

На правах рукописи



Лесников Дмитрий Валентинович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЯГОВЫХ СЕТЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА  
С ПОМОЩЬЮ ПРОТЯЖЕННЫХ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ  
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ОПОР КОНТАКТНОЙ СЕТИ**

05.22.07 – Подвижной состав железных дорог,  
тяга поездов и электрификация (технические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2018

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

**Научный руководитель** – доктор технических наук, профессор  
Кузнецов Константин Борисович

**Официальные оппоненты:**

Сидоров Александр Иванович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», заведующий кафедрой «Безопасность жизнедеятельности» (ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»)

Авдеева Ксения Васильевна, кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения», доцент кафедры «Телекоммуникационные, радиотехнические системы и сети» (ФГБОУ ВО «ОмГУПС»)

**Ведущая организация** акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»)

Защита диссертации состоится «14» декабря 2018 г. в 14-00 на заседании диссертационного совета Д 218.013.01 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» по адресу: 620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, д. 66, ауд. Б2-15 зал диссертационных советов.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения». Адрес сайта, на котором размещена диссертация и автореферат: <http://www.usurt.ru>.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор технических наук, доцент



Тимухина Е.Н.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** На сегодняшний день 18,4 из 39,5 тыс. км электрифицированных железных дорог в нашей стране работают по системе постоянного тока напряжением 3 кВ, при этом значительную часть парка опор на этих дорогах составляют железобетонные опоры. Несущая способность таких опор напрямую зависит от состояния арматуры опоры, основным повреждением которой является электрическая коррозия под действием токов, стекающих из рельсовой сети в проводящее пространство земли. Электрокоррозия является следствием особенности работы рельсовой сети – совмещение функций обратного провода с рабочим и защитным заземляющим устройством. Использование рельсовой сети в качестве заземляющего устройства требует применения специальных устройств, предотвращающих электрическое соединение заземляемого оборудования железнодорожного транспорта с рельсовой сетью в нормальном режиме работы системы электроснабжения постоянного тока и создающих надежное электрическое соединение в аварийном режиме короткого замыкания. Такими устройствами являются искровые промежутки и диодные заземлители, которые требуют дополнительных материальных расходов для их нормальной эксплуатации.

Актуальность проблемы повышения эффективности работы устройств электроснабжения на электрифицированном транспорте состоит в устранении возможных отказов и повреждений опор контактной сети по причине электрической коррозии.

**Степень разработанности темы исследования.** Проблеме защиты от электрокоррозионных повреждений опорных конструкций посвящено множество научных работ таких ученых как А.М. Брылеев, А.И. Гуков, Ю.А. Кравцов, А.В. Котельников, Б.И. Косарев, А.Б. Косарев, В.А. Кандаев, А.А. Кудрявцев, Э.Г. Селедцов, К.Б. Кузнецов, В.И. Подольский, А.В. Шишляков и другие.

Указанная проблема непосредственно связана с распределением потенциала рельсовой сети и протеканием блуждающих токов. Исследованиями в этой области занимались указанные выше ученые, а также А.Н. Матвеев, К.Г. Марквардт, И.В. Стрижевский, В.И. Дмитриев и другие.

Исследованию и математическому моделированию заземляющих устройств посвящены работы таких ученых как В.В. Бургсдорф, А.Н. Данилин, А.И. Сидоров, С.Л. Шишигин, К.В. Авдеева.

Исследованиями в области систем заземления на электрифицированном транспорте занимались такие иностранные ученые как *M.M. Alamuti, H. Nouri (University of the West of England), A. Gholami (Iran University of Science and Technology), W. Guangning, L. Zhou (Southwest Jiaotong University, Chengdu), A.*

*Mariscotti (University of Genova), L. Sandrolini (University of Bologna), L. Rouco (Universidad Pontificia Comillas).*

Тема соответствует пункту 4 паспорта научной специальности 05.22.07 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация (технические науки): «Совершенствование подвижного состава, тяговых подстанций, тяговых сетей, включая преобразователи, аппараты, устройства защиты, схемы электроснабжения. Улучшение эксплуатационных показателей подвижного состава и устройств электроснабжения».

**Целью диссертационной работы** является совершенствование тяговых сетей постоянного тока на основе использования протяженных заземляющих устройств железобетонных опор контактной сети.

**Задачи исследования:**

1. Выполнить анализ существующих систем заземления и защиты опор контактной сети, а также способов расчета сложных заземляющих устройств. Разработать варианты конструктивного исполнения протяженных заземляющих устройств с изменением функциональных свойств, которые позволят повысить эксплуатационные показатели опор контактной сети постоянного тока и снизить расходы на обслуживание оборудования контактной сети.

2. Оценить с помощью возможностей компьютерного моделирования распределение электрического поля внутри железобетонных опор и фундаментов различной конструкции, а также вокруг электрифицированной линии при использовании заземляющих устройств. Разработать математическую модель системы «рельсы-протяженный заземлитель» с учетом взаимного влияния элементов системы.

3. Провести верификацию математической модели системы «рельсы-протяженный заземлитель» с помощью физической аналоговой модели участка постоянного тока.

4. Разработать методику оценки вариантов конструктивного исполнения заземляющих устройств. На основе разработанной методики и математической модели системы «рельсы-протяженный заземлитель» оценить эффективность вариантов конструктивного заземляющих устройств.

**Область исследования:** улучшение эксплуатационных показателей устройств электроснабжения.

**Объект исследования:** устройства электроснабжения железных дорог.

**Научная новизна работы.**

1. Исследовано распределение электрического поля внутри отдельных, нераздельных железобетонных опор и трехлучевых фундаментов с помощью трехмерного моделирования.

Введено понятие «взаимной проводимости» рельсовой сети и протяженного заземлителя, определяемой на основе распределения электрического поля в плоскости перпендикулярной оси пути.

Разработана математическая модель системы «рельсы-протяженный заземлитель», учитывающая взаимное влияние элементов системы и наличие железобетонных опор и фундаментов.

