

Капкаев Андрей Андреевич

**ИНТЕГРАЦИЯ ЭКРАНИРУЮЩЕГО ПРОВОДА В СИСТЕМЕ
ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
С ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИЕЙ СВЯЗИ**

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Ростов-на-Дону
2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ростовском государственном университете путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС) на кафедре «Теоретические основы электротехники».

Научный руководитель: Осипов Владимир Александрович
кандидат технических наук, доцент, заведующий
кафедрой «Теоретические основы электротехники»
ФГБОУ ВО РГУПС

**Официальные
оппоненты:** Косарев Александр Борисович – доктор
технических наук, профессор, первый заместитель
генерального директора АО «Научно-
исследовательский институт железнодорожного
транспорта» (АО «ВНИИЖТ»)

Григорьев Николай Потапович – кандидат
технических наук, профессор кафедры «Системы
электрооборудования» ФГБОУ ВО «Дальневосточный
государственный университет путей сообщения»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Российский университет транспорта (МИИТ)»

Защита состоится «19» февраля 2018 г. в 14:00 часов на заседании
диссертационного совета Д 218.010.01 при ФГБОУ ВО «Ростовский
государственный университет путей сообщения» по адресу: 344038, г. Ростов-на-
Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2, конференц-
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 «_____» _____ 2017 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 218.010.01
доктор технических наук, профессор

В.А. Соломин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Электрические железные дороги Российской Федерации занимают второе место по протяженности в мире, а годовое потребление электроэнергии составляет несколько десятков млрд. кВт·ч электроэнергии, таким образом, каждый процент экономии энергоресурсов в этой области позволит получить весомый экономический эффект. Высокую актуальность имеет задача снижения потерь электрической энергии в тяговой сети электрических железных дорог переменного тока и снижение эксплуатационных затрат. Одним из способов достижения данных задач является электрическое усиление тяговой сети за счет применения дополнительных проводников. Это позволит получить целый ряд положительных результатов: снижение экономических расходов, электрическое усиление тяговой сети, увеличение пропускной способности участка железной дороги, электрифицированной на переменном токе, экономия энергетических ресурсов и т.д. Однако решение подобной задачи содержит определенные сложности технического характера, одной из которых является сложность преобразования существующей контактной сети как технического комплекса. В частности, применение дополнительных проводников приводит к увеличению статей эксплуатационных расходов, а в случае малых размеров движения по участку является контрпродуктивным. В связи с этим необходима разработка технических подходов, позволяющих улучшить показатели энергетической эффективности участков электрических железных дорог с минимальными затратами на строительство и малыми изменениями статей эксплуатационных расходов. Применение в качестве дополнительного экранирующего проводника тяговой сети специализированного кабеля, совмещающего в себе функции проводника обратного тока и волоконно-оптической линии связи, позволяет уменьшить потребление электроэнергии на тягу поездов и снизить эксплуатационные расходы. Эффект достигается за счет совмещения функций в одном проводнике и позволяет улучшить эксплуатационную эффективность дополнительного экранирующего проводника тяговой сети.

Подобный подход позволяет произвести унификацию оборудования тяговой сети. Описанное техническое решение позволяет также снизить расходы на эксплуатацию железнодорожных волоконно-оптических линий передачи путем защиты оптических линий от влияния электромагнитного поля контактной сети и решения проблемы электротермической деградации волоконно-оптических линий связи.

Цель диссертационной работы. Целью диссертационной работы является совершенствование тяговой сети, позволяющее улучшить эксплуатационные и энергетические показатели устройств электроснабжения электрических железных дорог переменного тока.

Для достижения цели поставлены и решены следующие задачи.

1. Произведено экспериментальное исследование оптического кабеля, смонтированного в грозозащитный трос (ОКГТ) с целью изучения термической стойкости с разработкой концептуальных рекомендаций к его конструкции при эксплуатации в тяговой сети.

2. Выполнен сравнительный анализ режимов работы кабелей ОКСН (оптический кабель самонесущий) и ОКГТ в качестве волоконно-оптических линий передачи железнодорожного транспорта (ВОЛП ЖТ) по критерию надежности.

3. Разработаны методы и принципы выбора кабеля ОКГТ для работы в системе тяговой сети с комбинированным экранирующим проводом (ТС КЭП) исходя из максимальных токовых нагрузок на кабель.

4. Предложено решение задачи плавки гололеда на экранирующих проводах за счет выбора эффективных электрических схем плавки гололеда и профилактического подогрева.

Научная новизна.

1. Разработаны методы и принципы выбора комбинированного экранирующего провода по критерию термической стойкости при различных режимах работы участков электрифицированной железной дороги.

Теоретическая значимость.

1. Разработаны методы и принципы выбора металлизированного волоконно-оптического кабеля для его работы в качестве комбинированного экранирующего проводника тяговой сети в системе ТС КЭП.

2. Выполнено математическое моделирование электрических параметров ТС КЭП.

3. Анализ параметров ТС КЭП позволил выявить наиболее эффективные схемы плавки гололеда для тяговых сетей с экранирующими проводниками.

Практическая значимость.

1. Разработана конструкция тяговой сети, защищённая патентом на изобретение.

2. Применение системы ТС КЭП позволяет произвести улучшение эксплуатационных и энергетических показателей для участков электрических железных дорог переменного тока. Использование же экранирующего проводника, в качестве оптоволоконной линии связи, позволяет существенно снизить расходы при реализации системы.

3. Использование кабеля ОКГТ в качестве волоконно-оптической линии связи в системах ВОЛП ЖТ позволяет полностью защитить линию связи от электромагнитного влияния контактной сети.

4. Рассмотрен индукционный метод плавки гололеда на экранирующих проводниках тяговой сети и обоснованы наиболее эффективные схемы для реализации плавки и профилактического подогрева.

5. Область применения предложенной системы распространяется не только на существующие участки железных дорог переменного тока, но и на вновь проектируемые.

Методы исследования. В процессе диссертационного исследования использовались теоретические методы (многофакторное математическое и компьютерное моделирование) и экспериментальные (физическое моделирование).

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Результаты экспериментальных исследования кабеля ОКГТ на предмет термической стойкости и рекомендации к выбору конструкции кабеля.

2. Результаты сравнительного анализа режимов работы диэлектрического ОКШН и металлического ОКГТ в качестве линий ВОЛП ЖТ.

3. Методы и принципы выбора кабеля ОКГТ для работы в составе ТС КЭП.

4. Метод плавки гололеда на экранирующих проводах и эффективные электрические схемы плавки гололеда.

Достоверность полученных результатов.

1. В диссертации корректно использованы фундаментальные законы и математический аппарат для решения поставленных задач, что подтверждено на компьютерных моделях.

2. Основные выводы диссертации согласуются с результатами известных работ по данному научному направлению и подтверждены экспериментальным моделированием.

Реализация результатов работы.

Используется при принятии проектных решений в организации ООО «ДонСетьСтройПроект».

Используется при дипломном и курсовом проектировании в ФГБОУ ВО РГУПС.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Результаты диссертационного исследования соответствуют следующему пункту паспорта специальности 05.22.07: п. 4 Совершенствование тяговых сетей.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались: на всероссийском смотре конкурсе научно-технического творчества студентов высших учебных заведений «Эврика-2008» (г. Новочеркасск, ноябрь 2008 г.); на международной-научно практической конференции «Транспорт» (г. Ростов-на-Дону, 2010-2017 гг.); на международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития транспортного комплекса: образование, наука, производство», (Ростов-на-Дону, октябрь 2009 г).

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 19 печатных работ: 1 патент на изобретение модели тяговой сети и 18 статей из них 7 индивидуальных, 3 в журналах, рекомендованных ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка из 85 наименований и 3-х приложений. Работа изложена на 208 страницах в том числе: 155 страниц основного текста, 54 рисунка, 22 таблицы и 53 страницы приложений.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Обоснована актуальность темы; сформулированы цель работы и задачи исследований; выделены: научная новизна, теоретические и практические значимости, основные положения, выносимые на защиту, степень достоверности и обоснованность полученных результатов, приведена также общая структура диссертационной работы.

Первая глава. «Возможности повышения эксплуатационных и энергетических показателей участков электрических железных дорог переменного тока». В первой главе произведен обзор существующих многопроводных сетей, применение которых позволяет улучшить показатели энергоэффективности участков электрических железных дорог переменного тока, с оценкой достоинств и недостатков данных сетей.

По направлению диссертационной работы изучены результаты работы следующих авторов, занимавшихся исследованием многопроводных систем: К.Г. Марквардата, Г.Г. Марквардта, Р.И. Мирошниченко, В.Я. Овласюка, Е.П. Фигурнова, А.С. Бочева, Р.Р. Мамошина, И.В. Павлова, Б.И. Косарева, А.Т.

Буркова, А.В. Котельникова, М.П. Бадера, С.М. Сердинова, С.Д. Соколова, Н.Д. Сухопрудского, Ю.А. Чернова, М.Г. Шалимова.

Произведен анализ влияния существующей на сегодняшний день проблематики электротермической деградации волоконно-оптических линий передачи железнодорожного транспорта (ВОЛП ЖТ) на эксплуатационные показатели участков электрических железных дорог переменного тока.

Электротермическая деградация (ЭТД) возникает вследствие влияния электрического поля, создаваемого контактной сетью. Физически ЭТД проявляется в виде обрыва кабеля, сопровождающегося его обугливанием в месте наложения на него поддерживающего зажима (ЗП), и термического повреждения резиновой вставки ЗП (Рисунок 1 а, б). Помимо подобных повреждений наблюдались точечные вздутия волоконно-оптического кабеля в пролете между опорами контактной сети, вплоть до разрыва поверхностной оболочки. (Рисунок 1 в).

