и высокой сходимостью результатов расчёта на компьютерной модели и данными модельного эксперимента, выполненного при помощи программного комплекса *Matlab Simulink*.

***Соответствие паспорту специальности.*** Диссертация соответствует паспорту научной специальности 2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация:

– к п.1 «Эксплуатационные характеристики и параметры подвижного состава и систем тягового электроснабжения, повышение их эксплуатационной надёжности и работоспособности. Системы электроснабжения железных дорог, промышленного железнодорожного транспорта, рельсового городского транспорта

и метрополитенов. Методы и средства снижения энергетических потерь, обеспечения энергетической безопасности тяги поездов и электроснабжения железных дорог»;

– к п. 4 «Совершенствование подвижного состава, включая тяговый привод и энергетические установки автономных локомотивов; тяговых и трансформаторных подстанций, тяговых сетей, включая накопители энергии, преобразователи, аппараты, устройства защиты системы тягового электроснабжения. Улучшение эксплуатационных показателей подвижного состава и устройств электроснабжения, канализация обратного тока» – представленная в работе двухуровневая система группового заземления опор контактной сети постоянного тока.

***Основные положения, выносимые на защиту:***

1 Принципы и способы организации группового заземления опор с дополнительным использованием металлической оболочки волоконно-оптических линий связи.

2 Математическая модель и результаты моделирования режимов работы системы заземления опор с использованием в качестве дополнительного проводника металлическую оболочку волоконно-оптической линии связи.

3 Оценка эффективности применения системы дополнительного заземления опор с использованием металлической оболочки ВОЛС.

***Апробация работы.*** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались:

– на Международной научно-практической конференции «Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи» (Ростов-на-Дону, ФГБОУ ВО РГУПС, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023);

– на Международной научно-практической конференции «Транспорт: наука, образование, производство» («Транспорт») (Ростов-на-Дону, ФГБОУ ВО РГУПС, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023);

– на Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России» («ТрансПромЭк–2019»);

– на Всероссийской национальной научно-практической конференции «Современное развитие науки и техники» (Наука-2020) (Ростов-на-Дону, ФГБОУ ВО РГУПС, 2020);

– на Международной научно-практической конференции «Перспективы развития локомотиво-, вагоностроения и технологии обслуживания подвижного состава» (Ростов-на-Дону, ФГБОУ ВО РГУПС, 2022);

– заседаниях кафедры «Автоматизированные системы электроснабжения» ФГБОУ ВО РГУПС (г. Ростов-на-Дону).

***Публикации.*** Основные положения диссертационной работы опубликованы в 19 научных работах, в том числе: 1 – входящая в международные реферативные базы данных и системы цитирования *Scopus*; 7 – в ведущих рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации.

***Структура и объём диссертации.*** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и пяти приложений. Работа

представлена на 192 страницах, содержит 129 страниц основного текста, 111 рисунков, 19 таблиц и 112 наименований библиографического списка, включая 1 наименование иностранного источника.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность, значимость выбранной темы диссертационной работы, сформулированы область и объект исследования, определены цель и основные задачи исследования, сформулированы научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования.

**В первой главе** проводится исследование проблемы определения релейной защитой удалённых коротких замыканий в тяговых сетях постоянного тока, оснащённых системой группового заземления опор контактной сети.

В настоящее время в целях обеспечения электробезопасности все металлические конструкции опор контактной сети подлежат защитному заземлению. Защитное заземление опор контактной сети выполняется присоединением заземляющего спуска к средней точке дроссель-трансформатора или к рельсовой цепи.

В качестве самого троса на сегодняшний день на сети дорог постоянного тока применяются провода АС–50, ПБСМ–70, ПБСА–50/70, ПС–95 или другие с большей площадью сечения. Существующая система группового заземления не лишена недостатков. В случае повреждения заземляющего спуска в результате естественной коррозии или намеренного отсоединения его от рельса вся система становится неработоспособной.

Рассмотрим элементы, составляющие сопротивление петли короткого замыкания при аварии на контактной сети. В ходе исследования будем полагать, что нелинейный элемент цепи короткого замыкания – электрическая дуга – отсутствует. На Рисунке 1 представлена схема протекания тока КЗ для случая, когда на участке применяется схема одностороннего питания контактной сети.



Рисунок 1 – Путь протекания тока короткого замыкания при аварии

На величину тока короткого замыкания в тяговой сети, оборудованной системой группового заземления опор, оказывают влияние сопротивления следующих элементов:

- троса группового заземления опор,  $R_T$ ;
- рельсового пути от места присоединения заземляющего спуска группы опор, где произошла авария, до тяговой подстанции,  $R_P$ ;
- сопротивление тяговой подстанции, в которое входят сопротивления трансформаторов, преобразовательных агрегатов и внешней энергосистемы,  $R_{ТП}$ ;
- сопротивление контактной сети до места короткого замыкания,  $R_{КС}$ ;
- переходное сопротивление в точке короткого замыкания,  $R_{пер}$ .

Сопротивление петли короткого замыкания можно описать выражением:

$$R_{кз} = R_T + R_P + R_{ТП} + R_{КС} + R_{пер}. \quad (1)$$

На электрифицированных дорогах постоянного тока применяются различные типы контактных подвесок, для анализа рассмотрим три основных типа – М120+МФ100, М120+2МФ100, М120+2МФ100+2А185. Рельсовый путь примем выполненным рельсами типа Р65. При определении сопротивления тяговой подстанции учтены используемые типы схем выпрямления, мощности понижающих и преобразовательных трансформаторов и сопротивление внешней энергосистемы. В результате выполненных расчётов получен ряд значений всех составляющих выражения (1) и определены средние значения данных величин.

На Рисунке 2 приведена диаграмма, показывающая усреднённое значение долей, вносимых каждой составляющей в итоговое значение сопротивления петли короткого замыкания в системе с групповым заземлением опор.

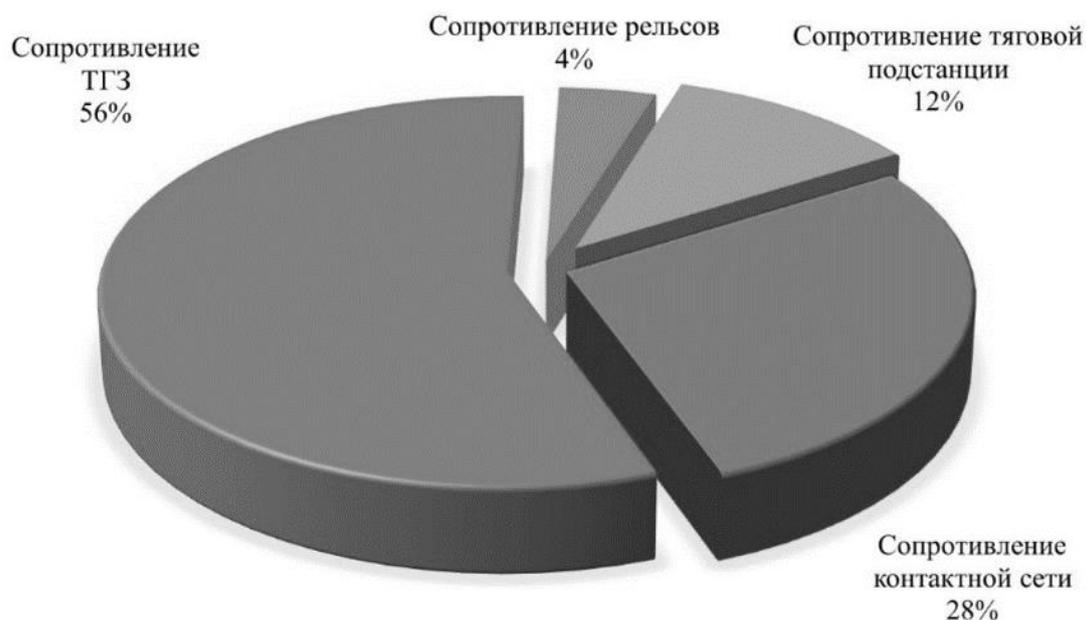


Рисунок 2 – Доля каждого элемента в формировании итогового значения сопротивления петли короткого замыкания (усреднённые значения)

Как следует из проведённого исследования, ключевую роль в формировании сопротивления петли короткого замыкания играет сопротивление участка троса группового заземления (ТГЗ).

В случае повреждения ТГЗ либо при обрыве заземляющего спуска вся защищаемая группа опор окажется отключённой от рельсового пути, и ток будет стекать по опоре в землю. Сопротивление петли КЗ может возрасти многократно, в результате чего комплекс релейной защиты не сможет распознать и отключить аварийный участок. Для повышения надёжности работы системы группового заземления опор контактной сети и обеспечения устойчивости функционирования релейной защиты на участках железной дороги постоянного тока предлагается внедрение в систему группового заземления опор дополнительного проводника, используемого для организации пути обратного тока. В качестве резервного проводника целесообразно использовать оптоволоконный кабель, смонтированный в грозозащитный трос (ОКГТ). Этот кабель предлагается применять на вновь сооружаемых либо реконструируемых участках электрифицированных железных дорог постоянного тока.