2. Реализована физическая аналоговая модель участка постоянного тока, основанная на цепных схемах. С помощью физической аналоговой модели проведена верификация математической модели системы «рельсы-протяженный заземлитель».

3. Разработана методика оценки эффективности вариантов конструктивного исполнения протяженных заземляющих устройств.

### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

Теоретическая значимость:

1. С помощью численных методов определена величина сопротивления раздельных, нераздельных опор и трехлучевых фундаментов при различных удельных сопротивлениях бетона и грунта, а также величина взаимной проводимости элементов системы «рельсы-протяженный заземлитель» при различных значениях удельного сопротивления элементов верхнего строения пути.

2. Математическая модель системы «рельсы-протяженный заземлитель» позволила оценить распределение потенциалов и токов между элементами системы при различных вариантах конструктивного исполнения протяженных заземляющих устройств.

3. Использование методики оценки эффективности позволило выявить наиболее эффективный вариант конструктивного исполнения с применением заземляющего провода.

Практическая значимость:

1. Применение протяженных заземляющих устройств позволит снизить интенсивность электрической коррозии железобетонных опор и других поддерживающих конструкций, увеличить продолжительность их эксплуатации и снизить затраты на обслуживание устройств электроснабжения.

2. Практическая значимость работы подтверждается получением патентов на изобретения, полезные модели и актом внедрения результатов научно-исследовательской работы.

**Методология и методы исследования.** Для решения поставленных задач использованы методы расчета протяженных и сложных заземляющих устройств, положения теории электромагнитных полей, цепных схем, математического моделирования, планирования эксперимента, подобия, конечно-элементных расчетов. Для исследований с применением метода конечных элементов использован программный комплекс *Comsol Multiphysics*. Эксперимен-

тальная часть включает в себя лабораторные исследования на физической аналоговой модели и последующую обработку экспериментальных данных. Расхождение результатов экспериментальных и теоретических исследований не превышает 10%.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты исследования влияния удельного сопротивления грунта, бетона и наличия гидроизоляции на величину сопротивления отдельных, не отдельных железобетонных опор и фундаментов.

Результаты компьютерного моделирования распределения электрического поля, создаваемого рельсовой сетью и протяженным заземлителем, в плоскости перпендикулярной оси пути. Оценка зависимости величины взаимной проводимости системы «рельсы-протяженный заземлитель» от удельных сопротивлений элементов верхнего строения пути.

2. Математическая модель системы «рельсы-протяженный заземлитель», учитывающая взаимную проводимость элементов системы и сопротивление железобетонных опор и фундаментов.

3. Результаты экспериментального исследования распределения потенциалов в системе «рельсы-протяженный заземлитель», полученных с помощью физической аналоговой модели участка постоянного тока.

4. Методика оценки эффективности вариантов конструктивного исполнения протяженных заземляющих устройств.

5. Результаты анализа эффективности вариантов конструктивного исполнения протяженных заземляющих устройств для железной дороги постоянного тока.

**Степень достоверности результатов** подтверждается сравнением результатов теоретических и экспериментальных исследований, при этом расхождение результатов не превышает 10%. Обоснованность результатов подтверждается корректным применением методов математического и физического моделирования, теории подобия, методов расчета протяженных и сложных заземляющих устройств, метода конечных элементов.

**Апробация результатов исследования.** Основные положения диссертационной работы докладывались на международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы техносферной безопасности и природообустройства» (Благовещенск, 2014), VII Международном симпозиуме «Eltrans-2015» (Санкт-Петербург, 2015), VI Международной научно-практической конференции «Безопасность жизнедеятельности в третьем тысячелетии» (Челябинск, 2015), региональной научно-практической конференции «Полигонная технология вождения поездов весом 8-9 тысяч тонн на направлении Кузбасс-Северо-Запад» (Екатеринбург, 2015), постоянно действующем научном семинаре аспирантов УрГУПС (Екатеринбург, 2016), заседаниях кафедры «Электро-

снабжение транспорта».

**Публикации.** Основные положения диссертационной работы отражены в 14 печатных работах, в том числе 7 работ опубликованы в изданиях, входящих в «Перечень изданий, рекомендованных ВАК для публикации научных результатов диссертаций», из них 4 статьи и 3 патента. Автору принадлежат 4,3 печатных листа.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа представлена на 279 страницах, содержит 192 страницы основного текста, 80 рисунков, 8 таблиц и 9 приложений на 87 страницах, 141 наименование библиографического списка, включая 11 наименований иностранных источников.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, описана степень ее разработанности, сформулированы цели, задачи, объект и область исследования, определены положения научной новизны, теоретической и практической значимости работы, описана методология и методы исследования, изложены основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения о степени достоверности и апробации результатов исследования.