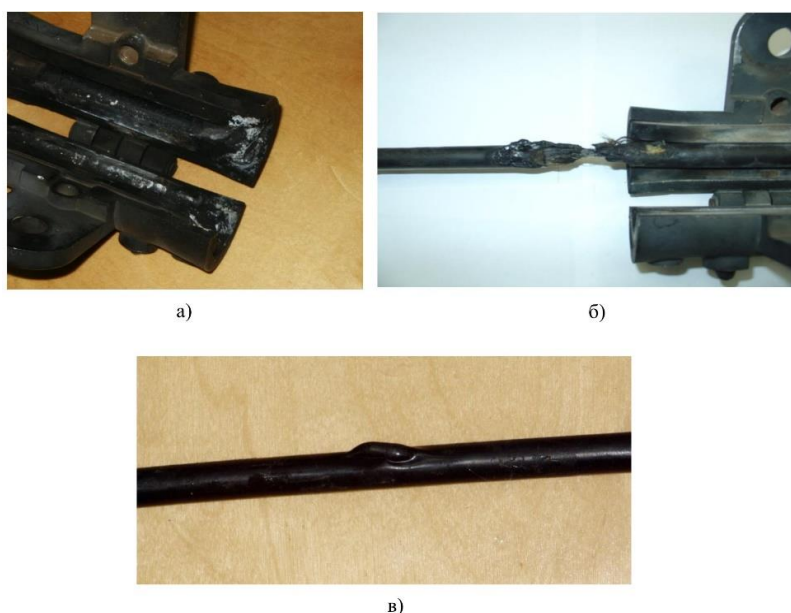


Рисунок 1 – Основные проявления аварийных ситуаций ВОЛП ЖТ: а – обугливание резиновой вставки ЗП; б – обрыв кабеля в районе ЗП; в – вздутие кабеля

Подобные аварийные ситуации существенно снижают эксплуатационные показатели участков электрических железных дорог, так как аварийно-восстановительные работы (АВР) в соответствии с нормативными документами относятся к работам со снятием напряжения и, следовательно, требуют обесточивания участка контактной сети, на котором производятся АВР.

С целью улучшения энергетических и эксплуатационных показателей электрических железных дорог переменного тока в работе предложено совмещение функций экранирующего проводника и волоконно-оптической линии передачи ж/д транспорта (ВОЛП ЖТ) в одном проводнике, комбинированном экранирующем проводе (КЭП). Подобное решение позволяет существенно снизить затраты на строительство, эксплуатационные расходы и решить проблему ЭТД. Для подобного технического решения подходят получившие в последние годы широкое применение кабели с оптическими волокнами, встроенными в грозозащитный трос (ОКГТ) с

центральным расположением оптических модулей ОКГТ-ц (Рисунок 2 а) и спиральным расположением оптического модуля ОКГТ-с (Рисунок 2 б).

Описываемое решение позволяет реализовать унификацию железнодорожных устройств. При этом следует отметить, что данное решение не особо влияет на взаимодействие структурных подразделений РЖД при проведении технического обслуживания, так как проводники ВОЛП ЖТ и так входят в сферу ответственности энергетического участка ЭЧ.

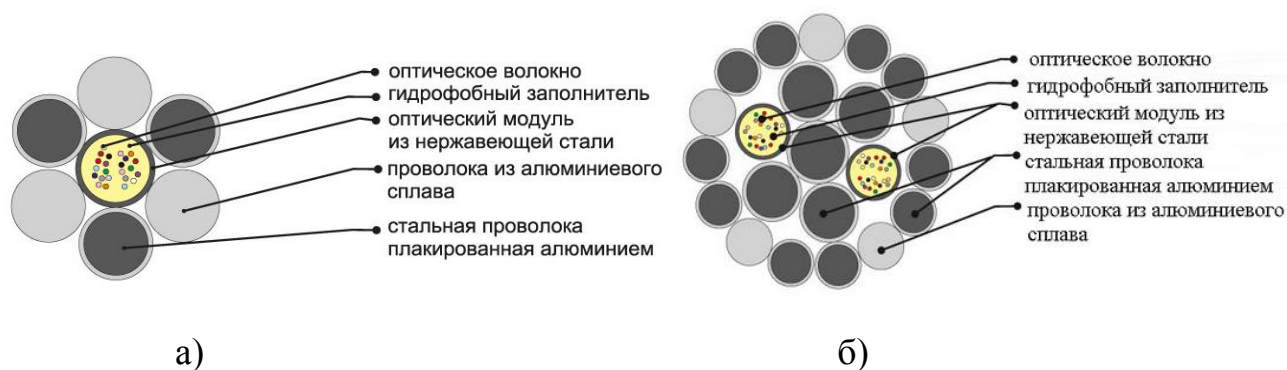


Рисунок 2 – Модификации кабелей ОКГТ. а) – ОКГТ-ц; б) – ОКГТ-с

Для оценки изменений показателей энергетической эффективности было проведено моделирование однопутного участка электрических железных дорог СКЖД «Зимовники - Тихорецкая» в программном комплексе «Кортес». Программный комплекс «Кортес» разработан на базе ВНИИЖТа Марским В.Е. и принят в компании ОАО РЖД за основной программный комплекс моделирования систем тягового электроснабжения.

Для одного и того же участка электрических железных дорог, с одинаковым графиком движения поездов при моделировании изменялся лишь один параметр – тип тяговой сети. В частности, были рассмотрены три варианта тяговой сети, стандартная тяговая сеть (ТС), тяговая сеть с экранирующим проводником (ТСЭ), тяговая сеть с усиливающим и экранирующим проводниками (ТС ЭУП).

В результате моделирования было определено, что применение экранирующего проводника позволяет улучшить показатели энергетической эффективности участка электрических железных дорог переменного тока. Применение тяговой сети с экранирующим проводом позволило снизить среднесуточный расход энергии участка на 1 % (3930кВА·ч), а применение системы с ЭУП на 3 % (11101 кВА·ч). При применении системы ТС ЭП значение минимального напряжения на моделируемом участке возросло на 4 % (0,9 кВ) при применении системы ЭУП на 10 % (2,1 кВ). Увеличение минимального напряжения позволяет либо увеличить скорость движения поездов (с учетом ограничений профиля), либо увеличить число поездов. Среднесуточные потери на моделируемом участке снизились на 7,5 % (315 кВт·ч), при применении ЭУП на 17,7 % (732 кВт·ч).

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что система тяговой сети с экранирующим проводом (ТСЭ) позволяет улучшить показатели энергетической эффективности участка электрических железных дорог переменного тока. По анализируемым показателям система ТСЭ конечно

проигрывает системе ТС ЭУП. Однако система с экранирующим проводом требует подвески только одного дополнительного проводника, находящегося с полевой стороны. При этом экранирующий проводник является заземленным объектом, что сказывается на простоте обслуживания в плане охраны труда.

Однако применение дополнительных проводников тяговой сети зачастую оправдано при значительных размерах движения поездов по участку электрических железных дорог. К примеру, если на участке электрических железных дорог размеры движения незначительные, то и экономия электрической энергии, полученная за счет применения дополнительного проводника, становится незначительной. Таким образом, все неудобство кроется в трудностях экономической оценки целесообразности применения многопроводных систем. Одним из вариантов снижения затрат и повышения эффективности работы является совмещение в дополнительном проводнике разнородных функций или комбинирование функций.

В результате обзора и предварительного анализа вопросов диссертационного исследования поставлены задачи, решаемые в дальнейшем исследовании.

Вторая глава. «Сопротивление тяговой сети переменного тока с экранирующим проводом выполненным кабелем ОКГТ». В главе приводятся основные математические соотношения, описывающие электрические характеристики тяговой сети с экранирующим проводом, выполненным кабелем ОКГТ.

В процессе моделирования тяговой сети рассматривался предыдущий опыт использования экранирующих проводников, а именно: системы с отсасывающими трансформаторами, системы с экранирующим и усиливающим проводом.

Получены математические модели определения эквивалентного сопротивления тяговой сети с экранирующим проводником, выполненным кабелем ОКГТ, с учетом диспозиции проводников в пространстве для однопутного и двухпутного участков. В автореферате рассматривается только двухпутный участок как наиболее сложный в плане моделирования случай. Математические модели определения эквивалентного сопротивления тяговой сети с экранирующими проводниками ОКГТ с учетом диспозиции проводников в пространстве приведены для *двухпутного участка* (Рисунок 3), для случаев:

- 1) нахождения расчетного поезда на удалении от тяговой подстанции;
- 2) нахождения расчетного поезда вблизи тяговой подстанции.

При моделировании параметров тяговой сети двухпутного участка с экранирующими проводниками Э1 и Э2 (Рисунок 3) рассматривалась схема с раздельным питанием контактных подвесок обоих путей. При этом был принят ряд допущений:

- контактные подвески и рельсовые цепи соседних путей двухпутного участка выполнены из одинаковых проводников и рельсов соответственно;
- геометрическое расположение проводников первого и второго пути включая экранирующие проводники имеют одинаковые значения;
- токи в контактных подвесках, имеют одинаковое направления;
- токи в рельсовых цепях имеют одинаковое направление;
- токи в экранирующих проводниках, завешенных с полевой стороны первого и второго путей, имеют одинаковые направления;
- оба пути располагаются на одинаковом профиле земной поверхности.

При моделировании не принималось допущение о равенстве взаимоиндуктивных сопротивлений между различными контурами «проводник-земля». Отсутствие подобных допущений позволяет повысить точность расчётных результатов.

