

*На правах рукописи*

**Муратова-Милехина Анна Сергеевна**

**РАЗРАБОТКА ИННОВАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ  
ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ  
ТЯГОВОЙ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

Специальность 05.22.07 – «Подвижной состав железных дорог,  
тяга поездов и электрификация»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Ростов-на-Дону

2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ростовском государственном университете путей сообщения (ФГБОУ ВО РГУПС) на кафедре «Автоматизированные системы электроснабжения»

**Научный руководитель:** **Быкадоров Александр Леонович,**  
доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизированные системы электроснабжения» ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения»

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

**Герман Леонид Абрамович,**  
доктор технических наук, профессор, Филиал СамГУПС в Нижнем Новгороде

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

Защита состоится «24» декабря 2021 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 218.010.01 на базе ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС) по адресу: 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения д. 2, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в 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 «\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор

В.А. Соломин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года направлена на достижение параметров экономической эффективности, функциональной безопасности и устойчивости отечественного железнодорожного транспорта за счёт внедрения инновационных технологий в области эксплуатации объектов железнодорожного транспорта. Для достижения этой цели планируется разработка новых технических решений, использование высокоточных систем моделирования элементов инфраструктуры на базе широкого использования современных средств вычислительной техники и информационных технологий.

Для эффективного управления перевозочным процессом на электрифицированных железных дорогах энергодиспетчерский аппарат должен получать достоверную информацию об оперативной обстановке на перегоне. Это требование имеет особое значение при возникновении аварийных ситуаций, при которых нарушается движение поездов. Такая ситуация возникает, например, при устойчивом коротком замыкании в тяговой сети. Короткое замыкание является серьёзной аварией, влекущей за собой вынужденный простой поездов. На поиск места короткого замыкания тратится от нескольких минут до нескольких часов, а на устранение повреждения требуется дополнительное время. Чем быстрее и точнее будет определено место короткого замыкания в контактной сети перегона, тем быстрее будет восстановлен график движения поездов. Это имеет особое значение при высокоскоростном и тяжеловесном движении. В течение более полувека проводится разработка теоретических методов и средств определения места короткого замыкания. За этот период времени выполнено и продолжает выполняться большое количество теоретических и практических исследований, издано много научных публикаций на эту тему. Это свидетельствует о сложности, практической значимости и актуальности проблемы определения удалённости короткого замыкания в тяговой сети.

Значительный вклад в теорию и практику решения проблемы определения места короткого замыкания в тяговой сети внесли работы, выполненные Бочевым А.С., Быкадоровым А.Л., Германом Л.А., Дынькиным Б.Е., Жарковым Ю.И., Зимаковым В.А., Корсаковым Г.М., Косаревым Б.И., Косаревым А.Б., Кузнецовым В.В., Овласюком В.Я., Петровой Т.Е., Петровым И.П., Поповой Н.А., Пупыниным В.Н., Самсоновым Ю.Я., Стороженко Е.А., Сухопрудским С.Д., Фигурновым Е.П. и другими авторами.

Имеются значительные теоретические достижения в этой области знаний. Самыми важными из них являются аналитические методы определения расстояния до места короткого замыкания, которые могут в той или иной степени учитывать схемы питания, сопротивление дуги и переходное сопротивление рельсы-земля. Однако при их разработке использовались сложные аналитические преобразования и с целью упрощения недостаточно учитывались неоднородности структуры тяговой сети. Эти упрощения влияют на точность определения места короткого замыкания.

**Цель работы.** Целью диссертационной работы является разработка метода, обеспечивающего повышенную точность определения места короткого

замыкания на основе учёта неоднородностей в структуре тяговой сети и влияния дуги на параметры петли короткого замыкания.