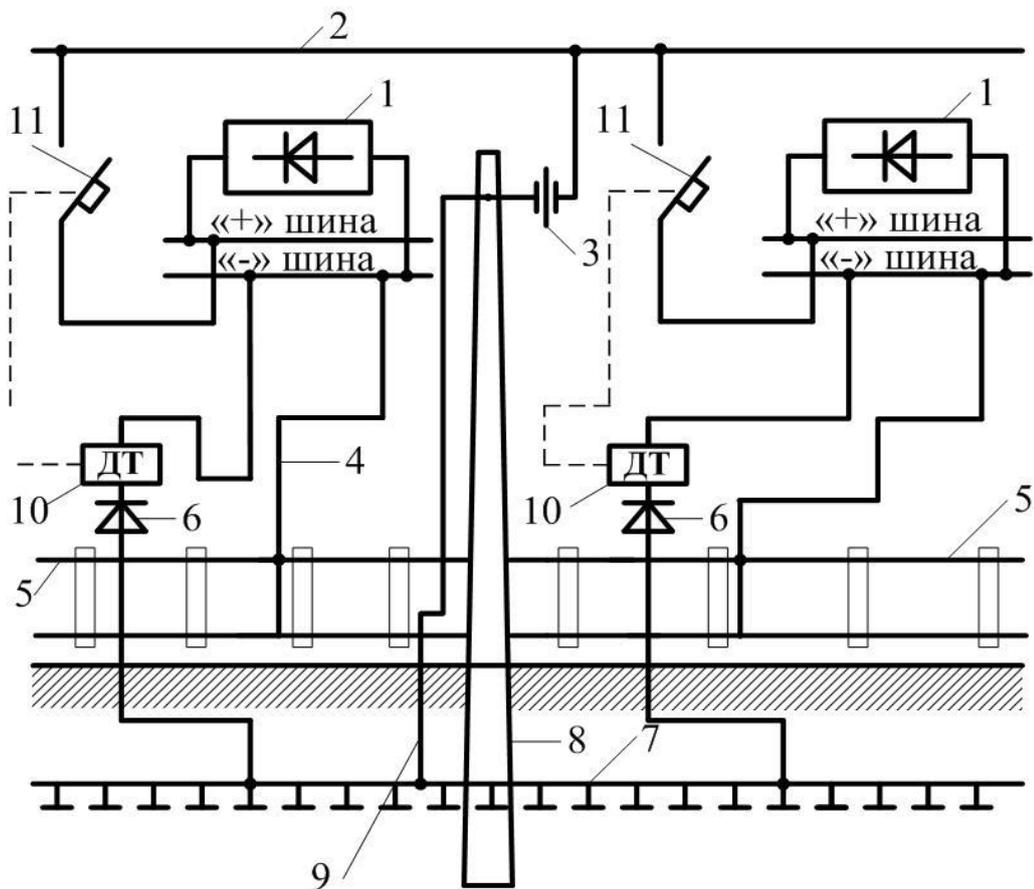
**В первой главе** выполнен анализ существующих систем заземления и защиты железобетонных опор контактной сети и фундаментов от электрической коррозии на участках постоянного тока. Глава охватывает отечественные и зарубежные системы. Сделан вывод о том, что на сегодняшний день в России применение нашла только одна система защиты опор от электрокоррозии – система защиты опор изолированных от рельсов (ЗОИР) Свердловской железной дороги. Рассмотрены существующие методы расчета системы «рельсы-металлическое подземное сооружение», а также методы расчета заземлителей, применяемые при проектировании электроэнергетических систем.

Предложены варианты конструктивного исполнения протяженных заземляющих устройств с различными конструктивными особенностями для участков постоянного тока. Основной идеей предлагаемых устройств является отказ от использования рельсовой сети для целей защитного заземления и применение специального протяженного заземлителя. Главным отличием предлагаемых вариантов является исполнение протяженного заземлителя.

В первом варианте протяженный заземлитель выполняется в виде горизонтального заземляющего электрода (рисунок 1).

Заземляющий электрод располагается по всей длине межподстанционной зоны и подключается к минус шине тяговых подстанций через полярирующий диодный блок, препятствующий протеканию тока со стороны минус шины.

Наличие электрода влияет на работу токовых защит, установленных на тяговых подстанциях, которое выражается в снижении тока, протекающего по нему при пробое изоляции опор контактной сети. Для компенсации этого влияния в конструкции предусматривается датчик тока, контролирующий величину тока в заземлителе. Опоры же подключаются непосредственно к протяженному заземлителю либо на уровне пяты консоли, либо через диагностический вывод арматуры, что предпочтительней. При этом будет происходить катодная поляризация опор контактной сети, что приведет к снижению их потенциала и величины стекающего с них тока.



1 - тяговая подстанция постоянного тока; 2 - контактная сеть; 3 - изоляция контактной сети; 4 - рельсовый фидер тяговой подстанции; 5 - рельсовая сеть; 6 - полярирующие диодные блоки; 7 - протяженный заземлитель; 8 - опорные конструкции; 9 - заземляющий проводник; 10 - датчик тока протяженного дренирующего заземлителя; 11 - быстродействующий выключатель контактной сети.

Рисунок 1 –Заземляющее устройство опор контактной сети с применением горизонтального заземляющего электрода

В представленном виде заземляющее устройство может применяться только на перегонах, поскольку прокладка электрода связана с проведением земляных работ.

С целью сокращения объема земляных работ при монтаже устройства был разработан и запатентован вариант конструктивного исполнения с применением комбинированного заземлителя.

Комбинированный заземлитель представляет собой вертикальные заземляющие электроды, соединенные металлическим проводом, располагаемым над поверхностью земли на опорах контактной сети.

Использование вертикальных заземляющих электродов значительно упрощает монтаж заземляющего устройства, поскольку не требует закрытия движения, так как заглубление вертикального электрода может производиться с поля. Наличие электродов будет способствовать дренажу блуждающих токов вдоль железнодорожной линии. Соответственно, катодная поляризация опор контактной сети в этом случае также будет сохраняться. В таком виде заземляющее устройство может быть использовано как на перегоне, так и на станции.

Для большего сокращения объема земляных работ при монтаже устройства была предложена и запатентована конструкция с использованием заземляющего провода. В этом случае протяженный заземлитель выполняется в виде заземляющего провода располагаемого над землей с полевой стороны опор.

Использование заземляющего провода позволит полностью отказаться от земляных работ, что приведет к сокращению капитальных затрат и упростит сооружение устройства на железнодорожных станциях.

**Во второй главе** рассматривается математическая модель системы «рельс-протяженный заземлитель» с учетом взаимной проводимости между рельсами и протяженным заземлителем и сопротивления отдельных и нераздельных железобетонных опор и фундаментов.

Исследовалось влияние железобетонных опор контактной сети постоянного тока на систему «рельс-протяженный заземлитель». Определение величины сопротивления опор относительно удаленной земли проводилось с помощью трехмерного компьютерного моделирования по методу конечных элементов. Это позволило учитывать в модели сложную конфигурацию арматурной сетки, состоящей из вертикальных стержней различного диаметра и спиральной арматуры.

На рисунке 2 представлен вид расчетной модели нераздельной железобетонной опоры.

На рисунке 2 цифрой 1 обозначена поверхность, на которой задавался нулевой потенциал, цифрой 2 – поверхность, на которой задавался потенциал отличный от нуля. Поверхность 2 имитирует след от хомута консоли опоры контактной сети.