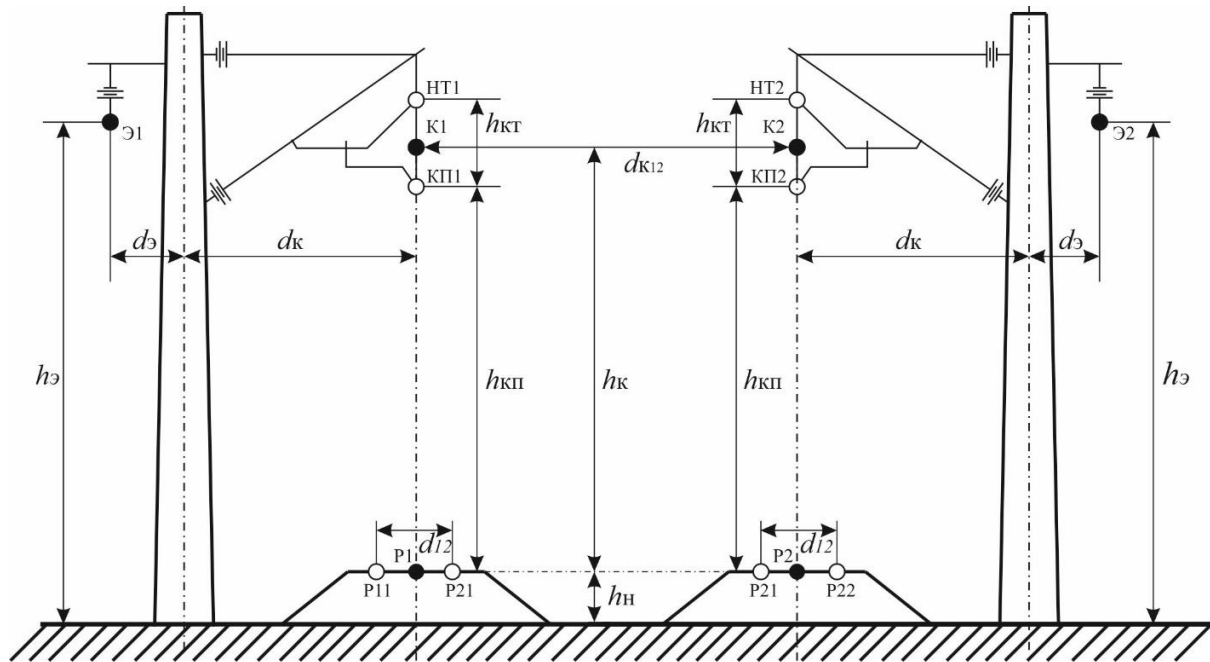


Рисунок 3 – Двухпутный участок тяговой сети с экранирующими проводниками ОКГТ и указанными расчетными геометрическими параметрами

1) Нахождение поезда на удалении от тяговой подстанции:

– эквивалентное сопротивление тяговой сети:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{\text{ЭТС1}} = & \underline{Z}_{\text{К}} - \underline{Z}_{\text{КР}} + \frac{\dot{I}_{\text{P1}}}{\dot{I}_{\text{K1}}} (\underline{Z}_{\text{Р}} - \underline{Z}_{\text{КР}}) + \frac{\dot{I}_{\text{P2}}}{\dot{I}_{\text{K1}}} (\underline{Z}_{\text{РР}} - \underline{Z}_{\text{КР1}}) + \frac{\dot{I}_{\text{K2}}}{\dot{I}_{\text{K1}}} (\underline{Z}_{\text{КК}} - \underline{Z}_{\text{КР1}}) - \\ & - \frac{\dot{I}_{\text{Э1}}}{\dot{I}_{\text{K1}}} (\underline{Z}_{\text{КЭ}} - \underline{Z}_{\text{РЭ}}) - \frac{\dot{I}_{\text{Э2}}}{\dot{I}_{\text{K1}}} (\underline{Z}_{\text{КЭ1}} - \underline{Z}_{\text{РЭ1}}) \end{aligned} ;$$

В данном выражении: $\underline{Z}_{\text{КР}}$, $\underline{Z}_{\text{РЭ}}$, $\underline{Z}_{\text{КЭ}}$ – соответственно сопротивления взаимоиנדукции между контурами «контактная сеть-земля» и «рельс-земля», «рельс-земля» и «экранирующий провод-земля», «контактная сеть-земля» и «экранирующий провод-земля» проводников 1-ого пути или 2-ого пути с учетом принятых допущений; $\underline{Z}_{\text{К1Э2}} = \underline{Z}_{\text{К2Э1}} = \underline{Z}_{\text{КЭ1}}$, $\underline{Z}_{\text{Р1Э2}} = \underline{Z}_{\text{Р2Э1}} = \underline{Z}_{\text{РЭ1}}$, $\underline{Z}_{\text{К1Р2}} = \underline{Z}_{\text{К2Р1}} = \underline{Z}_{\text{КР1}}$ – сопротивления взаимоиנדукции между соответствующими контурами проводник земля согласно указанным индексам; $\underline{Z}_{\text{К}}$, $\underline{Z}_{\text{Р}}$ – сопротивление контура «контактная сеть – земля», «рельсовая цепь – земля»; $\underline{Z}_{\text{РР}}$, $\underline{Z}_{\text{КК}}$ – сопротивления взаимоиנדукции между контурами проводников «Р1 – земля» и «Р2 – земля», «К1 – земля» и «К2 – земля» соответственно.

– величина тока в рельсовых цепях и комбинированных экранирующих проводниках;

$$\dot{I}_{\text{P1}} = \dot{I}_{\text{K1}} \frac{A_1 + A_3 B_1}{1 - A_3 B_3} \pm \dot{I}_{\text{K2}} \left(\frac{A_2 + A_3 B_2}{1 - A_3 B_3} \right); \dot{I}_{\text{P2}} = \dot{I}_{\text{K1}} \frac{B_1 + B_3 A_1}{1 - A_3 B_3} \pm \dot{I}_{\text{K2}} \left(\frac{B_2 + A_2 B_3}{1 - A_3 B_3} \right);$$

$$\dot{I}_{\Sigma 1} = \dot{I}_{K1} \frac{C_1 + C_3 D_1}{1 - C_3 D_3} \pm \dot{I}_{K2} \left(\frac{C_2 + C_3 D_2}{1 - C_3 D_3} \right); \dot{I}_{\Sigma 2} = \dot{I}_{K1} \frac{D_1 + D_3 C_1}{1 - D_3 C_3} \pm \dot{I}_{K2} \left(\frac{D_2 + D_3 C_2}{1 - D_3 C_3} \right).$$

В приведенных выражениях: A_1, A_2, A_3 - коэффициенты заменяющие соотношения сопротивлений «проводник-земля» и сопротивления взаимной индукции в уравнении определяющем величину тока $\dot{I}_{P1}$ относительно $\dot{I}_{K1}, \dot{I}_{K2}, \dot{I}_{P2}$; B_1, B_2, B_3 - коэффициенты заменяющие соотношения сопротивлений «проводник-земля» и сопротивления взаимной индукции в уравнении определяющем величину тока $\dot{I}_{P2}$ относительно $\dot{I}_{K1}, \dot{I}_{K2}, \dot{I}_{P1}$; C_1, C_2, C_3 - коэффициенты заменяющие соотношения сопротивлений «проводник-земля» и сопротивления взаимной индукции в уравнении определяющем величину тока $\dot{I}_{\Sigma 1}$ относительно $\dot{I}_{K1}, \dot{I}_{K2}, \dot{I}_{\Sigma 2}$; D_1, D_2, D_3 - коэффициенты заменяющие соотношения сопротивлений «проводник-земля» и сопротивления взаимной индукции в уравнении определяющем величину тока $\dot{I}_{\Sigma 2}$ относительно $\dot{I}_{K1}, \dot{I}_{K2}, \dot{I}_{\Sigma 1}$;

2) Нахождение расчетного тока вблизи тяговой подстанции:

– эквивалентное сопротивление тяговой сети:

$$Z_{\Sigma TC1} = Z_K + Z_P - 2Z_{KP} + \frac{\dot{I}_{K2}}{\dot{I}_{K1}} (Z_{KK} + Z_{PP} - 2Z_{KP}) - \frac{\dot{I}_{\Sigma 1}}{\dot{I}_{K1}} (Z_{K\Sigma} - Z_{P\Sigma}) - \frac{\dot{I}_{\Sigma 2}}{\dot{I}_{K1}} (Z_{K\Sigma 1} - Z_{P\Sigma 1});$$

– отношение величины тока в экранирующих проводниках и контактной сети;

$$\frac{\dot{I}_{\Sigma 1}}{\dot{I}_{K1}} = \frac{Z_{\Sigma 2} (Z_{K\Sigma} - Z_{P\Sigma}) - Z_{\Sigma \Sigma} (Z_{K\Sigma 1} - Z_{P\Sigma 1})}{Z_{\Sigma 1} Z_{\Sigma 2} - Z_{\Sigma \Sigma}^2} + \frac{\dot{I}_{K2}}{\dot{I}_{K1}} \cdot \frac{Z_{\Sigma 2} (Z_{K\Sigma 1} - Z_{P\Sigma 1}) - Z_{\Sigma \Sigma} (Z_{K\Sigma} - Z_{P\Sigma})}{Z_{\Sigma 1} Z_{\Sigma 2} - Z_{\Sigma \Sigma}^2};$$

$$\frac{\dot{I}_{\Sigma 2}}{\dot{I}_{K1}} = \frac{Z_{\Sigma 1} (Z_{K\Sigma 1} - Z_{P\Sigma 1}) - Z_{\Sigma \Sigma} (Z_{K\Sigma} - Z_{P\Sigma})}{Z_{\Sigma 1} Z_{\Sigma 2} - Z_{\Sigma \Sigma}^2} + \frac{\dot{I}_{K2}}{\dot{I}_{K1}} \cdot \frac{Z_{\Sigma 1} (Z_{K\Sigma} - Z_{P\Sigma}) - Z_{\Sigma \Sigma} (Z_{K\Sigma 1} - Z_{P\Sigma 1})}{Z_{\Sigma 1} Z_{\Sigma 2} - Z_{\Sigma \Sigma}^2}.$$

В приведенном выражении $Z_{\Sigma 1}, Z_{\Sigma 2}$ – сопротивление контуров «Э1 – земля», «Э2 – земля»; $Z_{\Sigma \Sigma}$ – сопротивление взаимной индукции между контурами «Э1 – земля» и «Э2 – земля»;

Отношение токов контактных сетей $\dot{I}_{K1} / \dot{I}_{K2}$ в дальнейшем обозначено коэффициентом β . Значение данного коэффициента описывает отношение токов контактной сети обоих путей как по величине так и по направлению.

Полученные теоретические выражения позволяют не только определить величину эквивалентного сопротивления тяговой сети, но и определить величину тока, индуцированного в рельсовых цепях и экранирующих проводниках. Произведена оценка и сравнение численных значений погонных сопротивлений тяговых сетей разных конструкций: стандартная тяговая сеть 25 кВ, тяговая сеть с экранирующим проводом ОКГТ ТСУ, сеть с усиливающим проводом ТСУ, сеть с экранирующим и усиливающим проводом ТСУ ЭУП, таблица 1.

Таблица 1 – Сравнительные отношения погонного сопротивления ТСУ с сопротивлениями систем ТСУ, ТСУ, ТСУ ЭУП.

$Z_{ТС} / Z_{ТСЭ}$	$Z_{ТС} / Z_{ТСУ}$	$Z_{ТС} / Z_{ТСУЭ}$
1,11	1,31	1,586

В главе приведены электрические характеристики тяговых сетей с экранирующим проводом ОКГТ различных расчетных диаметров однопутного и двухпутного участка при различной конфигурации проводников тяговой сети.