В настоящее время широкое применение на высоковольтных линиях электропередач получили оптоволоконные кабели ОКГТ встроенные в грозотрос. Отличие предлагаемого кабеля ОКГТ от применяемых в настоящее время на сети железных дорог оптических кабелей ОКСН, заключается в том, что его внешняя оболочка выполнена из сталеалюминевых повивов, внутри которых располагаются оптические каналы, что придаёт высокую надёжность кабелю (Рисунок 3).



1 – Оптическое волокно; 2 – Оптический модуль из нержавеющей стали, заполненный гидрофобным гелем; 3 – Алюминиевая оболочка стального модуля; 4 – Повив стальных проволок, плакированных алюминием и/или проволок из алюминиевого сплава

Рисунок 3 – Оптический кабель типа ОКГТ

Отличительной особенностью кабеля типа ОКГТ является его защищённость от внешнего воздействия электромагнитного поля питающих линий. Стальные проводники являются ферромагнитным материалом, надёжно защищающим оптические волокна кабеля от воздействия магнитных полей, что позволяет говорить об отсутствии влияния эффекта Фарадея. Влияние эффекта Керра на процесс передачи информации по ОКГТ также следует исключить, так как внутри проводящего тела напряжённость электрического поля равна нулю.

Результат исследований, выполненных в объёме данной главы, показал необходимость усиления существующей системы группового заземления опор контактной сети с целью снижения полного сопротивления петли короткого

замыкания. Использование в качестве дополнительного проводника металлической оболочки волоконно-оптических линий связи, подвешиваемых на опорах контактной сети с полевой стороны, позволит избежать дополнительных капиталовложений на прокладку усиливающего проводника.

Во второй главе «Принципы дополнительного заземления опор с использованием металлической оболочки ВОЛС» предложены различные способы подключения троса группового заземления опор контактной сети к металлической оболочке волоконно-оптической линии связи (Рисунок 4).

В результате проведённого анализа был выбран оптимальный вариант (г), обеспечивающий наибольшее снижение сопротивления петли короткого замыкания. Наложение дополнительных соединений между ТГЗ и ВОЛС для всех рассмотренных в работе вариантов (а–г) будет способствовать достижению поставленной цели – повышению токов КЗ при аварии.

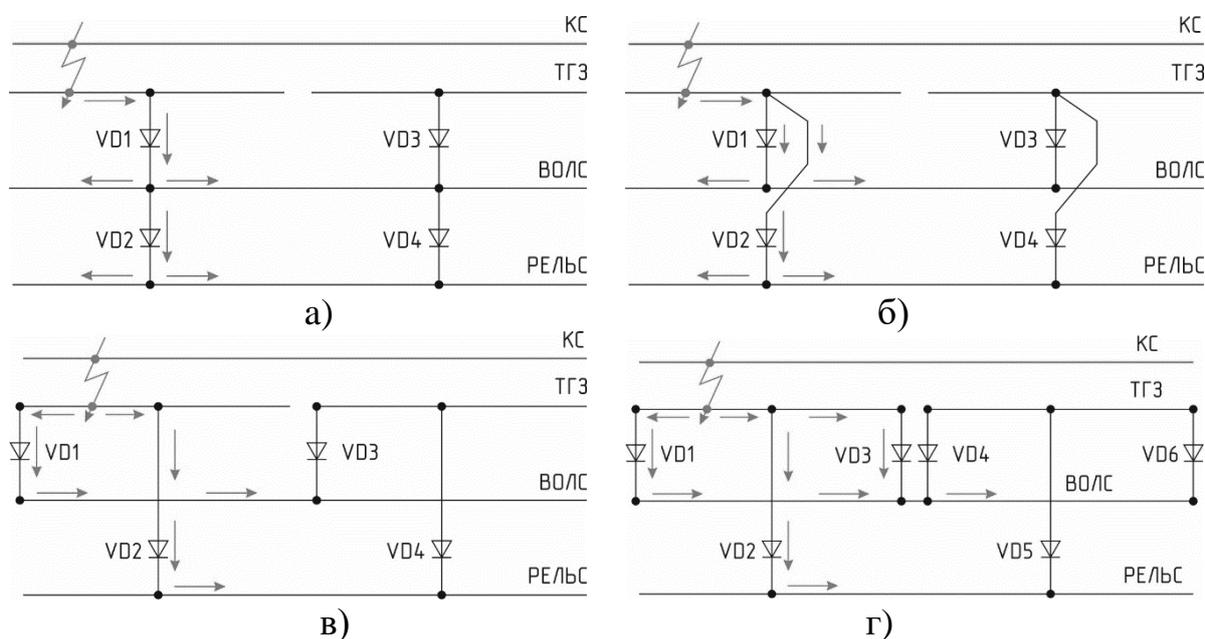


Рисунок 4 – Варианты организации двухуровневой системы заземления опор контактной сети

Для вариантов (а) и (б) снижение сопротивления петли короткого замыкания будет достигаться за счёт параллельного соединения ОКГТ и рельсовой цепи:

$$R'_p = \frac{R_p \cdot R_{\text{ОКГТ}}}{R_p + R_{\text{ОКГТ}}}. \quad (2)$$

В варианте (в) ток короткого замыкания течёт по ТГЗ в обе стороны от места аварии, что очевидно снижает влияние самого «высокоомного» элемента цепи КЗ на величину тока короткого замыкания:

$$R_{\text{КЗ}} = R_{\text{ТП}} + R_{\text{КС}} + \frac{(R'_{\text{ТГЗ}} + R_p)(R''_{\text{ТГЗ}} + R_{\text{ОКГТ}})}{R_{\text{ТГЗ}} + R_p + R_{\text{ОКГТ}}}, \quad (3)$$

где  $R'_{ТГЗ}$  – сопротивление участка ТГЗ от начала участка группового заземления опор до места КЗ, а  $R''_{ТГЗ}$  – сопротивление участка ТГЗ от места КЗ до заземляющего спуска.

Вариант (г) принят в качестве оптимального, так как наличие соединений на обоих плечах участка ТГЗ обеспечит повышение тока КЗ при переходе точки короткого замыкания через место подключения заземляющего спуска.

Для выбранного варианта реализации двухуровневой системы заземления опор проведён анализ электрических режимов работы в ситуации, когда произошло повреждение одного или нескольких элементов группового заземления. Такими элементами могут быть заземляющий спуск троса группового заземления, трос группового заземления (ТГЗ), заземляющий шлейф, соединяющий ТГЗ и ОКГТ, силовые диоды и сам кабель ОКГТ, Рисунок 5.

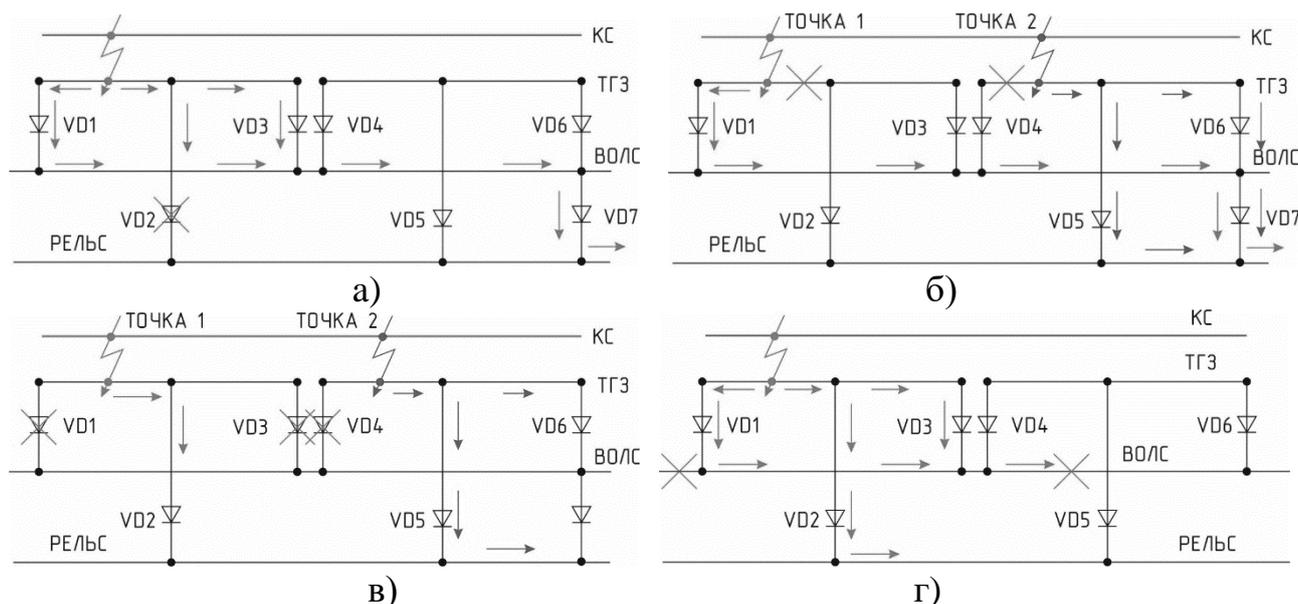


Рисунок 5 – Вынужденные режимы работы двухуровневой системы заземления опор контактной сети