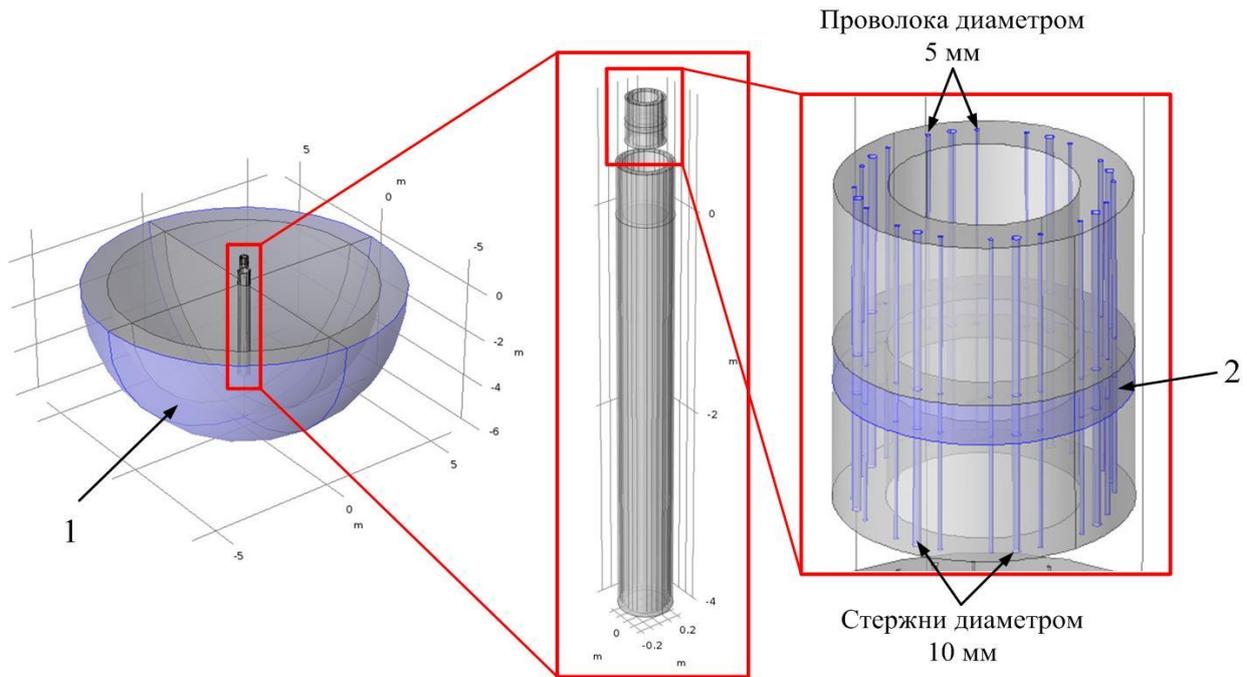


Рисунок 2 – Геометрия модели нераздельной опоры СС-136.6

Расчет сопротивления железобетонных опор и фундаментов проводился на основе распределения электрического поля в расчетной модели, которое определяется путем решения системы дифференциальных уравнений

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{div}(\vec{J}) &= 0 \\ \vec{J} &= \sigma \cdot \vec{E} \\ \vec{E} &= -\operatorname{grad}(\varphi) \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где  $\vec{J}$  – вектор плотности электрического тока, А/м<sup>2</sup>;

$\vec{E}$  – вектор напряженности электрического поля В/м;

$\sigma$  – удельная электропроводность, См/м;

$\varphi$  – потенциал, В.

На рисунке 3 представлены зависимости сопротивления нераздельной опоры от удельного сопротивления грунта при различных удельных сопротивлениях бетона  $r_{\text{бет}}$ .

Помимо влияния удельных сопротивлений грунта и бетона исследовалось влияние гидроизоляционного слоя в подземной части опор на величину их сопротивления. В этом случае моделировались повреждения гидроизоляционного слоя различной площади, что позволило выявить зависимость сопротивления опор от площади повреждения (рисунок 4).

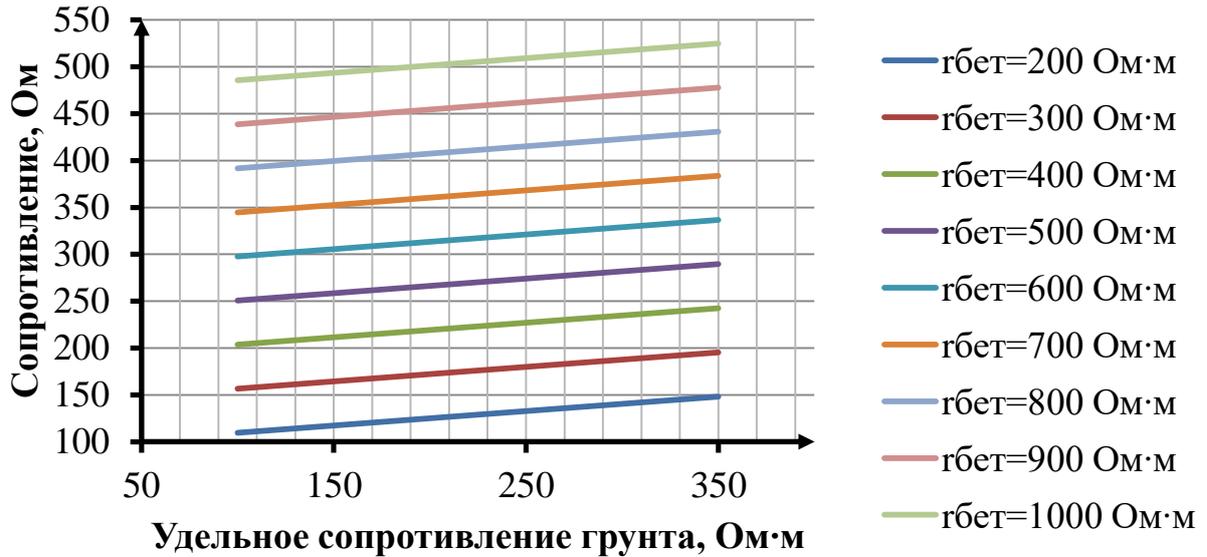


Рисунок 3 – Зависимость сопротивления нераздельной опоры СС-136.6 от удельных сопротивлений грунта и бетона