Третья глава. «Экспериментальное исследование оптического кабеля типа ОКГТ на предмет термической стойкости». Данная глава посвящена экспериментальному исследованию электро- и теплофизических процессов, протекающих в структуре кабеля ОКГТ при протекании по нему токов большой величины в стационарном режиме. В главе приводятся результаты экспериментального моделирования процесса плавки гололёда на кабеле ОКГТ. В качестве объекта испытаний используется кабель марки ОКГТ-Ц расчетного диаметра $d_{\text{ОКГТ-Ц}} = 11$ мм.

Кабели марки ОКГТ в основном используются на высоковольтных линиях электропередачи в качестве грозозащитных тросов и выполняют роль защитного проводника и магистральной линии связи. В стационарном режиме работы электрический ток, протекающий в грозозащитном тросе ОКГТ, носит чисто индуцированный характер, а его значение близко к нулю, т.к. трехфазная линия электропередачи оказывает преимущественно симметричное магнитное влияние на ОКГТ. Вследствие этого кабель ОКГТ никогда не использовался в качестве основного токоведущего проводника. При применении кабеля ОКГТ в качестве экранирующего проводника тяговой сети по нему постоянно будет протекать электрический ток, индуцируемый магнитным влиянием однофазных проводников контактной сети. При этом в структуре кабеля находятся оптические волокна, для которых перегрев свыше допустимой температуры (80°C) приведет к разрушению оптического отражающего слоя и критическому затуханию сигнала.

Для исследования теплофизических процессов в структуре кабеля ОКГТ использовался термоэлектрический метод измерения при помощи термопар. Исследования проводились для режима плавки гололёда при плотном облепании кабеля ледяной муфтой и при полном отсутствии льда при температуре гололёдообразования

Рисунок 4.

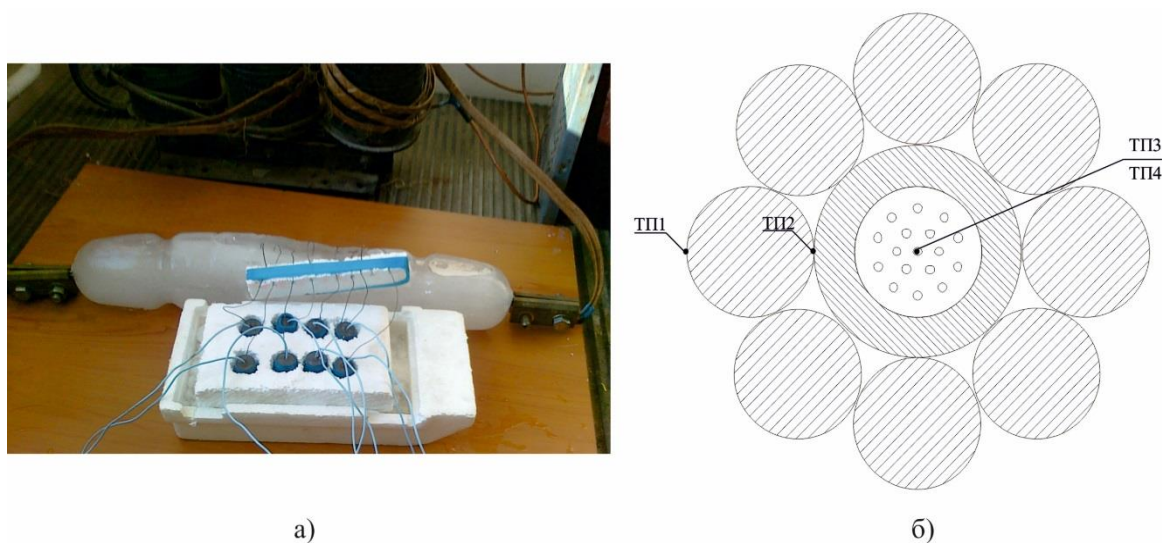


Рисунок 4– Экспериментальное исследование теплофизических процессов в кабеле ОКГТ при протекании токов большой величины. а) измерение температуры различных слоев кабеля, находящегося в ледяной оболочке. б) расположение термопар в структуре кабеля ОКГТ-Ц

При исследовании температуры центрального слоя кабеля ОКГТ, находящегося в плотной ледяной оболочке, был выявлен следующий факт: при плотном облепании кабеля ОКГТ льдом даже при токах в 300-400 А температура модуля не достигает критической отметки из-за процесса плавки льда и стекания водяных капель, что способствует процессу охлаждения модуля. Подобные значения тока для испытуемого кабеля без ледяной оболочки являются критическими. Однако, как известно, при возникновении гололеда его распределение по кабелю будет неравномерным, что может привести к тому, что кабель в некоторых участках не будет покрыт гололедом. Таким образом, исследование температурного режима кабеля сводится к определению предельного длительного тока, который может протекать по кабелю ОКГТ и при котором температура центрального модуля будет меньше 80°C . Как было сказано выше, измерения проводились при температуре окружающей среды $t = 0 - 1^{\circ}\text{C}$, т.е. температуры, близкой к нулю, что и является температурой образования гололёда. В результате исследований была выявлена также температурная аномалия, проявляющаяся в виде резкой неравномерности температурного поля в структуре кабеля (Рисунок 5). Распределение температурного поля, показанное на Рисунке 5, на первом этапе исследований привело к мнению о наличии ошибки или неправильных методах исследований. Однако, повторные испытания и изучение кривых остывания при отсутствии электрического тока, позволили убедиться в наличии неравномерного распределения температурного поля. Подобная неравномерность температур является негативным фактором в контексте рассматриваемой текущей эксплуатации кабеля в составе тяговой сети переменного тока. Речь идет о мониторинге температуры нагрева кабеля ОКГТ в полевых условиях. Неравномерное распределение температуры кабеля может привести к неправильным выводам при проведении текущего мониторинга.

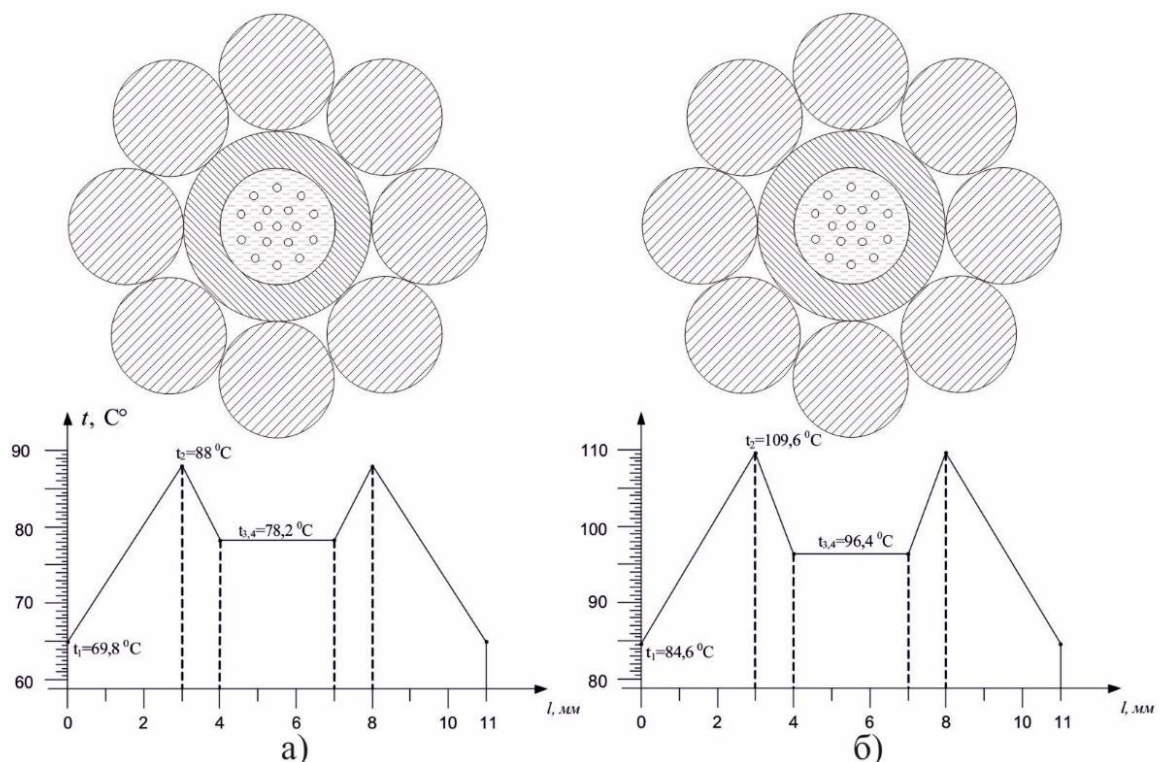


Рисунок 5 – Термограмма структуры волоконно-оптического кабеля типа ОКГТ при протекании: а) переменного тока величиной 210А; б) величиной 220 А

Причиной неравномерного распределения тепловой энергии является высокая разность удельного сопротивления стали и алюминия как компонент входящих в исследуемый кабель. Это приводит к неравномерному распределению плотности тока в структуре кабеля и как следствие к неравномерному нагреву его частей. При этом с увеличением температуры данное неравенство усугубляется за счет температурного изменения величины сопротивления. Кроме того, неравномерный нагрев может вызвать появление внутренних механических повреждений

Для сравнения автором работы были проведены схожие оценочные испытания для кабеля марки ОКГТ-С, имеющего большее сечение (120 мм²) и полностью витую структуру. Испытания показали относительную равномерность температурного поля кабеля при длительном протекании тока. В частности, при критическом перегреве кабеля марки ОКГТ-С градиент температур между поверхностью кабеля и внешней стенкой алюминиевого модуля не превышает 8 °С (Рисунок 6), в случае же ОКГТ-Ц этот градиент достигает около 20 °С.