При нарушении пути тока через заземляющий спуск ввиду его повреждения (Рисунок 5 а) связь группы опор с рельсовой цепью сохраняется, но осуществляется через участок волоконно-оптической линии связи. В случае повреждения троса группового заземления (Рисунок 5 б) возможны два варианта. В первом случае, при коротком замыкании в точке 1 ток будет стекать по тросу ОКГТ. Если авария произойдёт в точке 2, то протекание тока КЗ будет происходить по существующему заземляющему спуску и, частично по оставшемуся в работе, дополнительному заземляющему проводнику, соединяющему ТГЗ и ОКГТ. При нарушении целостности одного из двух дополнительных проводников (Рисунок 5 в), соединяющих ТГЗ и ОКГТ, токораспределение в схеме при аварии будет аналогичным случаю, рассмотренному ранее. При отказе обоих дополнительных соединительных проводников двухуровневая схема заземления превратится в традиционную. При обрыве кабеля (Рисунок 5 г) в месте, находящемся левее точки короткого замыкания, и при условии, что при одностороннем питании подстанция располагается справа, никакого изменения в токораспределении наблюдаться не

будет. Если обрыв произойдёт правее места КЗ, то схема превратится в традиционную одноуровневую схему заземления.

Введение дополнительного проводника в систему электроснабжения участка железной дороги постоянного тока влечёт за собой потребность в решении задачи, направленной на борьбу с гололёдообразованием на этом проводнике. Для борьбы с гололёдно-изморозевыми отложениями на волоконно-оптических линиях связи, выполняемых тросом типа ОКГТ, предложено несколько технических решений.

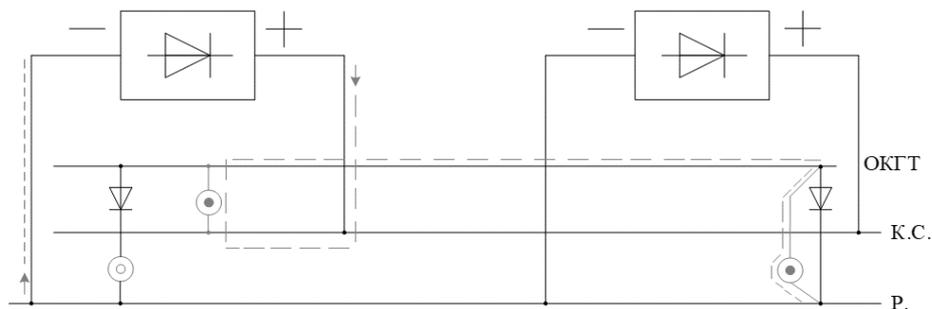


Рисунок 6 – Схема организации плавки гололёда на ОКГТ

Напряжение с фидера контактной сети через разъединитель подаётся на конец кабеля ОКГТ. Рельс в такой схеме выступает в качестве добавочного сопротивления. Сопротивление петли протекания тока плавки гололёда в данном случае можно рассчитать по формуле:

$$R_{\text{петли}} = R_{\text{ТП}} + (\rho_{\text{ОКГТ}} + \rho_{\text{рельс}}) \cdot \ell, \quad (4)$$

где  $\rho_{\text{ОКГТ}}$  – удельное сопротивление ОКГТ, Ом/км;

$\rho_{\text{рельс}}$  – удельное сопротивление рельсового пути, Ом/км;

$\ell$  – длина участка, км;

$R_{\text{ТП}}$  – сопротивление тяговой подстанции, Ом.

Полученное значение сопротивления необходимо использовать для определения тока плавки гололёда, который будет протекать по ОКГТ. Рассчитанную величину тока следует сравнить с допустимым значением тока, длительно протекающего по ОКГТ.

В случае, если ток для плавки гололёда будет недостаточным, но его значение будет меньше допустимого для кабеля ОКГТ можно прибегнуть к варианту плавки, когда контур протекания тока образован между тяговой подстанцией и постом секционирования. Если же величина тока плавки гололёда будет избыточной, следует рассмотреть вариант использования в качестве добавочного сопротивления вместо рельсовой цепи контактную сеть, получающую питание только от одной тяговой подстанции. Дальнейшее регулирование значения тока плавки гололёда также можно осуществить путём изменения режима работы выпрямительно-инверторных преобразователей тяговых подстанций.

Для оценки эффективности принятых решений двухуровневой системы заземления была рассмотрена схема организации группового заземления опор с позиции определения надёжности работы.