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

1. Анализ существующих методов и средств определения места короткого замыкания в тяговой сети переменного тока.
2. Обозначение неоднородностей в структуре тяговой сети, которые могут потенциально влиять на погрешность при определении места повреждения.
3. Анализ взаимного влияния параметров тяговой сети и дуги на параметры петли короткого замыкания.
4. Разработка детализированной компьютерной модели тяговой сети и выбор математического аппарата модели, который позволит рассчитывать схемы питания тяговой сети сложной конфигурации.
5. Сравнительный анализ влияния неоднородностей структуры тяговой сети, дуги, схем питания и степени их детализации на погрешность при определении места короткого замыкания.
6. Разработка и математическое обоснование метода определения места короткого замыкания, учитывающего неоднородности структуры тяговой сети.
7. Оценка погрешности предлагаемого метода определения места короткого замыкания.

**Методы исследований.** При решении поставленных задач в диссертационной работе использовались методы математического и компьютерного моделирования, анализа электрических сетей, теории распознавания образов, матричного анализа и численные методы расчёта в интерактивной среде Matlab.

**Достоверность научных положений и выводов.** Изложенные в работе основные положения, выводы и рекомендации подтверждены строгостью теоретического обоснования, сопоставлением результатов расчета на компьютерной модели с известными теоретическими положениями, справочными данными, результатами экспериментальных исследований на действующем участке железной дороги.

**Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:**

1. Разработан и теоретически обоснован способ определения удаленности места короткого замыкания в тяговой сети, позволяющий учитывать её неоднородности и переходное сопротивление дуги, на который получен патент.
2. Разработана компьютерная модель тяговой сети переменного тока, которая обладает высокой степенью детализации элементов контактной сети, рельсовой цепи, встречающихся неоднородностей и различных схем питания.
3. Разработан алгоритм реализации метода определения места короткого замыкания, содержащий структурную схему, новый способ определения удаленности места короткого замыкания и предложения по использованию существующих технических средств его реализации.

**Практическая ценность работы.** Выполнены теоретические исследования, на базе которых разработана компьютерная модель тяговой сети переменного тока, позволяющая рассчитывать схемы тяговой сети с высокой степенью детализации. Разработан метод, содержащий способ и алгоритм его использования, которые позволят с повышенной точностью определять удаленность места

устойчивого короткого замыкания на базе средств автоматизированного рабочего места (АРМ) энергодиспетчера. Предложено использовать метод в средствах цифровой автоматики фидера контактной сети ИнТер-27,5-ФКС.

**На защиту выносятся:**

1. Метод определения места короткого замыкания, учитывающий неоднородности тяговой сети и переходное сопротивление дуги.
2. Способ и алгоритм практической реализации метода определения места короткого замыкания.
3. Детализированная компьютерная модель, учитывающая неоднородности структуры тяговой сети.
4. Результаты исследований влияния неоднородности структуры тяговой сети на точность определения места короткого замыкания.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались: на Всероссийской научно-практической конференции «Транспорт-2009», «Транспорт-2012», (г.Ростов-на-Дону); Международной научно-практической конференции «Транспорт-2013», «Транспорт-2014» (г.Ростов-на-Дону); VII Международной научно-практической конференции «Электрификация транспорта «ТРАНСЭЛЕКТРО-2014» (Днепропетровский университет железнодорожного транспорта, г. Днепропетровск, Украина); Международной научно-практической конференции «Перспективы развития и эффективность функционирования транспортного комплекса Юга России» (г. Ростов-на-Дону, 2015 г.); Международной научно-практической конференции «Транспорт: наука, образование, производство. («Транспорт 2016», «Транспорт 2018», г. Ростов-на-Дону).

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 15 печатных работ, в том числе 4 – в рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, получен 1 патент РФ на изобретение.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, библиографического списка, включающего в себя 110 наименований. Общий объём работы 154 страницы, включая 81 рисунок и 7 таблиц и 5 приложений.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснованы актуальность, значимость выбранной темы диссертации, её научное и практическое значение, связанное с повышением точности определения места короткого замыкания в тяговой сети переменного тока, сформулированы цель и задачи исследований, излагаются подходы и методы исследований, отмечаются научная новизна и практическая значимость работы.

**В первой главе** приводится анализ известных способов и технических средств определения места короткого замыкания (КЗ) в тяговой сети, проанализированы неоднородности элементов структуры тяговой сети.