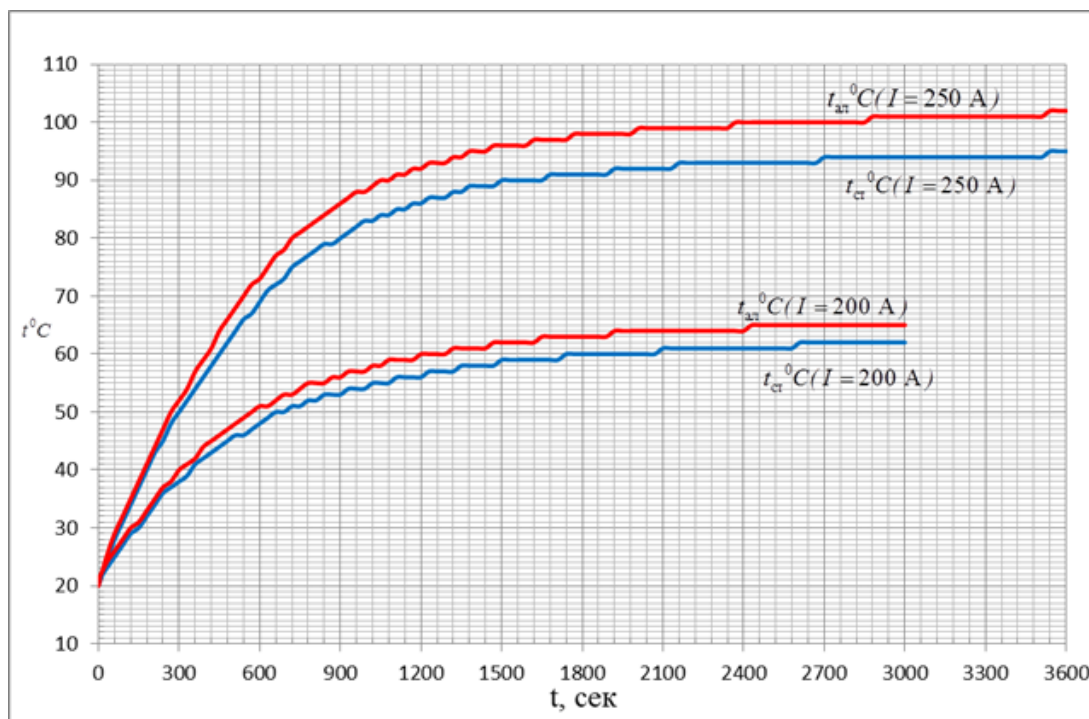


Рисунок 6 – Изменение температуры алюминиевого (оптический модуль) и стального слоев (поверхность) кабеля при $t_{окр.ср.}=20^{\circ}\text{C}$, относительно времени при различных значениях тока

Исходя из экспериментальных данных, были сделаны следующие выводы:

- 1) оптимальной конструкцией кабеля ОКГТ для эксплуатации в тяговой сети в качестве экранирующего проводника является кабель ОКГТ-С;
- 2) при выборе кабеля состав его компонент должен быть максимально однородным;
- 3) при неоднородном составе компонент рекомендуется располагать металлические компоненты, обладающие наибольшей теплопроводностью в верхних слоях кабеля, граничащих с воздухом, либо применять конструкцию, в которой в верхних слоях присутствует несколько ниток повива из материала с высокой теплопроводностью (например, алюминий);

4) определение предельно допустимого тока для случаев режимов борьбы с гололедом необходимо по возможности производить для кабеля с отсутствием ледяной оболочки;

5) при плотном облепании проводника ОКГТ гололедом ток плавки может на короткие промежутки времени превышать допустимый по значению ток.

Для проверки экспериментальных данных и возможности дальнейшего моделирования были произведены расчёты допустимого тока.

$$I_{\text{доп}} = \sqrt{\frac{\sigma \cdot \pi \cdot d \cdot \varepsilon \cdot (T_{\text{доп}}^4 - T_{\text{в}}^4) + \lambda_{\text{в}} \cdot Nu \cdot (T_{\text{доп}} - T_{\text{в}}) \cdot \pi - Q_{\text{сол}}}{R_T}}$$

В приведенном выражении: σ – постоянная Стефана Больцмана Вт·м⁻²·К⁻⁴; d – расчетный диаметр кабеля мм; ε – коэффициент излучения поверхности кабеля по отношению к абсолютно черному телу; $\lambda_{\text{в}}$ – теплопроводность воздуха Вт/(м·К); Nu – число Нуссельта; $T_{\text{в}}$ – температура окружающей среды; $T_{\text{доп}}$ – допустимая температура кабеля; $Q_{\text{сол}}$ – мощность солнечного излучения; R_T – электрическое сопротивление кабеля при температуре $T_{\text{доп}}$.

Для расчёта температурного сопротивления предлагается использовать расчетное соотношение через удельные сопротивления элементов, входящих в кабель ОКГТ, с учетом температурных коэффициентов сопротивлений:

$$R_T = \frac{\rho_{\text{ал}} \rho_{\text{ст}}}{\rho_{\text{ал}} S_{\text{ст}} + \rho_{\text{ст}} S_{\text{ал}}}.$$

Сравнение экспериментальных и расчетных данных при возможном допущении ошибок измерения касающихся параметров окружающей среды при экспериментальных исследованиях показали разницу значений в пределах 3 %.

Четвертая глава. «Анализ технических особенностей применения кабеля ОКГТ в системе тяговой сети переменного тока». Глава посвящена сравнению режимов работы комбинированного экранирующего проводника в качестве линии волоконно-оптической связи. В частности, проводилось сравнение волоконно-оптических линий передачи железнодорожного транспорта, выполненных стандартным диэлектрическим кабелем типа ОКСН (оптический кабель самонесущий) и оптическим кабелем ОКГТ. Сравнение и анализ производился по ряду факторов: 1) технический фактор; 2) фактор качества передачи данных; 3) фактор надежности.

В техническом плане применение кабеля ОКГТ требует изменения типа подвеса кабеля, а также применения специализированной металлической стыковочной муфты типа МОПГ, для диэлектрических кабелей применяется диэлектрическая муфта тупикового типа МТОК. Стоит отметить, что муфты МОПГ, которые подходят для кабелей ОКГТ, позволяют производить стыковку разнородных типов кабелей, в частности, диэлектрического ОКСН и проводящего ОКГТ через изолированную муфту. Это является очень удобным решением, так как позволяет производить ответвления линий связи от трассы электрических железных дорог обычным диэлектрическим кабелем. Результаты сравнения режимов работы по техническому фактору приведены в таблице 2. В рамках оценки фактора качества передачи данных был произведен анализ и исследование влияния электромагнитного поля контактной сети на процесс передачи данных по волоконно-оптическим линиям передачи железнодорожного транспорта.

Таблица 2 –Технические факторы организации ВОЛП ЖТ с разными типами кабеля.

№	Технический фактор	Тип кабеля	
		ОКСН (диэлектрический)	ОКГТ (проводящий)
1	Необходимость заземления	–	+
2	Дополнительные кронштейны	–	+
3	Подвеска на изоляторе	–	+
4	Тип соединительной муфты	МТОК	МОПГ
5	Возможность соединения разнородных кабелей в соответствующей муфте	–	+
6	Необходимость плавки гололеда	–	+

На основании опыта исследований к.т.н. Шестрикова С.В. установлено, что влияние электрического поля на волоконно-оптическую линию связи может привести к увеличению показателя дисперсии линии связи вследствие проявления среднеквадратичного электрооптического эффекта Керра. Эффект Керра заключается в изменении значения показателя преломления оптического материала пропорционально квадрату напряженности приложенного электрического поля E . При этом возникает эффект двойного лучепреломления с появлением «обыкновенного» и «необыкновенного» лучей, распространяющихся с разной скоростью. Разная скорость распространения приводит к появлению разности фаз, вследствие чего на выходе линии при когерентном сложении лучей появляется не плоскополяризованная световая волна, а эллиптически поляризованная. Моделирование картины электрического поля контактной сети и оценка напряженности E с учетом влияния заземленных конструкций для диэлектрического кабеля ОКСН в точке его подвеса показало, что значение E может достигать 20 кВ/м. Значение $E = 20$ кВ/м является достаточным для проявления в кабеле ОКСН эффекта Керра и увеличения дисперсии канала связи на $\tau = 4 \cdot 10^{-11}$ пс/км. В случае применения кабеля ОКГТ проявление эффекта Керра невозможно, так как оптические волокна расположены внутри металлического кабеля, а напряжённость электрического поля внутри проводящего тела равна нулю $E = 0$ кВ/м.

Была произведена оценка влияния магнитного поля контактной сети переменного тока на процесс передачи данных. Влияние магнитного поля на волоконно-оптическую линию связи может привести к проявлению в линии продольного магнитооптического эффекта Фарадея. Эффект Фарадея заключается в изменении положения в пространстве плоскополяризованной световой волны под действием внешнего магнитного поля и её повороте относительно собственной оси на угол:

$$\Theta = \nu H l$$

В данном выражении: H – напряженность магнитного поля; ν – постоянная Верде; l – расстояние проходимое световой волной под влиянием внешнего магнитного поля.

Основываясь на опыте исследований к.т.н. Фадеева К.С. было произведено моделирование и оценка влияния магнитного поля контактной сети переменного

тока на линии ВОЛП ЖТ. В частности, при использовании диэлектрического кабеля ОКСН величина результирующей напряженности магнитного поля оценивалась исходя из расположения влияющих проводников в пространстве с учетом стрел провиса каждого проводника:

$$H_{рез} = H_{кп} \cos(90 - \gamma + \psi_{кп}) + H_{нт} \cos(90 - \gamma + \psi_{нт}) - H_p (90 - \gamma) \pm H_i \cos(90 - \gamma + \psi_i)$$

В приведенном выражении: $\psi_{кп}$, $\psi_{нт}$, ψ_i – угол отклонения проводника (контактный провод, несущий трос, др. проводники) от прямолинейной оси вследствие его провисания, γ – угол отклонения кабеля ВОЛП ЖТ от горизонтальной оси вследствие провисания.

Оценка величины $H_{рез}$ показала, что в штатном режиме работы проводников контактной сети величина напряженности составляет $H_{рез} = 29,5 \div 59,1$ А/м, в случае же возникновения режима короткого замыкания $H_{рез} = 89,562 \div 123,053$ А/м. Данных значений достаточно для проявления в волоконно-оптических линиях передачи ж/д транспорта эффекта Фарадея и, как следствие, снижения скорости передачи данных или проявления ошибок.

В случае применения кабеля ОКГТ проявление эффекта Фарадея становится практически невозможным за счет экранирования магнитного поля металлической оболочкой кабеля ОКГТ. Таким образом применение кабеля ОКГТ для организации волоконно-оптических линий передачи информации позволяет улучшить показатели качества передачи данных за счет защиты линии связи от влияния электромагнитного поля контактной сети.