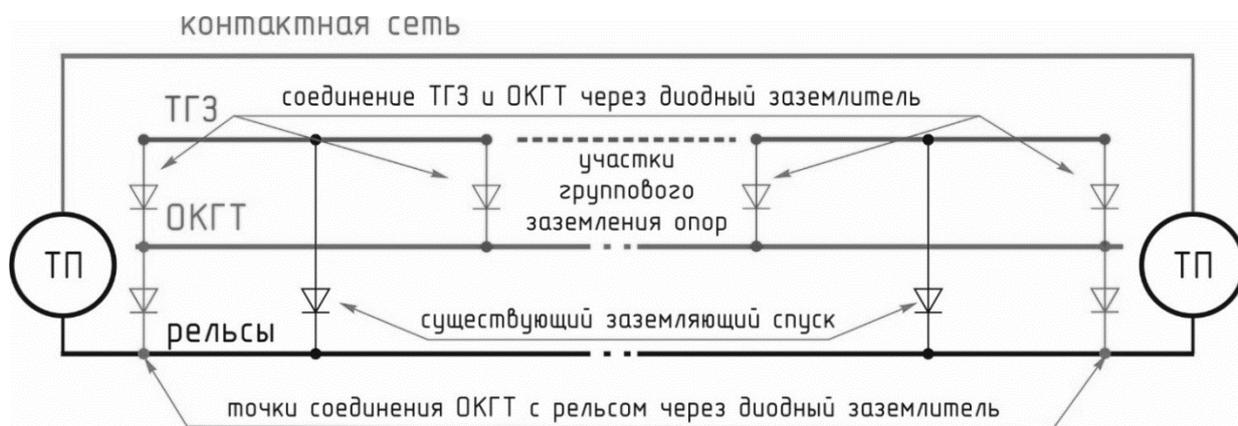


Рисунок 7 – Участок организации двухуровневого заземления опор

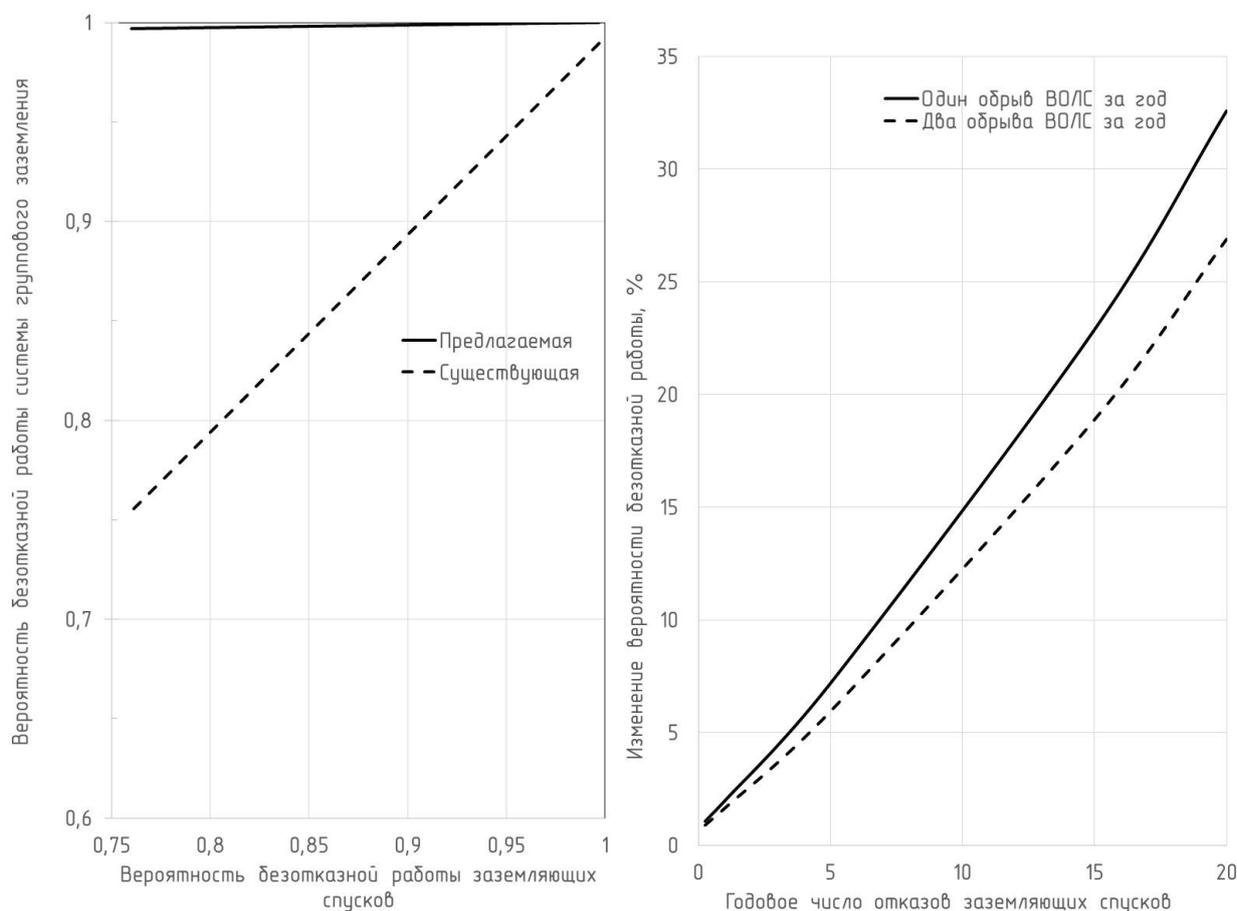


Рисунок 8 – Характеристики надёжности

При анализе учитывались показатели надёжности следующих элементов цепи протекания тока короткого замыкания: годовое число отказов соединительных зажимов, используемых для присоединения ТГЗ к заземляющему спуску либо к шлейфу заземления на ОКГТ, годовое число отказов высоковольтных диодов, применяемых в системе заземления опор, годовое число отказов ОКГТ, ТГЗ, и проводников заземляющего спуска. В качестве расчётного

периода выберем отрезок времени в один год. В результате получены зависимости (Рисунок 8), позволяющие сделать вывод о повышении показателей надёжности разрабатываемой системы заземления опор.

**В третьей главе** «Моделирование режимов работы системы заземления опор с дополнительным использованием системы ВОЛС» представлены принципы моделирования и разработанная методика для расчёта токов короткого замыкания с учётом наличия дополнительного заземления на металлическую оболочку волоконно-оптической линии связи типа ОКГТ. В главе сформулирован подход, позволяющий осуществить расчёт токов КЗ для различных вариантов организации питания участка железной дороги постоянного тока. Схема замещения для расчёта токов КЗ без учёта влияния переходных процессов для однопутного участка при одностороннем питании представлена на Рисунке 9.

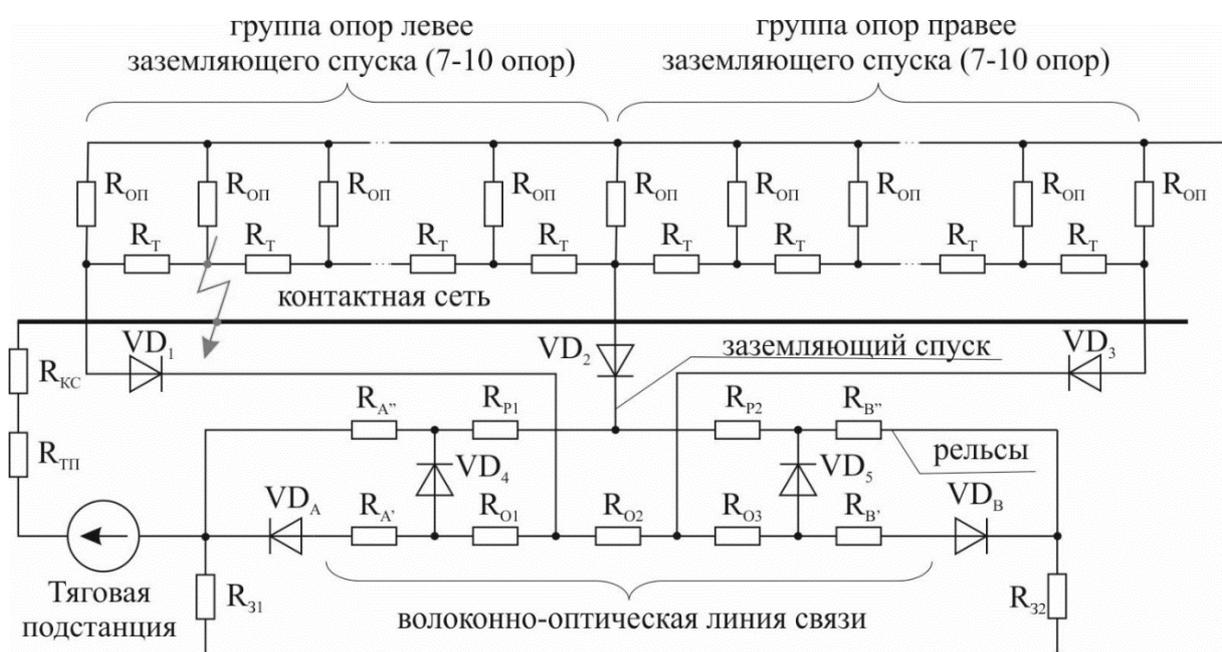


Рисунок 9 – Схема замещения участка группового заземления для расчёта токов КЗ при одностороннем питании контактной сети

$R_{КС}$  – сопротивление контактной сети от тяговой подстанции до точки КЗ;  
 $R_{P1}$ ,  $R_{P2}$  – эквивалентное сопротивление двух ниток рельсов от места электрического соединения с ОКГТ до точки подключения заземляющего спуска участка ТГЗ, где произошло КЗ, левее и правее соответственно;

$R_T$  – сопротивление одного пролёта троса группового заземления;

$R_A$ ,  $R_B$  – сопротивление ОКГТ от места присоединения к контуру тяговых подстанций до точки соединения с рельсом;

$R_{A''}$ ,  $R_{B''}$  – эквивалентное сопротивление двух ниток рельсов от места присоединения к контуру тяговых подстанций до места соединения с ОКГТ;

$R_{ТП}$  – эквивалентное сопротивление тяговой подстанции;

$R_{ОП}$  – сопротивление тела опоры;

$R_{31}$ ,  $R_{32}$  – сопротивление контура заземления тяговой подстанции;

$R_{O2}$  – сопротивление ОКГТ между точками присоединения к ТГЗ;

$R_{O1}$ ,  $R_{O3}$  – сопротивление ОКГТ от точки заземления ОКГТ на рельс до точки соединения ОКГТ и ТГЗ левее и правее соответственно.

Получен математический аппарат, позволяющий определить токи короткого замыкания в сети постоянного тока электрифицированных железных дорог в случае использования двухуровневой схемы заземления, Таблица 1.

Таблица 1 – Методика расчёта тока короткого замыкания, место КЗ левее заземляющего спуска

	$R_A = \frac{R_{A''} \cdot R_{A'}}{R_{A''} + R_{A'}},$ $R_{B^*} = \frac{R_{B''} \cdot R_{B'}}{R_{B''} + R_{B'}} + R_{31} + R_{32},$ $c R_{O4} = R_{O2} + R_{O3}.$
	$R_1 = R_A + R_{P1} + R_A \cdot R_{P1} / R_{O1},$ $R_2 = R_{O1} + R_{P1} + R_{O1} \cdot R_{P1} / R_A,$ $R_3 = R_A + R_{O1} + R_A \cdot R_{O1} / R_{P1},$ $R_4 = R_{O4} + R_{P2} + R_{O4} \cdot R_{P2} / R_{B^*},$ $R_5 = R_{B^*} + R_{P2} + R_{B^*} \cdot R_{P2} / R_{O4},$ $R_6 = R_{O4} + R_{B^*} + R_{O4} \cdot R_{B^*} / R_{P2}.$
	$R_7 = \frac{R_5 \cdot R_1}{R_5 + R_1},$ $R_8 = \frac{R_2 \cdot R_4}{R_2 + R_4},$ $R_9 = \frac{R_3 \cdot R_6}{R_3 + R_6}.$
	$R_{10} = \frac{R_7 \cdot R_9}{R_7 + R_8 + R_9},$ $R_{11} = \frac{R_7 \cdot R_8}{R_7 + R_8 + R_9},$ $R_{12} = \frac{R_8 \cdot R_9}{R_7 + R_8 + R_9}.$
	$R_9 = R_{III} + R_{KC1} + R_{10} + \frac{(R_{11} + R_{T1})(R_{12} + R_{T2})}{R_{11} + R_{T1} + R_{12} + R_{T2}},$ $I_{K3_i} = \frac{E}{R_9}.$

Для выполнения расчётов тока короткого замыкания в диссертации разработаны методики для случая использования различных схем питания контактной сети: одностороннего, двустороннего, узлового, петлевого. Использование указанной методики расчёта токов короткого замыкания целесообразно выполнять с использованием прикладных программ. Например, математические пакеты *Matlab*, *Mathcad*, *Maple*, а также табличные процессоры *Google Таблицы*, *LibreOffice Calc* и *Excel*, входящий в пакет *MS Office*. В диссертационной работе выполнен расчёт токов короткого замыкания для различных вариантов тяговой сети, ТГЗ и ОКГТ. На Рисунке 10 приведена диаграмма изменения тока КЗ для участка тяговая подстанция – пост секционирования, расстояние 10 км, применяемая тяговая сеть М120+2МФ100+2А185, трос группового заземления АС–95, на участке применено одностороннее питание, тяговая подстанция расположена слева. Расчёт выполнен для двух типов ОКГТ, с различным значением сопротивления.