Устойчивое КЗ в тяговой сети железной дороги является аварией, которая вызывает вынужденный простой поездов. Методы определения места КЗ в линиях электропередач высокого напряжения в полной мере не могут быть использованы

из-за специфики тяговых сетей. Наиболее приемлемыми для тяговых сетей переменного тока являются дистанционные методы.

На практике при устойчивых КЗ повреждения обнаруживают поочередным отключением продольных разъединителей, которыми контактная сеть разделена на участки (секции), и последующим опробованием контактной сети включением фидерного выключателя. Для снижения износа силового оборудования осуществляется контроль уровня наведённого напряжения в поврежденной отключённой линии от соседнего пути и линии продольного электроснабжения два провода-рельс (ДПР). Точность этого метода зависит от длины секций.

На железных дорогах Австрии (компания Frauscher) для определения места короткого замыкания исследуют технологию распределенного акустического зондирования волоконно-оптического кабеля, проложенного параллельно железнодорожным путям («Технология DAS»). Эта технология позволяет регистрировать и анализировать деформации волоконно-оптического кабеля, вызванные акустическими сигналами, сопровождающими короткое замыкание. Предполагается, что место короткого замыкания может быть определено этим методом с точностью 10 м. Подобные исследования проводятся и на железных дорогах Германии (FOS - Fiber Optic Sensing), США (BNSF, компания Opta Sense), Японии (компания JR East). Однако на результаты измерений могут влиять более 20 параметров: энергоемкость короткого замыкания; расстояние от дуги до волоконно-оптического кабеля; окружающий шум (дождь, ветер, проходящие поезда и т.д.). «Технологию DAS» не выгодно использовать для решения отдельной проблемы. Её реализация будет выгодна лишь при решении комплекса проблем на железной дороге, что связано с большими капитальными вложениями.

Наибольшее распространение в тяговых сетях переменного тока в нашей стране получили дистанционные методы, анализирующие место повреждения по параметрам аварийного режима.

В основу самого раннего метода дистанционного определения места повреждения был заложен принцип измерения полного сопротивления петли короткого замыкания и названного «метод Z». На его основе был создан указатель места короткого замыкания (УКЗН), принцип работы которого был использован ВНИИЖТом в серии приборов определения места короткого замыкания ОМП (ОМП-68, ОМП-71, ОМП-73, Лисна), которые были включены в систему телемеханики. Однако желаемых результатов не было достигнуто из-за низкой точности определения места повреждения.

С появлением системы электроснабжения 2х25 кВ был предложен метод и устройство, при котором по отношению токов, измеренных на питающих подстанциях в момент КЗ, можно судить об удалённости места КЗ. Нелинейный характер этих отношений и влияние уравнительного тока создавали значительную погрешность. Хороший результат при одностороннем питании контактной сети давал «метод X», основанный на зависимости индуктивного сопротивления от расстояния до места повреждения. При двустороннем питании на точность этого метода влияет сопротивление дуги.

Использование индуктивно развязанных схем замещения тяговой сети, в сочетании с применением вычислительной техники, цифровых методов измерений

токов и напряжений, способствовало появлению новых методов определения места короткого замыкания в контактной сети. Существенным успехом в разработке методов определения места короткого замыкания является появление методов, учитывающих сопротивление дуги. Эти методы, являющиеся развитием и уточнением «метода Х», получили названия ОМП-Х1 и ОМП-Х2. В методе ОМП-Х1 впервые применено удельное индуктивное сопротивление рельсовой цепи  $x'_{p,mv}$ , которое вычисляется методом последовательных приближений. Расчётная формула метода ОМП-Х2, в которой учитывается сопротивление дуги  $R_D$ , имеет следующий вид:

$$l_K = \frac{U_A e^{j(\varphi_1 - \alpha_{\Sigma})} - I_K R_D e^{j(\delta_A - \alpha_{\Sigma} - \alpha_N)}}{I_1 z_{\Sigma}} = \frac{U_A \sin(\varphi_1 - \delta_A + \alpha_N)}{I_1 z_{\Sigma} \sin(\alpha_{\Sigma} - \delta_A + \alpha_N)}, \quad (1.1)$$

$$R_D = \frac{U_A \sin(\varphi_1 - \alpha_{\Sigma})}{I_K \sin(\delta_A - \alpha_{\Sigma} - \alpha_N)},$$