При оценке фактора надежности отмечено, что применение кабеля ОКГТ позволяет решить существующую проблему электротермической деградации волоконно-оптических линий передачи информации, расположенных на опорах контактной сети с полевой стороны. В итоге следует отметить, что кабель ОКГТ по многим ключевым показателям выигрывает у кабеля ОКСН и, что самое важное, использование кабеля ОКГТ в качестве экранирующего провода позволяет усилить тяговую сеть. Подобную тяговую сеть можно назвать тяговой сетью с комбинированным экранирующим проводом – ТС КЭП.

Пятая глава. «Методы и принципы выбора комбинированного экранирующего провода». Пятая глава посвящена методике выбора комбинированного экранирующего провода, выполненного кабелем ОКГТ для надежного исполнения им функций экранирующего провода и волоконно-оптической линии связи, а также возможным методам реализации режимов борьбы с гололедом на многократно заземленных экранирующих проводниках.

Определены основные параметры выбора кабеля ОКГТ для эксплуатации в качестве комбинированного провода. Для правильного выбора необходимо соблюдение простого неравенства, т.е. величина тока, наводимая в экранирующем проводе $I_{\text{э}}$ током контактной сети $I_{\text{к}}$, должна быть больше максимально допустимого тока для кабеля ОКГТ $I_{\text{доп}}$: $I_{\text{э}} < I_{\text{доп}}$.

Величина $I_{\text{доп}}$ рассчитывается для кабеля ОКГТ исходя из максимально рабочей температуры оптических волокон равной 80 °С. При этом величины $I_{\text{э}}$ и

$I_{\text{доп}}$ связаны друг с другом и зависят от параметров кабеля ОКГТ – удельного сопротивления $r_{\text{ОКГТ}}$, Ом/км и расчетного диаметра $d_{\text{ОКГТ}}$.

Кабели марки ОКГТ выполняются с использованием ряда материалов, а именно: алюминий, сталь, сталеалюминевый сплав (SA 20, SA 30, SA40). Кабель может быть выполнен из вариаций перечисленных компонентов, что, в свою очередь, затрудняет расчёт допустимых длительных токовых нагрузок для различных типов кабеля.

В работе для правильного выбора кабеля ОКГТ по фактору термической стойкости предлагается рассматривать ток наводимый в экранирующем проводе и максимально допустимый ток как связанные функции от одной переменной – сопротивления кабеля ОКГТ ($r_{\text{ОКГТ}}$ Ом/км) заданного расчетного диаметра ($d_{\text{ОКГТ}}$). Сопротивление же кабеля ОКГТ рассматривается как функция от связанных значений переменного сечения стальной и алюминиевой компонент, входящих в состав кабеля S_{Al} , S_{St} . Для каждого варианта расчета сопротивление и сечение компонент, входящих в кабель, определялось как:

$$r_{\text{ОКГТ}} = \frac{\rho_{\text{al}} \rho_{\text{st}}}{\rho_{\text{al}} S_{\text{st}} + \rho_{\text{st}} S_{\text{al}}}; S_{\text{Ali}} = p_i \cdot S_{\text{ОКГТ}} \text{ мм}^2; S_{\text{Sti}} = S_{\text{ОКГТ}} - S_{\text{Ali}} \text{ мм}^2.$$

Процентное содержание алюминия p_i в составе общего сечения кабеля ОКГТ $S_{\text{ОКГТ}}$ изменялось от 1 до 100 %.

Величина предельно допустимого тока для кабеля ОКГТ $I_{\text{доп}}$ определялась по выражению приведенному ранее. При этом значение электрического сопротивления кабеля ОКГТ при температуре 80 °С R_T рассчитывалось аналогично $r_{\text{ОКГТ}}$ с единственным отличием – удельное сопротивление металлизированных компонент принято для температуры 80 °С. Таким образом был получен целый спектр значений $I_{\text{э}}$ и $I_{\text{доп}}$, удовлетворяющих зависимости: $I_{\text{э}}, I_{\text{доп}} = f(S_{\text{Al}}, S_{\text{St}}) \rightarrow f(r_{\text{ОКГТ}})$, при этом каждое значение $r_{\text{ОКГТ}}$ соответствует определённому составу кабеля в плане сечения метало-компонент S_{Al} , S_{St} .

В качестве основных граничных режимов работы КЭП как проводника определены следующие режимы, исходя из которых рассчитываются допустимые токи $I_{\text{доп}}$ и ток в экранирующем проводе $I_{\text{э}}$:

1) режим максимальной нагрузки тяговой сети или, иначе, случай протекания в контактной сети максимально допустимого для нее тока $I_{\text{Кmax}}$.

Для кабеля ОКГТ наиболее тяжелым является подобный режим при следующих условиях окружающей среды: температура окружающей среды $t_{\text{в}}=40$ °С и скорость ветра $v=0,5$ м/с (летний период). Для двухпутных участков учитывается также отношения токов контактных подвесок $I_{\text{К2}} / I_{\text{К1}} = \beta$ как по величине, так и по направлению. В случае двухпутного участка наиболее критичным будет являться режим при $\beta=1$, так как величина тока, наводимая в экранирующем проводе, будет максимальной.

Расчетные граничные параметры $I_{\text{Кmax}}$; β ; $t_{\text{в}}=40$ °С; $v=0,5$ м/с; $I_{\text{доп}}(40 \text{ °С})$.

2) режимы борьбы с гололедом.

Допустимый ток кабеля ОКГТ $I_{\text{доп}}$ в этом случае рассчитывается исходя из условий окружающей среды $t_{\text{в}} = -1^{\circ}\text{C}$, $v = 0,5-40$ м/с. В дальнейшем обозначим допустимый ток этого режима как $I_{\text{доп}(0^{\circ}\text{C})}$. Граничные параметры: $I_{\text{К}_{\text{плав}}}$; β ; $t_{\text{в}} = -1^{\circ}\text{C}$; $v = 0,5-40$ м/с; $I_{\text{доп}(0^{\circ}\text{C})}$.

Для выбора комбинированного экранирующего проводника разработан двухступенчатый алгоритм (Рисунок 7). Алгоритм выбора КЭП базируется на простом условии – величина тока, протекающая в кабеле $I_{\text{э}}$ должна быть меньше значения допустимого тока для данного кабеля $I_{\text{доп}}$: $I_{\text{э}} < I_{\text{доп}}$, при этом значения $I_{\text{доп}}$ и $I_{\text{э}}$ рассматриваются совместно как зависимость от $r_{\text{ОКГТ}}$ Ом/км.

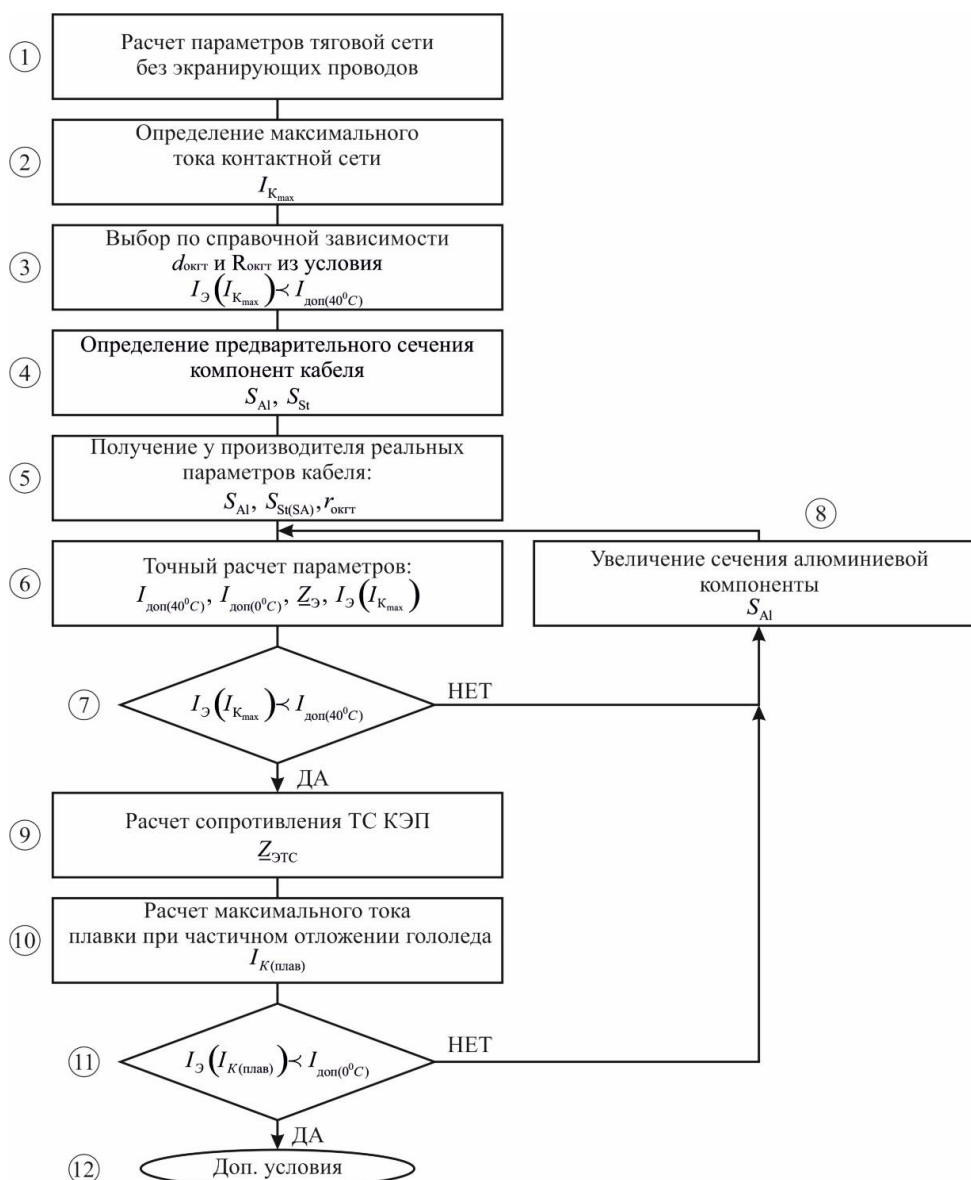


Рисунок 7 – Алгоритм выбора кабеля ОКГТ для работы в системе ТС КЭП

Для составления алгоритма выбора введены следующие обозначения: $R_{\text{ОКГТ}}$ – активное сопротивление ОКГТ из справочных зависимостей (предварительное значение); $r_{\text{ОКГТ}}$ – активное сопротивление реального ОКГТ, указанное в техническом паспорте кабеля. Смысл этих обозначений связан с принятым выше

допущением о вариации сечений S_{Al} , S_{St} кабелей ОКГТ, т.е. значения $R_{ОКГТ}$ получены исключительно для случая состава кабеля только из стали и алюминия. Реальный же кабель такого же диаметра может состоять из алюминия и сталеалюминиевого сплава и, соответственно, его реальное сопротивление $r_{ОКГТ}$ будет отличаться от расчетного $R_{ОКГТ}$, что приведет к изменению значений $\dot{I}_Э$ и $I_{доп}$

В итоге необходимы две ступени проверки: 1) выбор кабеля ОКГТ по справочным зависимостям; 2) проверка условий работы для реальных параметров.