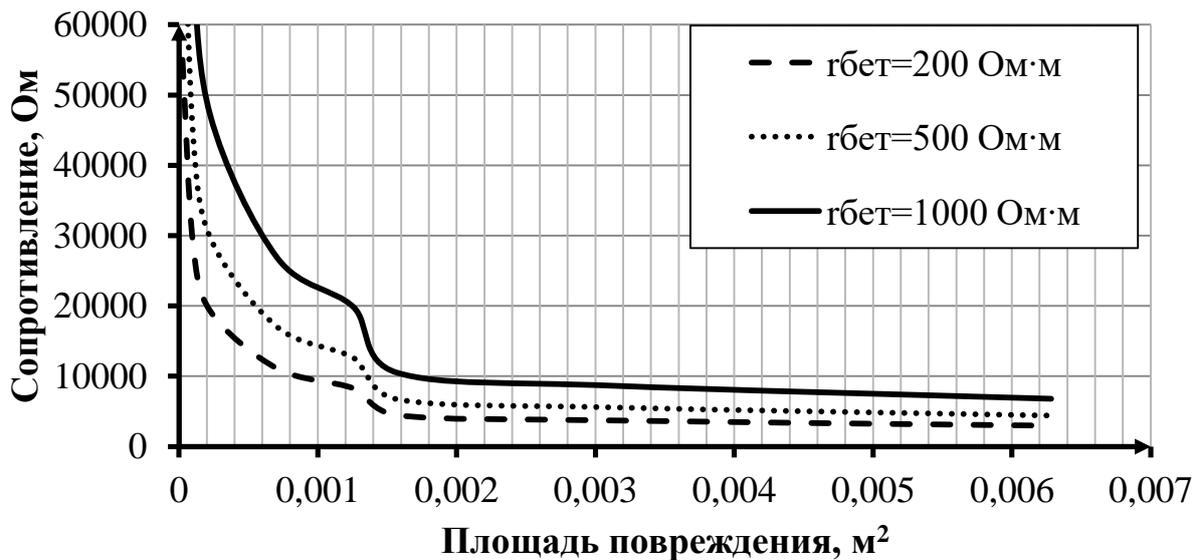


Рисунок 4 – Зависимость сопротивления нераздельной опоры СС-136.6 от площади сечения моделируемого повреждения гидроизоляционного слоя при удельном сопротивлении грунта 350 Ом·м

Введено понятие «взаимной проводимости» рельсовой сети и протяженного заземлителя. Для оценки величины взаимной проводимости проведено компьютерное моделирование электрического поля в плоскости перпендикулярной оси пути методом конечных элементов. Вид расчетной модели с сеткой представлен на рисунке 5.

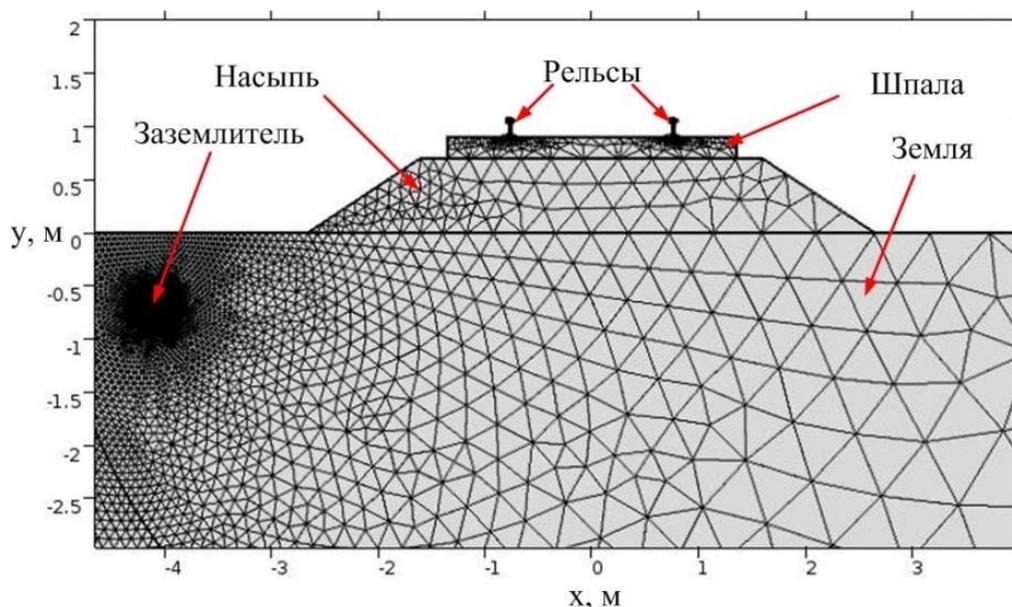


Рисунок 5 – Геометрия расчетной модели поперечного сечения пути, в программе *Comsol Multiphysics*

Величина взаимной проводимости определяется на основе распределения электрического поля в пределах расчетной модели, которое является результатом решения системы дифференциальных уравнений распределения электрического поля в проводнике (1).