где  $U_A$  – напряжение на шинах подстанции  $A$ ;  
 $I_K$  – ток короткого замыкания;  
 $I_1$  – ток фидера с повреждённой контактной сетью;  
 $\varphi_1$  – угол между током  $I_1$  и напряжением  $U_A$ ;  
 $z_{\Sigma}$  и  $\alpha_{\Sigma}$  – модуль и аргумент удельного сопротивления  $z_{\Sigma}$  петли КЗ;  
 $D_A, \delta_A$  – модуль и аргумент комплекса  $D_A$ ;  
 $N, \alpha_N$  – модуль и аргумент комплекса  $N$ .

Для определения  $l_K$  необходимо в момент КЗ измерить параметры петли короткого замыкания  $U_A, I_1, \varphi_1$ , затем вычислить углы  $\alpha_{\Sigma}, \delta_A, \alpha_N$  и модуль эквивалентного удельного сопротивления  $z_{\Sigma}$ .

Недостатками метода являются: зависимость углов  $\alpha_{\Sigma}, \delta_A, \alpha_N$  от схемы питания и от искомого расстояния  $l_K$ , что вызывает необходимость применения метода последовательных приближений.

Среди современных технических средств, имеющих функцию определения места короткого замыкания, следует отметить интеллектуальный терминал питающей линии тяговой сети 27,5 кВ ИнТер-27,5-ФКС, который реализует функцию определения места повреждения (ОМП) в контактной сети по специальной методике. Методикой предусмотрен опыт короткого замыкания без дуги, по результатам которого вычисляется погонного сопротивления  $x_0$  индуктивной составляющей параметра петли короткого замыкания по формуле  $x_0 = Z_1 \sin \varphi_1 / L_{AB}$ , где  $L_{AB}$  – длина межподстанционной зоны.

При реальном коротком замыкании терминал измеряет параметры петли короткого замыкания, вычисляет индуктивную составляющую петли  $X_{K3}$  и рассчитывает расстояние  $L_{K3}$  до места короткого замыкания по формуле  $L_{K3} = X_{K3} / x_0$ , где  $X_{K3}$  – индуктивная составляющая петли при реальном КЗ.

Недостатками применяемой методики являются:

1. Погонное сопротивление  $x_0$  представляет среднюю величину, в которой нивелированы реальные места расположения неоднородных элементов тяговой сети вдоль пути.

2. При реальных КЗ с дугой и двустороннем питании расчёты будут давать погрешность, так как дуга при двустороннем питании влияет на  $x_0$ .

Эти недостатки приводят к тому, что погрешность при определении места КЗ может достигать 1 км. По этой причине функция определения места КЗ в устройствах ИнТер-27,5-ФКС имеет ограниченное применение.

Тяговая сеть железных дорог переменного тока представляет сложную неоднородную электрическую цепь, в которой можно выделить следующие неоднородности: разнообразие схем питания тяговой сети; неравномерный износ контактных проводов вдоль пути; применение разных типов подвесок контактной сети вдоль пути; наличие тросов группового заземления, имеющих прерывистый характер включения вдоль пути; наличие поперечных соединений проводов контактной сети; наличие рельсовых междупутных перемычек; наличие участков тяговой сети с различной шириной сближения путей; сезонный характер сопротивления системы рельсы-земля; зависимость сопротивления рельсовой цепи от токов КЗ; влияние утечки токов на удельное сопротивление тяговой сети; варианты взаимного влияния элементов тяговой сети; неоднородность схемы внешнего электроснабжения. К перечисленному списку можно добавить случайный характер переходного сопротивления дуги в месте короткого замыкания.