Для предварительного выбора кабеля разработаны справочные зависимости для ряда расчетных диаметров ОКГТ и различных конфигураций проводников тяговой сети (Рисунок 8).

Полученные зависимости позволяют сделать оценочный вывод о целесообразности использования определенного кабеля ОКГТ в качестве экранирующего кабеля на определенном участке тяговой сети. В дальнейшем же, после получения точных параметров кабеля от производителя, можно произвести перерасчет допустимых токов и реально наводимых токов в кабеле ОКГТ.

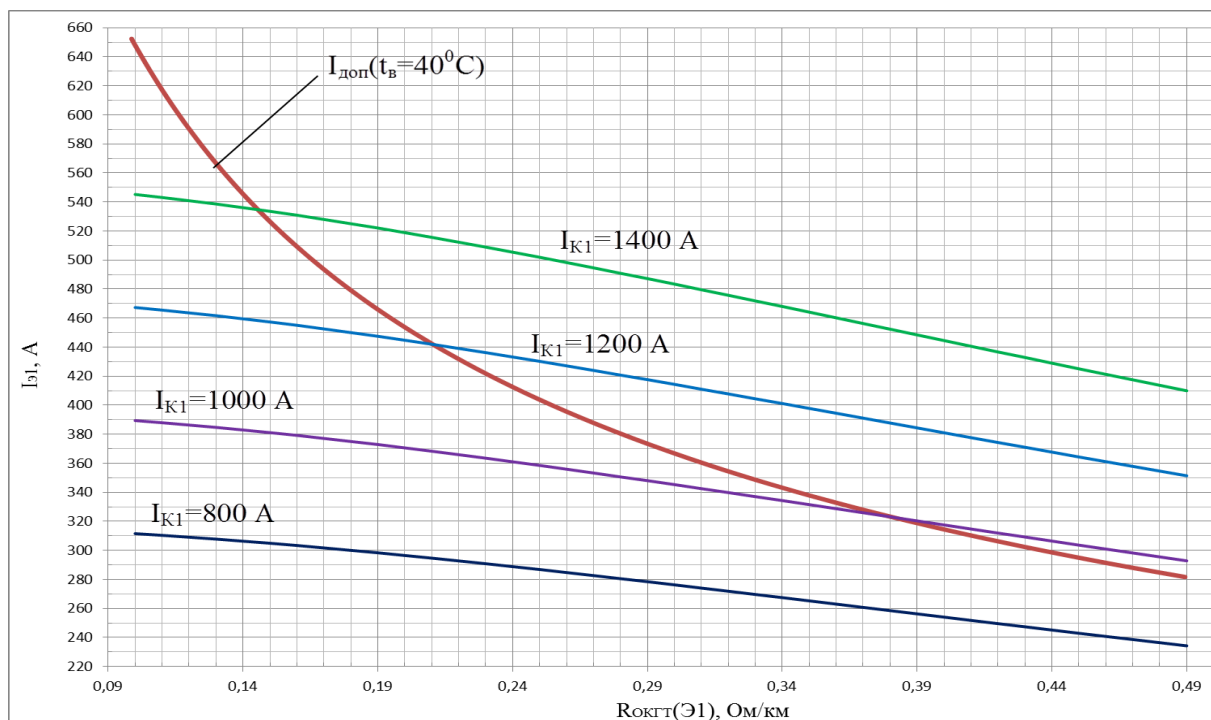


Рисунок 8 – Зависимость величины тока экранирующего провода Э1 $I_{Э1}$ от значения активного сопротивления кабеля ОКГТ при различных значениях тока контактной сети I_{K1} с указанием величины допустимого тока для кабеля ОКГТ с расчётным диаметром $d_{Э1}=18,7$ мм при условиях окружающей среды $t_b = 40^0C$, $v = 0,5$ м/с, значении коэффициента $\beta=1$ и параметрах проводника Э2: $d_{Э2}=18,7$ мм. $r_{Э2}=0,099$ Ом/км

Одним из удобств применения экранирующего проводника является возможность осуществления плавки гололеда и профилактического подогрева на нем за счёт магнитного влияния, создаваемого током контактной сети, без применения дополнительных средств. Подобный метод плавки применяется на высоковольтных ЛЭП. Экранирующий провод является линией, заземленной с

двух сторон, т.е. величина тока, наводимая током контактной сети в экранирующем проводе, будет постоянна и неизменна в границах заземленных точек. Таким образом, значение тока, наводимого в экранирующем проводе $I_{\text{Э}}$ током контактной сети $I_{\text{К}}$, не будет меняться на протяжении линии и имеет прямо пропорциональную зависимость $I_{\text{Э}}(I_{\text{К}})$.

Анализ существующих схем плавки гололеда показал, что для однопутных участков применяемая схема не имеет значения, при этом величина тока, наводимая в экранирующем проводнике, составляет от 20 до 23 % от тока контактной сети $\dot{I}_{\text{К}}$ и определяется выражением:

$$\dot{I}_{\text{Э}} = \dot{I}_{\text{К}} \frac{Z_{\text{КЭ}} \cdot Z_{\text{Р}} - Z_{\text{РЭ}} \cdot Z_{\text{КР}}}{Z_{\text{Р}} \cdot Z_{\text{Э}} - Z_{\text{РЭ}}^2}.$$

Для случая двухпутных участков величина тока, наводимого в экранирующем проводе, зависит от соотношения токов контактных подвесок обоих путей как по величине, так и по направлению $\dot{I}_{\text{К1}} / \dot{I}_{\text{К2}} = \beta$ и определяется выражением:

$$\frac{\dot{I}_{\text{Э1}}}{\dot{I}_{\text{К1}}} = \frac{C_1 + C_3 D_1}{1 - C_3 D_3} + \beta \cdot \left(\frac{C_2 + C_3 D_2}{1 - C_3 D_3} \right)$$

В случае равенства токов $\dot{I}_{\text{К1}}$ и $\dot{I}_{\text{К2}}$ по величине и по направлению ($\beta = 1$) значение $\dot{I}_{\text{Э1}} = (0,345 \div 0,373) \dot{I}_{\text{К1}}$, в случае же равенства токов $\dot{I}_{\text{К1}}$ и $\dot{I}_{\text{К2}}$ по величине и обратном по направлению ($\beta = -1$) значение $\dot{I}_{\text{Э1}} = (0,076 \div 0,084) \dot{I}_{\text{К1}}$. Во втором варианте ($\beta = -1$) величина тока, наводимая в экранирующем проводе, может оказаться недостаточной для осуществления плавки гололеда. Значение $\beta = -1$ характерно для применения петлевых схем плавки гололеда.

В итоге петлевые схемы для системы ТС ЭП являются неэффективными в рамках плавки гололеда на экранирующих проводах.

Для определения успешности осуществления плавки гололеда на кабеле ОКГТ при организации режимов борьбы с гололёдом необходимо определить величину тока, которая позволит произвести расплавление гололеда в заданное время $I_{\text{пл.треб}}$.

$$I_{\text{пл.треб}} = \sqrt{\frac{q_{\text{с}} \cdot \Delta\tau + q_{\text{из}} \cdot \Delta\tau + Q_{\text{окгт}} + Q_{\text{льда}} + Q_{\text{пл}}}{R_{\text{т}} \cdot \Delta\tau}}; \text{ А.}$$

В приведённом выражении: $q_{\text{с}}$ – мощность отводимая за счет конвекции Вт/м; $q_{\text{из}}$ – мощность отводимая за счет излучения Вт/м; $\Delta\tau$ время плавки гололеда; $Q_{\text{пл}}$ – количество тепловой энергии для плавления льда; $Q_{\text{льда}}$ – количество тепловой энергии для нагрева льда; $Q_{\text{окгт}}$ – кол-во тепловой энергии затрачиваемое на нагрев ОКГТ от температуры $T_{\text{в}}$ до $T_{\text{доп}}$.

Выражение для $I_{\text{пл.треб}}$ может быть использовано для определения необходимого времени плавки гололеда $\Delta\tau$ сек. при известном токе плавки $I_{\text{пл.треб}}$.

Таким образом решение подобной задачи сводится к двум вариантам:

1) определение требуемого тока плавки гололеда $I_{\text{пл.треб}}$ при заданных погодных условиях и времени плавки гололеда $\Delta\tau$;

2) определение необходимого времени Δt для осуществления плавки гололеда при заданном токе плавки $I_{пл.треб.}$ и определенных погодных условиях

Второй вариант является наиболее привлекательным, так как позволяет оперировать временем плавки гололёда Δt в зависимости от действительного значения тока в экранирующем проводнике. Таким образом выражение можно записать в следующем виде:

$$\Delta t = \frac{Q_{окзм} + Q_{льда} + Q_{пл.}}{I_{\Sigma}^2 R_T - q_{\epsilon} - q_{из}}$$

Данное выражение позволяет определить расчетное время плавки гололеда на кабеле ОКГТ в системе ТС КЭП при заданных параметрах условий гололедообразования.

Заключение

Применение в тяговой сети переменного тока экранирующего проводника с комбинацией функций проводника обратного тока и волоконно-оптической линии связи позволяет существенно увеличить эффективность эксплуатации дополнительного проводника тяговой сети, улучшить энергетические и эксплуатационные показатели сети, повысить надежность линий ВОЛП ЖТ.