На основе результатов моделирования была определена взаимная проводимость рельсовой сети и горизонтального заземляющего электрода, расположенного в земле, при различных величинах удельного сопротивления шпал, балласта и грунта для одно- и двухпутного участков. На территории Свердловской области встречаются несколько видов грунтов: песчаные, супесчаные, суглинистые и торфяные. Их удельное сопротивление сильно зависит от температуры и количества влаги. Результаты вертикального электрического зондирования на перегоне Полетаево-Биргильда, имеющем схожий состав грунтов, показали, что удельное сопротивление грунта в течение года может варьироваться от 150 до 350 Ом·м. Величины взаимной проводимости в системе «рельсы-протяженный заземлитель» при различных удельных сопротивлениях элементов верхнего строения пути приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Взаимная проводимость системы «рельсы-протяженный заземлитель» однопутного участка, См/м

Удельное сопротивление шпал	Удельное сопротивление балласта	$R_{\text{грунта}}=150$ Ом·м	$R_{\text{грунта}}=250$ Ом·м	$R_{\text{грунта}}=350$ Ом·м
1	2	3	4	5
$R_{\text{шпал}}=200$ Ом·м	$R_{\text{балласт}}=3000$ Ом·м	0,002046	0,001745	0,001522
	$R_{\text{балласт}}=5000$ Ом·м	0,001426	0,001272	0,001149

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5
$R_{\text{шпал}} = 500 \text{ Ом}\cdot\text{м}$	$R_{\text{балласт}} = 3000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$	0,001816	0,001575	0,001391
	$R_{\text{балласт}} = 5000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$	0,001307	0,001177	0,001070
$R_{\text{шпал}} = 1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$	$R_{\text{балласт}} = 3000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$	0,001547	0,001368	0,001227
	$R_{\text{балласт}} = 5000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$	0,001155	0,001052	0,000966

Из таблицы 1 видно, что наибольшее влияние на величину взаимной проводимости системы «рельсы-протяженный заземлитель» оказывает удельное сопротивление грунта. Сравнительно небольшое изменение удельного сопротивления грунта (100-200 Ом·м) приводит к такому же изменению взаимной проводимости, что и значительное изменение удельного сопротивления бетона шпал (300-500 Ом·м) и удельного сопротивления щебёночного балласта (2000 Ом·м). При этом удельное сопротивление грунта зависит не только от его состава и количества влаги, но и от времени года, в то время как удельные сопротивления бетона и щебня в основном определяются их увлажненностью.

В качестве математической модели системы «рельсы-протяженный заземлитель» предложена система уравнений, описывающая распределение потенциалов и токов в системе

$$\left. \begin{aligned} I_3 r_3 &= -\frac{d\varphi_3}{dx}; & I_P r_P &= -\frac{d\varphi_P}{dx}; \\ -\left( \frac{\varphi_3}{r_{33}} + (\varphi_3 - \varphi_P) \cdot g_{P3} \right) &= \frac{dI_3}{dx}; \\ -\left( \frac{\varphi_P}{r_{P3}} + (\varphi_P - \varphi_3) \cdot g_{P3} \right) &= \frac{dI_P}{dx} \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где  $\varphi_3$  и  $\varphi_P$  – соответственно потенциалы протяженного заземлителя и рельсовой сети относительно удаленной земли, В;

$I_3$  и  $I_P$  – токи в заземлителе и рельсовой сети соответственно, А;

$r_3$  и  $r_P$  – сопротивления заземлителя и рельсовой сети соответственно, Ом/м;

$r_{33}$  и  $r_{P3}$  – переходные сопротивления заземлителя и рельсовой сети соответственно, Ом·м;

$g_{P3}$  – взаимная проводимость системы «рельсы-протяженный заземлитель», См/м.

Рассмотрены особенности определения параметров схемы замещения си-

стемы «рельсы-протяженный заземлитель» при различных вариантах исполнения заземлителя: горизонтальный электрод, расположенный под землей, и воздушный заземляющий провод.

**Третья глава** посвящена верификации математической модели системы «рельсы-протяженный заземлитель», описанной в главе 2, путем сравнения с результатами экспериментального исследования. Для этой цели была разработана физическая аналоговая модель участка постоянного тока, основанная на положениях теории подобия и представляющая из себя цепную схему. В соответствии с теорией подобия для представленной физической аналоговой модели были определены критерии подобия и соответствующие масштабные коэффициенты.

Непосредственно экспериментальные исследования проводились с помощью лабораторного стенда «Модель двухпутного участка железной дороги, электрифицированного на постоянном токе», производства ИПЦ «Учебная техника» г. Челябинск. Структура стенда включает блоки тяговых подстанций, участков тяговой сети и электровозов, блоки резисторов, в виде цепных схем, моделирующих покилометровые участки контактной сети, рельсовой сети, протяженного заземлителя и переходных сопротивлений. При исследовании проводилось измерение падений напряжений на каждом из сопротивлений, входящих в состав физической аналоговой модели, на основе которого было получено распределение потенциалов относительно удаленной земли.

Основная цель исследования заключалась в верификации математической модели (2), путем сравнения экспериментальных распределений потенциалов в системе «рельсы-протяженный заземлитель» с результатами, полученными для участка с аналогичными параметрами с помощью аналитического и численного методов исследования системы уравнений (2). В результате сравнения результатов было выявлено, что расхождение между ними не превышает 10%.

**В четвертой главе** рассматривается методика оценки эффективности вариантов конструктивного исполнения заземляющих устройств, предложенных в главе 1. Методика основана на сравнении вариантов по четырем критериям:

- 1) Потенциальное уменьшение электрической коррозии, с точки зрения наличия и протяженности анодных зон потенциала протяженного заземлителя.
- 2) Соответствие требованиям электробезопасности с точки зрения напряжения прикосновения в нормальном и аварийном режимах работы.
- 3) Работоспособность токовых защит фидеров тяговых подстанций при использовании заземляющего устройства.
- 4) Экономическая эффективность вариантов исполнения с точки зрения минимума приведенных строительно-эксплуатационных расходов.

Для оценки распределения потенциалов и токов в системе «рельсы-протяженный заземлитель» в аварийном режиме в математическую модель бы-

ли включены тяговые подстанции и контактная сеть, что позволило рассматривать различные схемы соединения контактных подвесок, режимы короткого замыкания контактной сети на рельсовую сеть и режим пробоя изоляции контактной сети, являющегося замыканием на протяженный заземлитель.

Непосредственно оценка эффективности осуществлялась на основе результатов моделирования нормального и аварийных режимов на действующем участке «Сарга»-«Сабик» Свердловской железной дороги, на котором реализуется пропуск тяжеловесных поездов.