Значительными теоретическими достижениями в проблеме определения места КЗ являются разработанные аналитические методы, в которых учитывается сопротивление дуги и переходное сопротивление системы рельсы-земля. Однако проблема определения места КЗ до сих пор остаётся актуальной, поскольку аналитические методы требуют сложных, громоздких выводов и измерений значительного количества параметров: напряжений, токов и фазовых углов. При этом неучтенным остаётся большинство перечисленных выше неоднородностей тяговой сети.

**Во второй главе** выполнен анализ взаимного влияния параметров тяговой сети и дуги на параметры петли короткого замыкания. Дуга является главным дестабилизирующим фактором при определении места повреждения в тяговой сети, поскольку её параметры меняются в широком диапазоне и имеют случайный характер. В данной главе изложены результаты аналитических и компьютерных исследований условий влияния дуги на параметры петли короткого замыкания. Исследования проводились в широком диапазоне значений параметров дуги и расстояний до места КЗ. Установлено, что при схеме двустороннего питания дуга создаёт в сопротивлении петли короткого замыкания дополнительную индуктивную составляющую  $r_{\text{Д}} \frac{jI_{r1}I_{x2} - jI_{x1}I_{r2}}{I_{r,1}^2 + I_{x,1}^2}$ , числитель которой равен нулю только при отсутствии уравнительного тока.

Влияние дуги на другие параметры петли КЗ –  $Z$ ,  $R$ ,  $X$ ,  $\varphi$  исследовалось на компьютерной модели при схеме двустороннего питания и сопротивлениях  $Z_{\text{Д}}$  (0-10 Ом) и расстояниях до места КЗ  $L_3$  (0-24 км). Полученные графические зависимости  $(Z, R, X, \varphi) = f(L_3, Z_{\text{Д}})$ , представлены на рисунке 1.