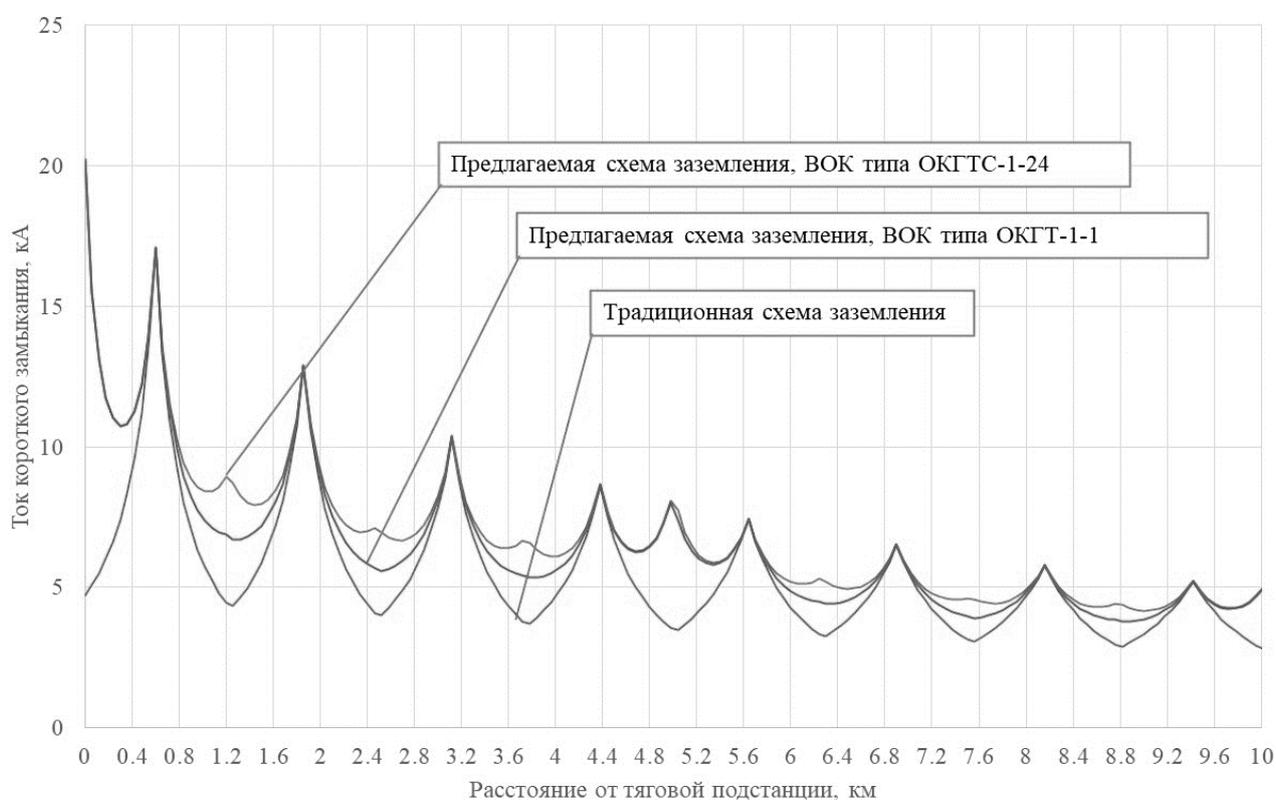


Рисунок 10 – Изменение тока короткого замыкания

Для верификации разработанной методики было проведено моделирование электрических схем замещения на программном комплексе *Matlab Simulink*. На Рисунке 11 приведено рабочее окно программы, в котором собрана электрическая цепь, имитирующая работу участка тяговой сети постоянного тока в режиме короткого замыкания. В качестве системы группового заземления опор в модели применена система с дополнительным заземлением ТГЗ на металлическую оболочку волоконно-оптической линии связи.

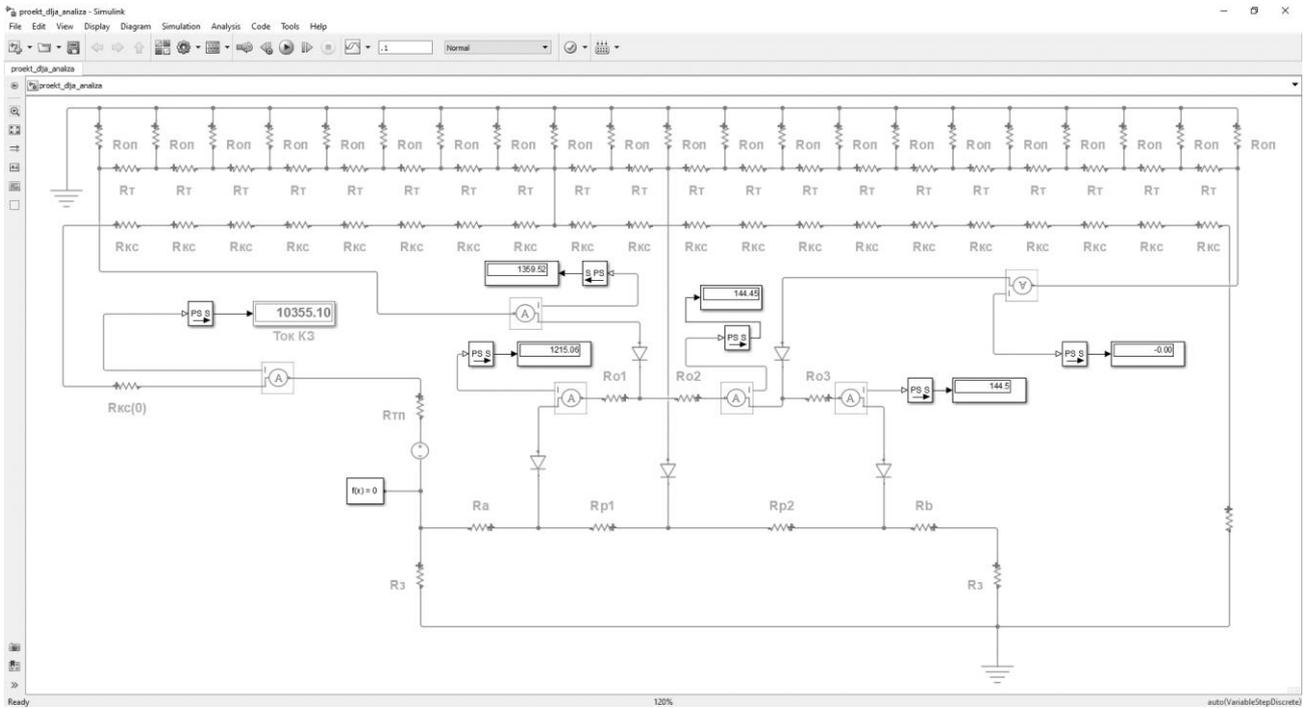


Рисунок 11 – Модель двухуровневой системы заземления в *Matlab Simulink*

При помощи модели, представленной на Рисунке 11, был выполнен модельный эксперимент, в котором определялись значения токов короткого замыкания при перемещении точки КЗ от тяговой подстанции к посту секционирования. Результаты измерения токов были сопоставлены с результатами расчёта для аналогичных параметров по разработанной методике.

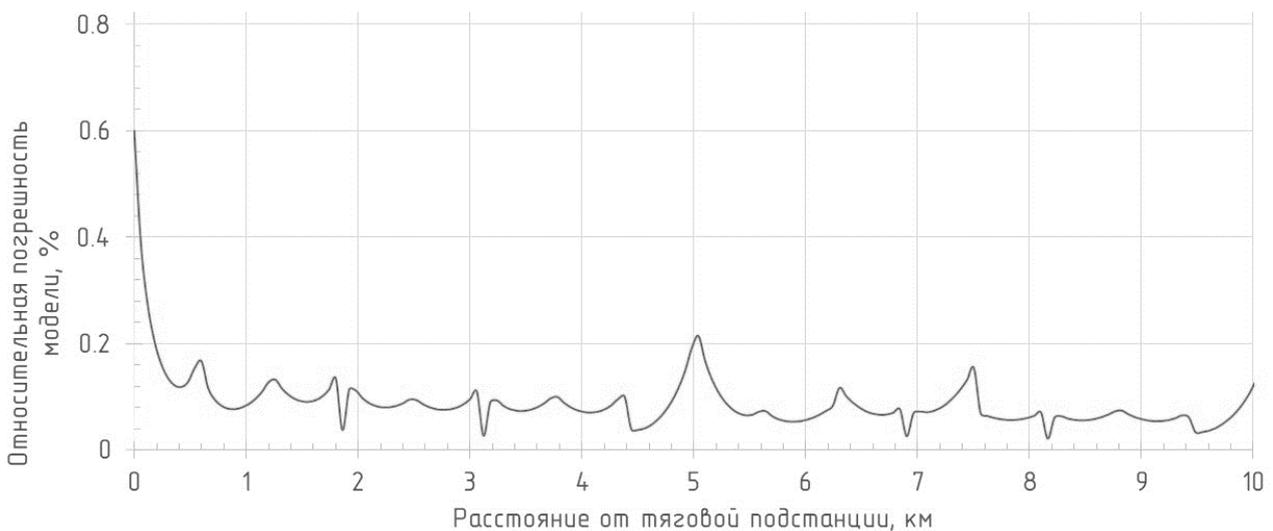


Рисунок 12 – Результат сравнения данных расчёта по разработанной методике с данными моделирования на программе *Matlab Simulink*

Сравнительный анализ моделирования на комплексе *Matlab Simulink* с результатами, выполненными в *Excel* (Рисунок 12), свидетельствуют о корректности составленной расчётной математической модели.