Потенциальное уменьшение интенсивности электрической коррозии оценивалось по наличию и протяженности анодных зон потенциала заземлителя относительно удаленной земли и его величине. Удовлетворительным считалось отсутствие анодных зон потенциала протяженного заземлителя.

Соответствие требованиям электробезопасности оценивалось на основе сравнения напряжения прикосновения к рельсовой сети и заземляющему устройству с нормированными значениями в нормальном и аварийном режимах. Удовлетворительным считалось не превышение допустимого напряжения прикосновения к рельсовой сети и заземляющему устройству в обоих режимах.

Работоспособность токовых защит оценивалась по соотношению токов, протекающих по заземляющему устройству в нормальном и аварийном режимах. Удовлетворительным считалось превышение тока заземляющего устройства в аварийных режимах над током в нормальном режиме.

Экономическая эффективность оценивалась путем сравнения приведенных строительно-эксплуатационных расходов на каждый из рассмотренных вариантов за 10 лет эксплуатации. Расходы определялись для того же участка «Сарга»-«Сабик».

По результатам сравнения вариантов конструктивного исполнения была составлена итоговая таблица, наглядно характеризующая эффективность вариантов согласно разработанной методике (таблица 2).

Таблица 2 – Сравнение результатов оценки эффективности вариантов конструктивного исполнения

Вариант конструктивного исполнения	Потенциальное снижение интенсивности электрической коррозии	Электробезопасность	Работоспособность токовых защит	Приведенные строительно-эксплуатационные расходы, тыс. руб
1	2	3	4	5
С применением горизонтального заземляющего электрода	Неудовлетворительно	Удовлетворительно	Неудовлетворительно	151188

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5
С применением комбинированного заземлителя	Удовлетворительно	Удовлетворительно	Удовлетворительно	6332
С применением заземляющего провода	Удовлетворительно	Удовлетворительно	Удовлетворительно	6249

Из таблицы 2 видно, что вариант с применением горизонтального заземляющего электрода не удовлетворяет 2 критериям: потенциальное уменьшение электрической коррозии и работоспособность токовых защит. При этом варианте наблюдались протяженные анодные зоны потенциала электрода (50-60% от длины межподстанционной зоны), а величина тока, протекающего по нему в аварийном режиме (1,5 А) была ниже, чем в нормальном (90 А). Приведенные расходы для этого варианта оказались наибольшими.

Лучшим с точки зрения всех критериев оценки эффективности был признан вариант с применением заземляющего провода. Потенциал провода не имел анодных зон, что говорит об потенциальном снижении интенсивности электрической коррозии, величина напряжения прикосновения к рельсовой сети и к заземляющему проводу не превышала допустимых значений. Токи, протекающие по проводу, в аварийных режимах (15 А) значительно превышают токи нормального режима (4 А), а приведенные расходы для этого варианта имеют минимальное значение.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе содержится решение научной задачи, имеющей значение для совершенствования тяговых сетей с помощью протяженных заземляющих устройств железобетонных опор контактной сети, изложены научно обоснованные технические решения, которые позволяют повысить эффективность работы тяговых сетей постоянного тока.

На основании работы можно сделать следующие выводы:

1) Анализ отечественных и зарубежных систем заземления и защиты опор контактной сети позволил выявить перспективную концепцию их развития, заключающуюся в отказе от использования рельсовой сети в качестве заземляющего устройства. На основе этой концепции были предложены варианты конструктивного исполнения протяженных заземляющих устройств: с применением горизонтального заземляющего электрода, с применением комбинированного заземлителя, с применением заземляющего провода.

2) Разработаны трехмерные модели различных железобетонных конструкций, применяемых в контактной сети. Определено электрическое сопротивление конструкций с учетом сопротивления растеканию. При компьютерном моделировании железобетонных конструкций рассматривалось влияние наличия гидроизоляции и ее целостности на величину их сопротивления. В результате было выявлено, что гидроизоляции сильно повышает сопротивление конструкций: сопротивление не отдельной опоры без гидроизоляции варьируется от 100 до 600 Ом, при ее наличии оно достигает 60-140 кОм.

Введено понятие взаимной проводимости между элементами системы «рельсы-протяженный заземлитель».

На основе математической модели системы «рельсы-протяженный заземлитель» одно- и двухпутного участка, исследованы возможности протекания токов между рельсами и заземлителями смежных путей и оценены распределения потенциалов и токов в этой системе.

3) С помощью физической аналоговой модели электрифицированного участка постоянного тока проведена верификация математической модели системы «рельсы-протяженный заземлитель».

В результате экспериментального исследования были получены распределения потенциалов рельсовой сети и протяженного заземлителя при различных продольных и переходных сопротивлениях рельсовой сети и заземлителя.

Полученные аналитические и численные результаты сошлись с результатами эксперимента в пределах 10%.

4) Предложена методика оценки эффективности вариантов конструктивного исполнения протяженных заземляющих устройств по четырем основным критериям: потенциальное уменьшение электрической коррозии, соответствие нормам электробезопасности, работоспособность токовых защит тяговых подстанций, технико-экономическое сравнение.

5) Экономическая эффективность определялась величиной приведенных строительно-эксплуатационных затрат: для варианта с горизонтальным заземляющим электродом затраты оказались наибольшими и составили 151188 тыс. руб., минимальное значение затрат соответствует варианту с применением заземляющего провода – 6249 тыс. руб.

6) В результате оценки эффективности вариантов конструктивного исполнения заземляющих устройств по разработанной методике было выявлено, что наиболее эффективным является вариант с применением заземляющего провода.

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

*Статьи в периодических научных изданиях, включенных в перечень ВАК Минобрнауки РФ*

1. Лесников, Д.В. Принципы моделирования процессов в защитном заземлении опор контактной сети постоянного тока / К.Б. Кузнецов, Д.В. Лесников // Вестник УрГУПС. – 2016. – № 1 (29). – С. 40-45.

2. Лесников, Д.В. Совершенствование системы заземления при защите опор контактной сети постоянного тока от электрической коррозии / К.Б. Кузнецов, Д.В. Лесников // Транспорт Урала. – 2016. – №2(49). – С. 113-118.