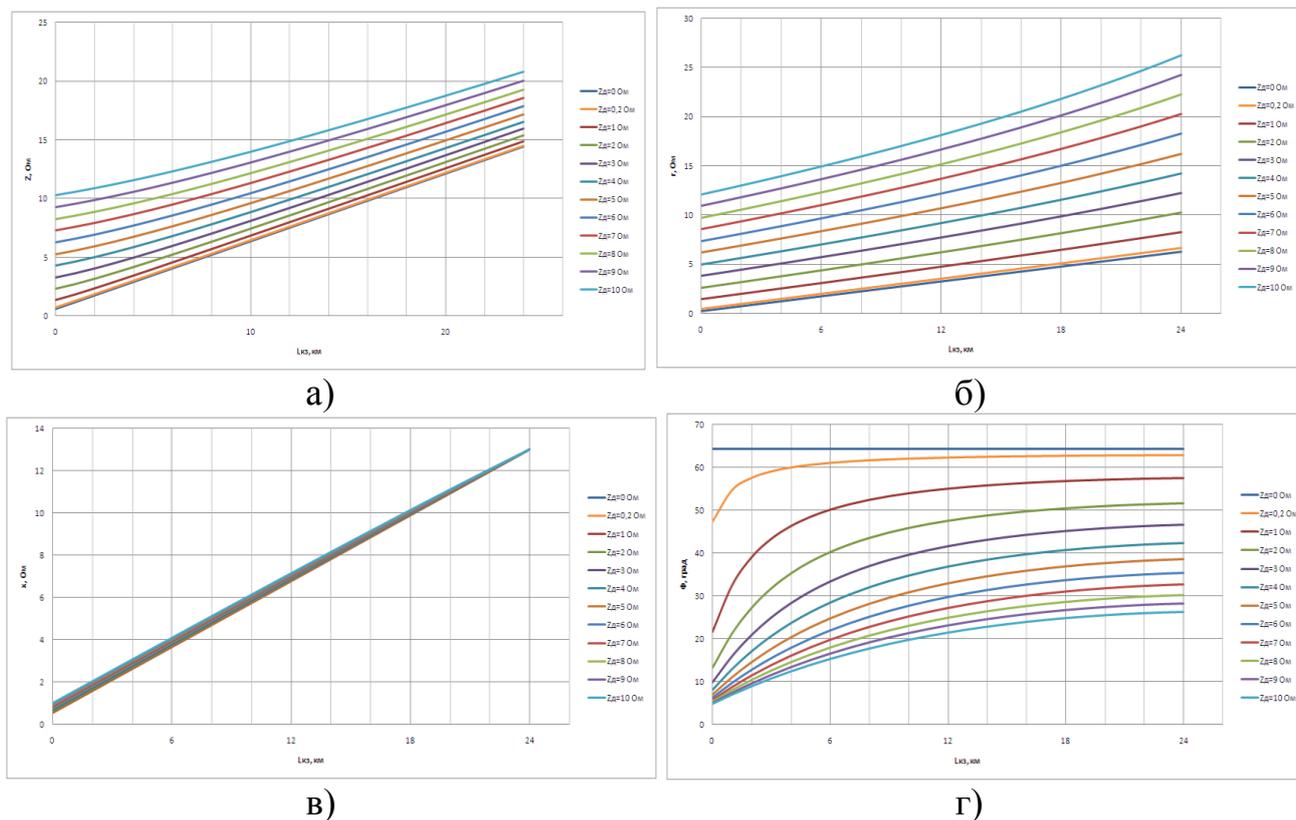


Рисунок 1 – Влияние сопротивления дуги на полную (а), активную (б), индуктивную (в) составляющие и фазовый угол (г) сопротивления петли КЗ при двустороннем питании

На рисунках видно, что при  $Z_d = 0$  графики всех параметров петли КЗ линейны, но по мере роста сопротивлений дуги становятся нелинейными (рисунок 1а, б, г). График индуктивной составляющей на рисунке 1в остаётся практически линейным, дуга меняет лишь его ширину.

Дуга существенно влияет на разброс параметров петли КЗ, граница которых составляет: по активному сопротивлению 12,5-20 Ом; по полному сопротивлению 12,5-15 Ом; по индуктивному сопротивлению 0,5-0 Ом; по фазовому углу 60 - 31 градусов. Поскольку фазовый угол является одним из трёх параметров, измеряемых в момент короткого замыкания, использование его при разработке нового метода определения места КЗ является актуальным.

Взаимная индуктивность смежных путей является неоднородностью, которую следует учитывать. Влияние этого фактора и дуги на параметры петли КЗ исследовалось при двух схемах питания: консольно-кольцевой и двустороннего питания. Аналитический анализ показал, что при схеме двустороннего питания и уравнительном токе взаимная индукция и дуга изменяют не только индуктивную, но и активную составляющую петли КЗ.

На графических зависимостях  $(Z, R, X, \varphi) = f(L_3, Z_d, Z_M)$ , рассчитанных на компьютерной модели, показано, что взаимная индуктивность и дуга придают им нелинейность и разброс. Например, на 24 км при  $Z_d = 0$  взаимная индуктивность изменяет параметр  $X$  на 12,5 Ом;  $R$  на 7,5 Ом;  $\varphi$  на 5 градусов.

**Третья глава** посвящена компьютерному моделированию тяговой сети переменного тока для решения задач определения места короткого замыкания. Существующие методы определения места короткого замыкания, базируются на аналитических моделях и эквивалентировании элементов тяговой сети с целью упрощения. Определение места короткого замыкания в тяговых сетях связано с расчётом тока короткого замыкания и на этой основе получение параметров петли короткого замыкания. Для повышения точности определения места КЗ, необходимо расчёт токов КЗ производить на моделях с повышенной детализацией структуры тяговой сети. Современные компьютерные технологии позволяют успешно решать подобные задачи.

Детализированная компьютерная модель должна отвечать следующим требованиям: максимально учитывать неоднородности тяговой сети; иметь минимальную степень эквивалентирования элементов контактной сети, рельсов, балластной призмы; иметь сопряжение блока рельсов с объёмным блоком многослойной земли с целью приближения к реальным условиям утечки токов вдоль пути; максимально учитывать взаимную индуктивность элементов тяговой сети.