В четвёртой главе «Эффективность применения системы заземления опор с дополнительным использованием системы ВОЛС» проведён комплексный

анализ предлагаемой в диссертационной работе двухуровневой системы группового заземления опор. Ввиду особенностей конструкции ВОЛС типа ОКГТ для обеспечения нормального функционирования линии связи, выполненной кабелем ОКГТ, произведена оценка влияния токов в металлической оболочке ВОЛС на его характеристики и срок службы, разработан алгоритм определения токов, протекающих в ОКГТ в аварийном режиме. Максимально допустимая температура нагрева ОКГТ при длительном воздействии тока не должна превышать значения 85 °С. Для исследования процесса нагревания структуры ОКГТ токами короткого замыкания использована программа «*Elcut Professional 6.3*».

Модель кабеля, созданная в программе «*Elcut Professional 6.3*», представлена на Рисунке 13. Модель состоит из трёх сред – воздух, сталь и алюминий. Для каждой из сред были заданы параметры теплопроводности, теплоёмкости и плотности соответствующего материала. Результаты компьютерного моделирования на программе «*Elcut Professional 6.3*» для нескольких моментов времени в виде диаграммы изменения температуры в структуре кабеля показаны на Рисунке 13.

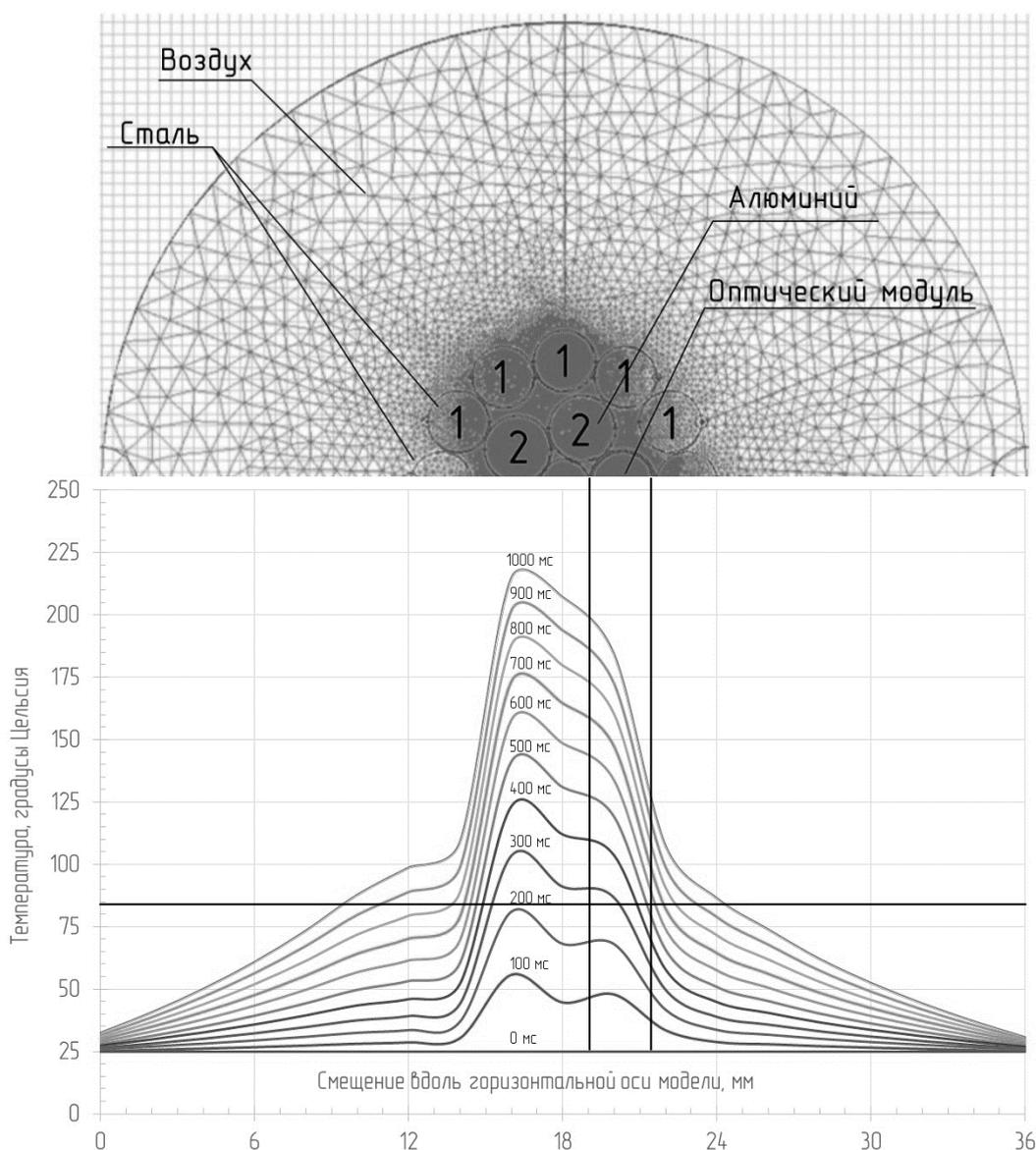
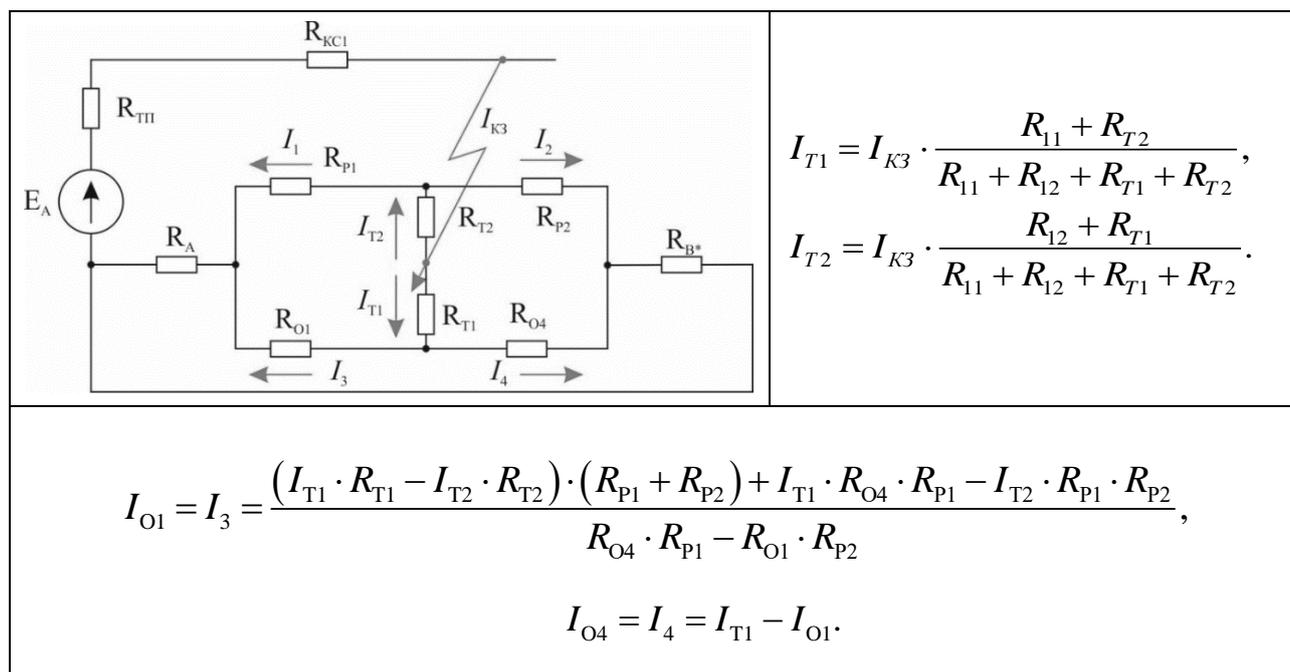


Рисунок 13 – Построение расчётной модели кабеля ОКГТ

Из диаграммы следует, что оптический модуль за время равное 1 секунде разогревается до температуры, равной 200 °С. Линией на Рисунке 13 показана максимально допустимая длительная температура для оптических волокон, которая составляет 85 °С. Как видно из диаграммы, за время равное 300 мс этот порог будет пройден, что нежелательно с точки зрения обеспечения срока службы оптоволоконной линии связи. Для определения доли тока короткого замыкания, протекающего по ОКГТ, в диссертационной работе разработана методика расчёта. Фрагмент методики расчёта для случая одностороннего питания приведён в Таблице 2.