Проведенное экспериментальное моделирование позволило определить основные концептуальные требования к конструкции кабеля ОКГТ, применяемого в тяговой сети в качестве КЭП, а также произвести предварительную верификацию вариативного подхода расчета допустимого тока относительно процентного состава металлизированных компонентов, входящих в кабель ОКГТ.

Произведенный анализ сравнения режимов работы кабелей ОКГТ и ОКСН в качестве линии ВОЛП ЖТ показал наибольшую эффективность ОКГТ, связанную с отсутствием влияния электромагнитного поля контактной сети на процесс передачи данных и надежность работы кабеля ОКГТ. В процессе анализа автором была доработана известная модель определения продольной результирующей напряженности магнитного поля на линии ВОЛП ЖТ с учетом провисания всех влияющих проводников контактной сети.

Для правильного выбора проводника ОКГТ по критерию термической стойкости были разработаны методы и принципы выбора, сочетающие в себе электрический расчет параметров тяговой сети и расчет допустимого тока для определённого кабеля с последующей проверкой надежности функционирования по выбранным параметрам.

В работе рассмотрены вопросы организации плавки гололеда на многократно заземлённых экранирующих проводниках. В частности, для рассматриваемой системы предлагается применение индукционного метода плавки за счет взимоиндуктивной связи проводников контактной сети с комбинированным экранирующим проводом.

Суммируя все вышеизложенное: техническое решение, рассмотренное и описанное в работе, является перспективным вариантом улучшения конфигурации тяговой сети и одним из способов унификации оборудования.

Основные результаты исследований:

1. Предложена модель тяговой сети с комбинированным экранирующим проводом. Данная модель рассматривается в контексте технического решения по использованию кабеля ОКГТ как линии ВОЛП ЖТ и экранирующего провода.

2. Разработана математическая модель расчёта электрических параметров тяговой сети с экранирующим проводом однопутного и двухпутного участков, учитывающая геометрическую диспозицию электрических проводников относительно друг друга. В представленной модели отсутствуют допущения о равенстве взаимоиндуктивных сопротивлений между контурами «проводник-земля», рельсовые цепи на двухпутном участке рассматриваются отдельно.

3. На основании экспериментального моделирования разработаны концептуальные рекомендации к конструкции кабеля ОКГТ для его работы в системе тяговой сети в качестве проводника обратного тока.

4. Сравнение режимов работы кабелей ОКГТ и ОКСН в рамках их работы в качестве линии ВОЛП ЖТ показало наибольшую эффективность ОКГТ в плане отсутствия влияния электромагнитного поля контактной сети на процесс передачи данных и надежность работы кабеля ОКГТ.

5. Разработан алгоритм выбора кабеля ОКГТ для его работы в системе тяговой сети в качестве экранирующего провода. Данная система получила название тяговая сеть с комбинированным экранирующим проводом (ТС КЭП).

6. Разработаны зависимости для предварительного выбора кабеля ОКГТ в составе тяговой сети с комбинированным экранирующим проводом.

7. Определены основные схемы плавки гололеда и профилактического подогрева для системы тяговой сети с экранирующим проводом.

Рекомендации и перспективы разработки темы

1. Возможность использования экранирующего проводника в качестве индикатора определения места повреждения контактной сети по величине, наводимой ЭДС.

2. Использование кабелей ОКГТ в качестве комбинированного проводника со следующими функциями: экранирующий проводник, волоконно-оптическая линия связи, грозозащитный трос.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

Статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК

1. Осипов, В.А. Проблемы электротермической деградации волоконно-оптических линий связи и перспективные направления их решения [Электронный ресурс] / В.А. Осипов, А.А. Капкаев, Е.В. Гороховский, Г.Е. Соловьев // Инженерный вестник Дона, 2013 №1 Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1539>

2. Осипов, В.А. Сопротивление тяговой сети электрических железных дорог переменного тока с экранирующим проводом / В.А. Осипов, А.А. Капкаев // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2014. №2 С. 96-102

3. Капкаев, А.А. Алгоритм выбора металлизированного волоконно-оптического кабеля для его работы в качестве комбинированного экранирующего провода тяговой сети электрических железных дорог [Электронный ресурс] / А.А. Капкаев, Е.Ю. Микаэльян // Инженерный вестник Дона, 2016 №4 Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3850>

Патенты и авторские свидетельства

4. Тяговая сеть электрифицированных железных дорог переменного тока [Текст]: пат. 2492074 Рос. Федерация: МПК В60М3/02 / Осипов В.А., Капкаев

А.А.; заявитель и патентообладатель Осипов В.А., Капкаев А.А. - № 2012106369/11; Заявл. 21.02.12; Оpubл. 10.09.2013, Бюл №25 от 2013г.

Публикации в других изданиях:

5. Капкаев, А.А. Электрически скомпенсированная тяговая сеть / А.А. Капкаев // Сборник конкурсных работ Всероссийского смотра конкурса научно-технического творчества студентов высших учебных заведений «Эврика-2008», г. Новочеркасск, 2008 г. С. 440-442

6. Осипов, В.А. Теплофизические процессы в структуре модуля ТГЗ-ВОК при прохождении больших токов в грозозащитном тросе / В.А. Осипов, Г.Е. Соловьев, А.А. Капкаев // Труды Международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития транспортного комплекса: образование, наука, производство», Рост. гос. ун-т. путей сообщения. Ростов-н/Д, 2009. С. 374 – 375.

7. Капкаев А.А. Модернизация тяговой сети электрических железных дорог совместно с оптическими линиями передачи информации / А.А. Капкаев // Труды Всероссийской научно-практической конференции «Транспорт-2010», Часть 2. Рост. гос. ун-т. путей сообщения. Ростов н/Д, 2010. – С. 333-335

8. Соловьев, Г.Е. Теплофизические явления в структуре волоконно-оптических кабелей и минимизация деградационных процессов / Г.Е. Соловьев, А.А. Капкаев, Е.В. Гороховский, О.В. Невретдинова // Труды Всероссийской научно-практической конференции «Транспорт-2010», Часть 2. Рост. гос. ун-т. путей сообщения. Ростов н/Д, 2010. – С. 338-339

9. Бочев А.С. Теплофизические процессы в объеме волоконно-оптических кабелей и минимизация деградации структуры материалов / А.С. Бочев, Г.Е. Соловьев, А.А. Капкаев // Конференция «ТелекомТранс-2010». Заседания отраслевых советов координационного транспортного совещания государственных участников СНГ: сборник докладов. – Ростов н/Д: Рост. гос. ун-т. путей сообщения. С. 108-110.

10. Осипов, В.А. Особенности работы кабеля ОКГТ встроенного в тяговую сеть электрических железных дорог переменного тока / В.А. Осипов, А.А. Капкаев // Труды Всероссийской научно-практической конференции «Транспорт-2011», Часть 1. Рост. гос. ун-т. путей сообщения. Ростов н/Д, 2011. С. 331-332

11. Осипов, В.А. Минимизация деградационных процессов в волоконно-оптических кабелях при воздействии переменных электрических полей высокой напряженности / В.А. Осипов, А.А. Соловьев, А.А. Капкаев // Труды Всероссийской научно-практической конференции «Транспорт-2011», Часть 1. Рост. гос. ун-т. путей сообщения. Ростов н/Д, 2011. С. 341-342

12. Осипов, В.А. Модернизация тяговой сети электрических железных дорог совместно с оптическими линиями передачи информации / В.А. Осипов, А.А. Капкаев // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. 2011 №2 (16) ISSN 1818-5509 – С. 112-117.

13. Осипов, В.А. Альтернативный способ организации оптического канала связи для Российских железных дорог / В.А. Осипов, А.А. Капкаев // Труды Всероссийской научно-практической конференции «Транспорт-2012», Часть 1. Рост. гос. ун-т. путей сообщения. Ростов н/Д, 2012. С. 349-351.

14. Капкаев, А.А. Тяговая сеть электрических железных дорог с пассивным обратным проводом / А.А. Капкаев // Труды Международной научно-практической конференции «Транспорт-2012» Часть 3. Рост. гос. ун-т. путей сообщения. Ростов н/Д, 2013. С 158.

15. Осипов, В.А. Альтернативный способ организации оптического канала связи для российских железных дорог совместно с модернизацией тяговой сети / В.А. Осипов, А.А. Капкаев, Е.К. Глазунова // Известия Ростовского государственного строительного университета. 2013. Т.1. № 17(17). С.101-106

16. Капкаев, А.А. Режимы электрической нагрузки кабеля ОКГТ встроенного в тяговую сеть железных дорог переменного тока / А.А. Капкаев // Труды международной научно-практической конференции «Транспорт-2014» Часть 2. Рост.гос. ун-т. путей сообщения. Ростов н/Д, 2014. С 280-282.

17. Капкаев А.А. Оценка экономической эффективности применения кабеля ОКГТ в тяговой сети переменного тока / А.А. Капкаев // Труды международной научно-практической конференции «Транспорт-2015» Часть 2. Рост. гос. ун-т. путей сообщения. Ростов н/Д, 2014. С 161-163.

18. Капкаев, А.А. Влияние электрического поля контактной сети переменного тока на волоконно-оптические линии передачи железнодорожного транспорта / А.А. Капкаев // Сборник научных трудов «Транспорт: наука, образование, производство» Том 2. Рост. гос. ун-т. путей сообщения. Ростов н/Д, 2016. С 272-276.

19. Капкаев А.А. Влияние магнитного поля контактной сети на волоконно-оптические линии передачи ж.д транспорта Сборник научных трудов «Транспорт: наука, образование, производство» Том 2. Рост. гос. ун-т. путей сообщения. Ростов н/Д, 2017. С 120-124.

Личный вклад соискателя. Основные положения и результаты исследований самостоятельно получены автором. Статьи [5,7,14,16-19] подготовлены единолично. Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве: [1,4,6,8-13,15] – разработка моделей и алгоритмов реализации, проведение расчетов, обработка и обобщение результатов

Капкаев Андрей Андреевич
ИНТЕГРАЦИЯ ЭКРАНИРУЮЩЕГО ПРОВОДА В СИСТЕМЕ ТЯГОВОГО
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИЕЙ СВЯЗИ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано к печати
Формат 60×84/16. Бумага офсетная.
Ризография. Усл.-печ. л.
Тираж 100 экз. Заказ №

Редакционно-издательский центр ФГБОУ ВО РГУПС
Адрес университета: 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка
Народного Ополчения, 2.