Платформой моделирования был выбран Matlab, а математическим аппаратом – матричный анализ. Это позволило заменить составление сложных расчётных формул, применяемых при аналитических моделях, компьютерным моделированием тяговых сетей, имеющих множество элементов взаимного влияния. Одним из важных преимуществ матричного анализа является то, что алгоритм решения уравнений не зависит от схемы электроснабжения и степени её детализации, а матрица сопротивлений ветвей достаточно просто учитывает собственные и взаимные сопротивления ветвей схемы.

В данной главе исследовалось влияние степени детализации моделей на параметры петли короткого замыкания при различных схемах питания тяговой сети. Моделирование выполнялось поочерёдно для каждой отдельно взятой неоднородности, чтобы оценить эффективность её учёта.

При моделировании неоднородности структуры тяговой сети однопутного участка с односторонним питанием рассмотрено влияние степени детализации элементов тяговой сети на параметры петли короткого замыкания (рисунок 2).

На рисунке 2 представлены три варианта моделей однопутного участка с односторонним питанием, в которых с различной степенью выполнена детализация только элементов системы рельсы-земля, но контактная сеть при этом оставлена эквивалентированной по известным формулам.

На рисунке 2,а представлена модель № 1, в которой рельсовая цепь представлена эквивалентированным сопротивлением рельсы – земля  $Z_p$ . В модели № 2 (рисунок 2,б) применено размещение переходных сопротивлений системы рельсы-земля по длине участка, т.е. сделана попытка приближения схемы к реальным условиям. Это позволяет учесть неравномерное распределение токов в рельсах за счёт утечки токов в землю. В модели № 3 (рисунок 2,в), по сравнению с моделью № 2, смоделирована земля с верхним и нижним слоями на глубину 10 метров.

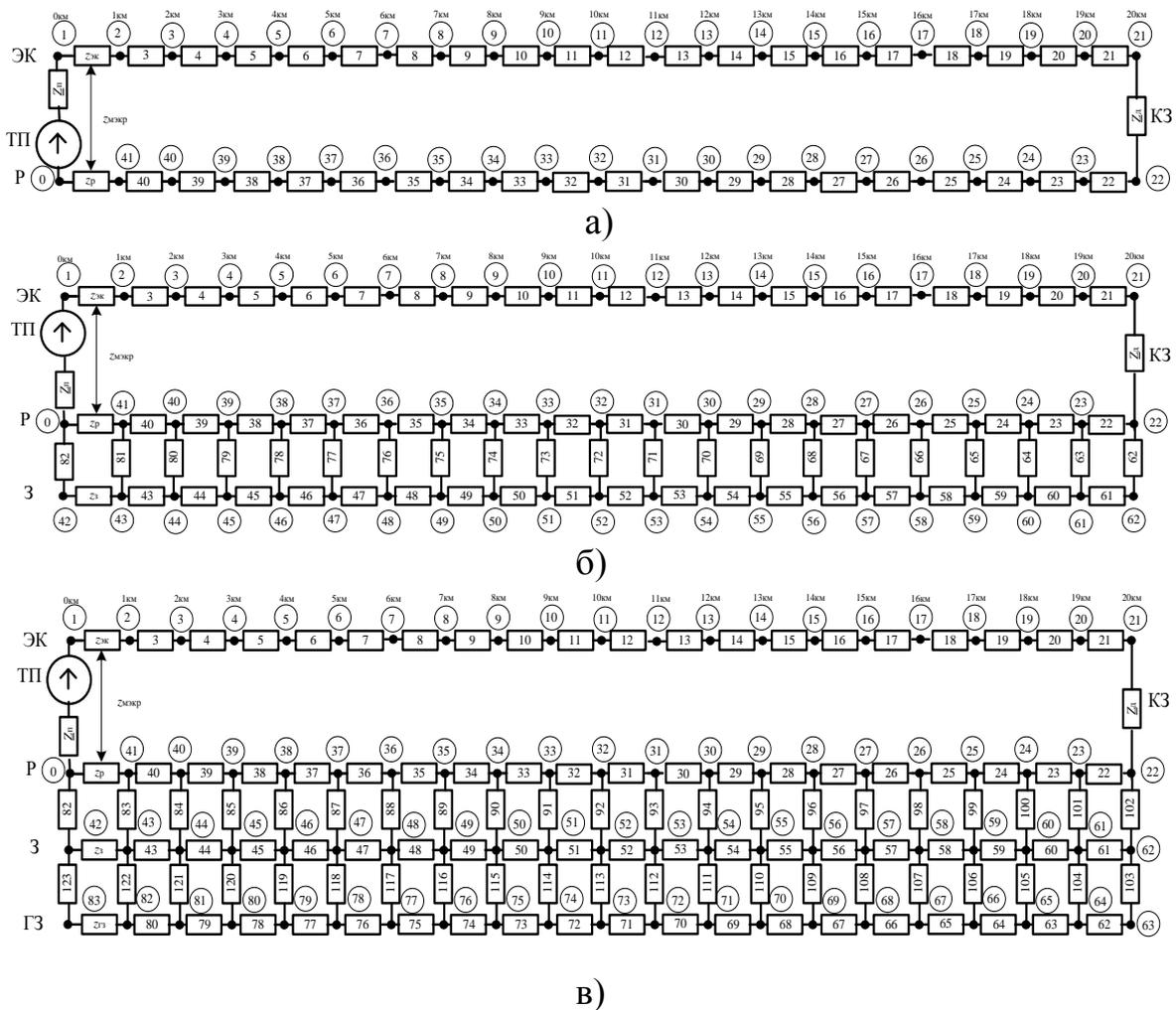
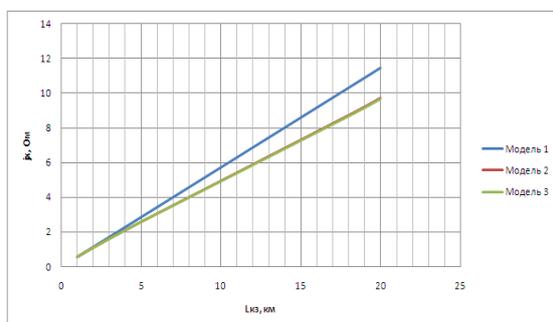