Таблица 2 – Методика расчёта составляющей тока короткого замыкания, протекающей в ОКГТ, КЗ левее заземляющего спуска, одностороннее питание



Для обеспечения расчётного срока службы ОКГТ следует определить значение тока, протекающего по ОКГТ, затем выполнить моделирование процесса нагрева кабеля и по результатам моделирования и данным о времени срабатывания релейных защит сделать вывод о допустимости применения конкретного типа ОКГТ в системе группового заземления опор.

Использование системы группового заземления имеет своей важнейшей задачей защиту людей, находящихся вблизи опор контактной сети и имеющих потенциальную возможность прикоснуться к опоре, через которую стекает часть тока короткого замыкания. При анализе эффективности применения предлагаемой системы заземления опор проведён сравнительный анализ величины напряжения прикосновения для существующего и предлагаемого способа организации группового заземления. Ввиду того, что напряжение прикосновения к опоре в значительной степени зависит от типа грунта и степени его увлажнённости в диссертационной работе определена разность потенциалов между телом опоры и рельсовой цепью в месте возникновения аварии. Результаты расчёта разности потенциалов представлены на Рисунке 14.

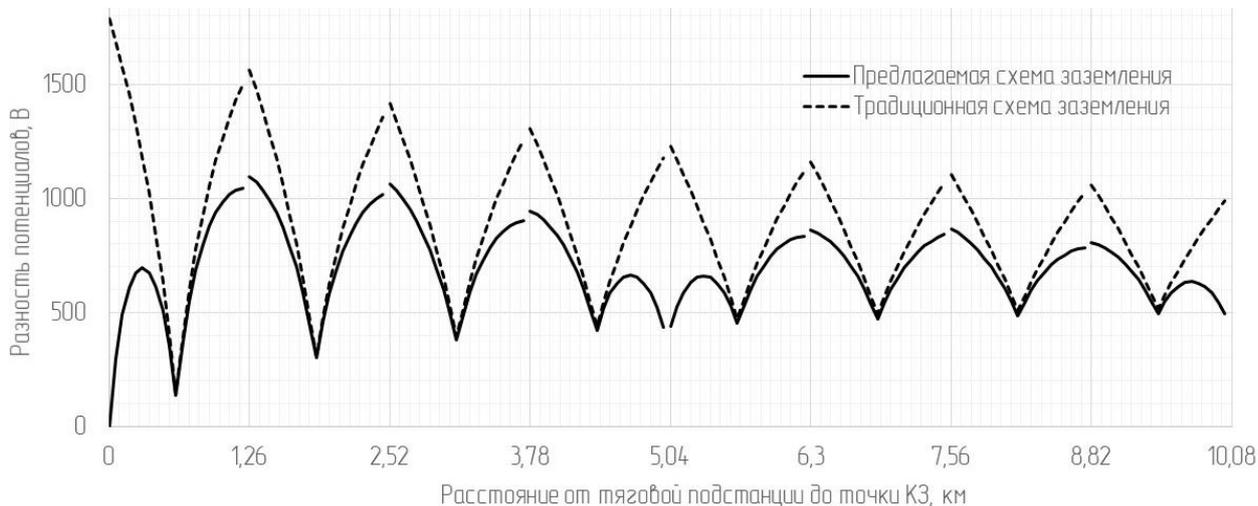


Рисунок 14 – Сравнительная диаграмма разности потенциалов, подвеска М120+2МФ100, ТГЗ – АС–95, ВОЛС – ОКГТС–1–24, одностороннее питание

По полученным данным можно однозначно утверждать, что использование предлагаемой в диссертационной работе схемы заземления опор контактной сети приводит к снижению максимальных значений напряжения прикосновения на 25 % по сравнению с традиционной схемой заземления опор.

Сравнение значений токов короткого замыкания, возникающих на межподстанционной зоне, оборудованной предлагаемой системой заземления опор со значениями токов КЗ при использовании традиционной системы заземления опор, показывает существенный прирост тока (Рисунок 15).

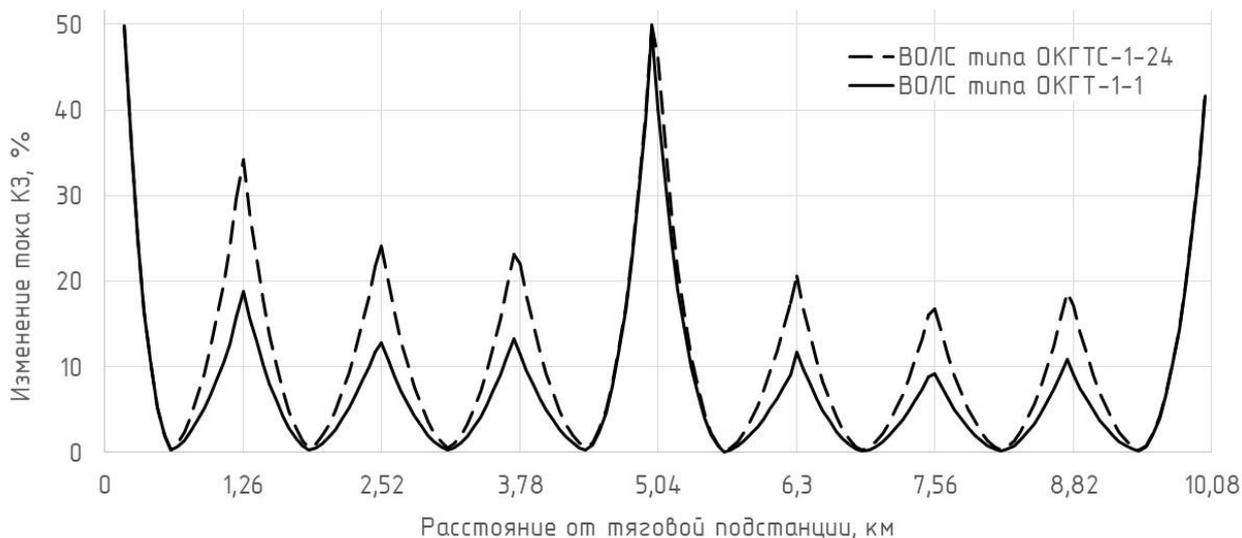


Рисунок 15 – Изменение тока КЗ при двухуровневой схеме заземления, подвеска М120+2МФ100, ТГЗ – АС–95, двустороннее питание

Ток в конце защищаемой зоны возрастает в зависимости от типа применяемых ОКГТ и ТГЗ в среднем на 25–30 %, для приведённых на Рисунке 15 характеристик межподстанционной зоны максимальный прирост составил 50 %.

Наличие дополнительных точек соединения позволило увеличить токи в конце защищаемой зоны, что явилось результатом снижения сопротивления петли короткого замыкания, а именно той его части, которая образуется

сопротивлением пути обратного тока, что позволит существенно повысить эффективность работы релейной защиты.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) На основе анализа проведённых исследований установлено, что решающий вклад в формирование полного сопротивления петли короткого замыкания вносит удельное сопротивление троса группового заземления опор контактной сети. При этом наибольшее влияние этот факт оказывает на участках железной дороги постоянного тока, удалённых от тяговой подстанции.

2) Разработаны принципы организации дополнительного заземления опор контактной сети на участках постоянного тока, предполагающие использование металлической оболочки волоконно-оптических линий связи, подвешиваемых на опорах контактной сети с полевой стороны и выбран наиболее целесообразный вариант подключения троса группового заземления к ОКГТ.

3) Разработана математическая модель и выполнено моделирование режимов работы системы заземления опор, включающей в себя в качестве дополнительного проводника металлическую оболочку волоконно-оптической линии связи. Использование двухуровневой схемы заземления опор контактной сети позволяет снизить сопротивление петли короткого замыкания, при чём на конце защищаемой зоны такое решение позволяет повысить ток короткого замыкания на 25–30 % по сравнению с традиционной схемой заземления опор.

4) Проведена оценка эффективности применения системы заземления опор, включающей в себя в качестве дополнительного проводника металлическую оболочку волоконно-оптической линии связи, показавшая, что предлагаемая система заземления опор обладает повышенными характеристиками надёжности, по сравнению с традиционной схемой заземления опор. По критерию обеспечения непрерывности пути тока короткого замыкания надёжность предлагаемой системы увеличена в среднем на 16 % по сравнению с традиционной системой.

5) Выполнена оценка влияния токов короткого замыкания, протекающих по металлической оболочке ОКГТ на нормативный срок службы, которая показала, что при принятии решения о возможности применения конкретного типа кабеля ОКГТ в качестве дополнительного проводника в системе группового заземления опор необходимо руководствоваться рассчитанной величиной доли тока КЗ в ОКГТ и временем срабатывания релейной защиты на рассматриваемом участке. Предложен алгоритм проверки волоконно-оптического кабеля на термическую стойкость при использовании системы двухуровневого заземления опор контактной сети.