3. Лесников, Д.В. Совершенствование методики расчета протяженных заземлителей на участках постоянного тока / Д.В. Лесников // Транспорт Урала. – 2017. – №1(52). – С. 71-76.

4. Лесников, Д.В. О подходе к расчету электрического сопротивления железобетонных конструкций / Д.В. Лесников, А.В. Паранин // Известия Транссиба – 2017 – №3 – С.102-114.

#### *Патенты на изобретения и полезные модели*

5. Пат. 2581619 Российская Федерация, МПК Н 02 Н 3/00, В 60 М 5/00. Устройство токовой защиты контактной сети постоянного тока [Текст] / Кузнецов К.Б., Лесников Д.В.; заявитель и патентообладатель ВГБОУ ВО «УрГУПС». – № 2015100771/07 ; заявл. 12.01.2015 ; опубл. 20.04.2016, Бюл. № 11. – 4 с. : ил.

6. Пат. 170556 Российская федерация, МПК В 60 М 1/12, В 60 М 5/00. Устройство заземления опор контактной сети участков постоянного тока железнодорожных станций [Текст] / Кузнецов К.Б., Лесников Д.В.; заявитель и патентообладатель ВГБОУ ВО «УрГУПС». – № 2016102266 ; заявл. 25.01.2016 ; опубл. 28.04.2017, Бюл. № 13. – 3 с. : ил.

7. Пат. 175748 Российская федерация, МПК В 60 М 5/00, В 60 М 3/00. Устройство заземления опор контактной сети электрифицированных железных дорог постоянного тока с применением комбинированного заземлителя [Текст] / Кузнецов К.Б., Лесников Д.В.; заявитель и патентообладатель ВГБОУ ВО «УрГУПС». – № 2017110564 ; заявл. 29.03.2017 ; опубл. 18.12.2017, Бюл. № 35. – 5 с. : ил.

#### *Материалы конференций*

8. Лесников, Д.В. Нетрадиционная конструкция заземления опор контактной сети, защищающая фундаменты от коррозии [Текст] / К.Б. Кузнецов, Д.В. Лесников // Актуальные проблемы техносферной безопасности и природообустройства: Материалы междунар. науч.–практ. конф. / Дальневосточный государственный аграрный университет. – Благовещенск, 2014. – С. 108-112. – ISBN: 978-5-9642-0241-7

9. Лесников, Д.В. Инновационные заземляющие устройства опор контактной сети [Текст] / К.Б. Кузнецов, Д.В. Лесников // Научные исследования: от теории к практике : материалы III Междунар. науч.–практ. конф.: в 2 т. / редкол.: О.Н. Широков [и др.]. – Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2015. –

№2(3), Т. 2– С. 49-55. – ISSN: 2413-3957.

10. Лесников, Д.В. Применение инновационных заземляющих устройств конструкций контактной сети и анализ зарубежных аналогов [Текст] / Д.В. Лесников // Научные исследования: от теории к практике : материалы III Международ. науч.-практ. конф.: в 2 т. / редкол.: О.Н. Широков [и др.]. – Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2015. –№2(3), Т. 2– С. 55-59. – ISSN: 2413-3957.

11. Лесников, Д.В. Протяженное дренирующее заземляющее устройство [Текст] / Д.В. Лесников // Инновационные механизмы решения проблем научного развития: Сб. статей междунар. науч.-практ. конф. – Сызрань: «Омега Сайнс», 2016. – С. 48-50. – ISBN: 978-5-906876-16-4.

12. Лесников, Д.В. О реализации концепции отказа от использования рельсов в качестве заземляющего устройства [Текст] / Д.В. Лесников // Научные революции: сущность и роль в развитии науки и техники: сб. статей Международ. науч.- практ. конф. :в 3 ч. Ч.2 / - Уфа: АЭТЕРНА, 2017. – С. 68-71. – ISBN: 978-5-00109-126-4

13. Лесников Д.В. О возможности применения метода конечных элементов при расчете протяженного дренирующего заземляющего устройства [Текст] / Д.В. Лесников // Инновационный транспорт – 2016: специализация железных дорог : м-лы Международ. науч.-практ. конф. — Екатеринбург : УрГУПС, 2017. — Вып. 8 (227). — С. 80-92.

14. Лесников, Д.В. Методы исследования системы «рельсы-протяженный заземлитель» [Текст] / Д.В. Лесников // Техника и технологии наземного транспорта: мат. всеросс. науч. конф. аспирантов / УрГУПС – Екатеринбург, 2018 – Вып. 2(232) – С. 121-124.

Основные положения и результаты исследований получены автором самостоятельно. Статьи [3,10-14] подготовлены единолично. Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве, заключается в следующем: [1] – предложена аналоговая модель для исследования распределения потенциалов и токов в системе «рельсы-протяженный заземлитель»; [2] – разработана математическая модель системы «рельсы-протяженный заземлитель» без учета взаимного влияния элементов системы друг на друга; [4] – проведено моделирование распределение электрического поля в трехлучевом стаканном фундаменте ТСС-4; [5] – предложен способ контроля величины тока в заземляющем устройстве; [6] – предложена конструкция заземляющего устройства в виде заземляющего провода; [7] – предложена конструкция заземляющего устройства в виде вертикальных электродов, объединенных заземляющим проводом; [8] – проведен анализ систем заземления опор контактной сети постоянного тока; [9] – проведены расчет и сравнение величины сопротивления горизонтального заземлителя и проводов различных марок.

**Лесников Дмитрий Валентинович**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЯГОВЫХ СЕТЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА  
С ПОМОЩЬЮ ПРОТЯЖЕННЫХ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ  
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ОПОР КОНТАКТНОЙ СЕТИ**

**05.22.07 – Подвижной состав железных дорог,  
тяга поездов и электрификация (технические науки)**

Подписано в печать «8» октября 2018

Формат 60 x 84 1/16.

Усл. печ. л. 1,2.

Тираж 100 экз.

Заказ .

---

УрГУПС, 620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66