6) Проведён сравнительный анализ величины напряжения прикосновения для существующей и усовершенствованной систем, который показал, что при двухуровневой системе заземления опор максимальные значения напряжения прикосновения снижаются минимум на 25 % по сравнению с существующей схемой заземления опор.

7) Результаты диссертационного исследования внедрены в филиале АО «Росжелдорпроект» – Ростовском проектно-изыскательском институте «КАВЖЕЛДОРПРОЕКТ» и могут быть использованы при проектировании новых

и модернизации существующих участков электрифицированных железных дорог постоянного тока.

### **Перспективы дальнейших исследований по данной работе.**

Полученные в работе принципы интеграции волоконно-оптической линии связи с системой заземления опор контактной сети могут быть использованы при решении вопроса повышения эффективности системы заземления на переменном токе с исследованием влияния электромагнитных полей на работу кабеля ОКГТ.

Разработанная технология повышения эффективности системы заземления путём интеграции с волоконно-оптической линией связи открывает перспективу применения кабеля ОКГТ в качестве канала связи для передачи технологической информации между объектами тягового электроснабжения.

### **Список работ, опубликованных автором по теме диссертации.**

#### ***Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:***

1 **Осипова, А.И.** Моделирование и расчёт токов короткого замыкания в системе постоянного тока с дополнительным тросом группового заземления опор контактной сети / А.И. Осипова, В.А. Осипов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2019. – №4. – С. 127–133. – ISSN 0201-727X.

2 **Осипова, А.И.** Определение показателей надёжности двухуровневой системы группового заземления опор / А.И. Осипова, В.А. Осипов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – №4 (80). – С. 145–150. – DOI:10.46973/0201-727X\_2020\_4\_145.

3 **Осипова, А.И.** Организация плавки гололёда на резервном тросе двухуровневой системы заземления опор на примере участка Лазаревская – Якорная щель / А.И. Осипова, В.А. Осипов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – №1 (81). – С. 161–168. – DOI:10.46973/0201-727X\_2021\_1\_161.

4 **Осипова, А.И.** Варианты подключения волоконно-оптической линии связи к тросу группового заземления / А. И. Осипова, В.А. Осипов, В.Н. Носков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – №1(85). – С. 153–159. – DOI: 10.46973/0201-727X\_2022\_1\_153.

5 **Осипова, А.И.** Сопротивление системы группового заземления и его влияние на чувствительность релейной защиты / А. И. Осипова, В. А. Осипов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – №4 (88). – С. 161–169. – DOI: 10.46973/0201-727X\_2022\_4\_161.

6 **Осипова, А.И.** Обеспечение термической стойкости волоконно-оптического кабеля, входящего в систему двухуровневого заземления опор // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – №1 (89). – С. 274–281. – DOI: 10.46973/0201-727X\_2023\_1\_274.

7 **Осипова, А.И.** Расчёт токов короткого замыкания в тяговой сети постоянного тока при использовании двухуровневой системы группового заземления опор / А.И. Осипова, Ю.И. Жарков // Инженерный вестник Дона. – 2023. – № 6. – [ivdon.ru/ru/magazine/archive/nby2023/8489](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/nby2023/8489).

*Публикация в издании, входящем в международную реферативную базу цитирования SCOPUS:*

8 **А.И. Осипова** Modeling and calculation of SC currents for alternative group grounding system for the dc contact line supports / A.I. Osipova, V.A. Osipov // Journal of physics Conference series. "Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling 2021, ITMM 2021- Mathematical Modeling in the Socio-Economic and Informational Spheres" Том 2131. 2021. – DOI: 10.1088/1742-6596/2131/4/042067.

*Публикации в научных журналах и сборниках научных трудов:*

9 **Осипова, А.И.** Повышение надёжности и безопасности работы системы заземления опор контактной сети на участках постоянного тока // Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции «Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи». – Ростов-на-Дону: ФГБОУ ВО РГУПС, 2019. – С. 91–93.

10 **Осипова, А.И.** Организация группового заземления опор на участках постоянного тока // Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции «Транспорт: наука, образование, производство» (Транспорт–2019). Т. 4 Технические и естественные науки. – Ростов-на-Дону: ФГБОУ ВО РГУПС, 2019. – С. 98–101.

11 **Осипова, А.И.** Особенности расчёта токов короткого замыкания в тяговых сетях постоянного тока / А.И. Осипова, В.А. Осипов // Сборник научных трудов Всероссийской национальной научно-практической конференции «Современное развитие науки и техники» (Наука–2020). – Ростов-на-Дону: ФГБОУ ВО РГУПС, 2020. – С. 271–274.

12 **Осипова, А.И.** Комплексный подход к организации системы группового заземления опор контактной сети на железных дорогах постоянного тока / А.И. Осипова, В.А. Осипов // Сборник научных трудов IV Международной научно-практической конференции «Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи». – Ростов-на-Дону: ФГБОУ ВО РГУПС, 2020. – С. 6–8.

13 **Осипова, А.И.** К вопросу о борьбе с гололёдообразованием на волоконно-оптических линиях связи, используемых для группового заземления опор / А.И. Осипова, В.А. Осипов // Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции «Транспорт: наука, образование, производство» (Транспорт–2020). – Ростов-на-Дону: ФГБОУ ВО РГУПС, 2020. – С. 155–158.

14 **Осипова, А.И.** Двухуровневая система группового заземления опор контактной сети постоянного тока / А.И. Осипова, В.А. Осипов // Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции «Транспорт: наука, образование, производство» (Транспорт–2021). Т.2 Технические науки. – Ростов-на-Дону: ФГБОУ ВО РГУПС, 2021. – С. 75–78.

15 **Осипова, А.И.** Особенности организации альтернативной схемы заземления опор контактной сети постоянного тока / А.И. Осипова, В.А. Осипов // Сборник научных трудов V Международной научно-практической конференции «Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи». – Ростов-на-Дону: ФГБОУ ВО РГУПС, 2021. – С. 45–47.

16 **Осипова, А.И.** Оценка влияния токов в металлической оболочке ВОЛС на его деградацию / А.И. Осипова, В.А. Осипов // Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции «Транспорт: наука,

образование, производство» (Транспорт–2022) Т. 4 Технические и естественные науки. – Ростов-на-Дону: ФГБОУ ВО РГУПС, 2022. – С. 37–41.

17 **Осипова, А.И.** Дополнительное заземление опор контактной сети постоянного тока на металлическую оболочку волоконно-оптических линий связи/ А.И. Осипова, Ю.И. Жарков // Сборник «Труды Ростовского государственного университета путей сообщения» публикация 14-й Международной научно-практической конференции «Перспективы развития локомотиво-, вагоностроения и технологии обслуживания подвижного состава». – Ростов-на-Дону: ФГБОУ ВО РГУПС, 2022. – № 4 (61). – С. 157–162. ISSN: 1818-5509.

18 **Осипова, А.И.** Варианты организации волоконно-оптических линий связи на электрифицированных железных дорогах /А.И. Осипова, Ю.И. Жарков // Сборник научных трудов VII Международной научно-практической конференции «Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи». – Ростов-на-Дону: ФГБОУ ВО РГУПС, 2023. – С. 67–70.

19 **Осипова, А.И.** Предполагаемые капитальные и эксплуатационные затраты на внедрение дополнительного заземления опор контактной сети на участках постоянного тока на металлическую оболочку ВОЛС // Сборник научных трудов VII Международной научно-практической конференции «Энергетика транспорта. Актуальные проблемы и задачи». – Ростов-на-Дону: ФГБОУ ВО РГУПС, 2023. – С. 100–103.

**Личный вклад соискателя.** Основные положения и результаты исследований получены автором самостоятельно. Статьи [6, 9, 10, 19] подготовлены единолично. Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве: [2] разработка методики расчёта надёжности системы дополнительного заземления; [3, 13] предложение метода плавки гололёда; [4, 5, 12, 14, 15, 17, 18] участие в постановке задач и исследованиях; [7, 11] разработана методика расчёта токов короткого замыкания в случае группового заземления опор контактной сети; [1, 8] – анализ и интерпретация выполненных расчётов токов короткого замыкания и организация системы группового заземления опор контактной сети на железных дорогах постоянного тока; [16] – разработка оценки влияния токов в металлической оболочке ВОЛС на его деградацию.

**Осипова Анна Ивановна**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ЗАЗЕМЛЕНИЯ ОПОР  
КОНТАКТНОЙ СЕТИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ПОСТОЯННОГО ТОКА  
НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЦИИ С ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИЕЙ СВЯЗИ**

Подписано в печать 30.06.2023. Формат 60×84/16.  
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ.л.1,4.  
Тираж 100 экз. Заказ №

Редакционно-издательский центр ФГБОУ ВО РГУПС

Адрес университета: 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка  
Народного Ополчения, д.2