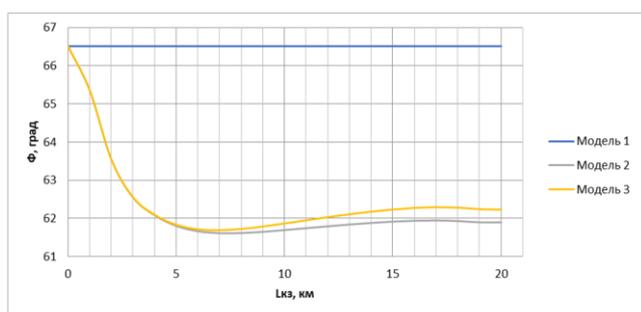
Рисунок 2 – Варианты моделей однопутного участка тяговой сети с односторонним питанием и различной степенью детализации

Численные значения элементов моделей принимались для следующих условий: рельсы Р65; контактная подвеска ПБСМ70+МФ100; переходное сопротивление рельсы-земля 3 Ом; проводимость земли  $5 \cdot 10^{-3}$  См/м; расстояние между контактной сетью и рельсами 6,55м.

На рисунке 3,а показано влияние степени детализации на индуктивное сопротивление петли КЗ, а на рисунке 3,б влияние на фазовые углы петли КЗ.



а)



б)

Рисунок 3 – Влияние степени детализации модели на индуктивную составляющую сопротивлений и фазовые углы

Анализ представленных графиков показывает по каждому отдельному параметру, что детализация элементов рельсовой цепи и земли на модели № 3 уменьшает погрешности в определении места повреждения при глухом КЗ по сравнению с моделью № 1 максимум по активной составляющей на 3,77 %; по индуктивной составляющей на 21,74 %; по полному сопротивлению на 14,06 %; по фазовому углу на 5,87 %.

На модели № 3 было проведено короткое замыкание на 20 км с дугой 3 Ом. Распределение тока КЗ в рельсах, в верхнем и нижнем слоях земли представлены на рисунке 4.

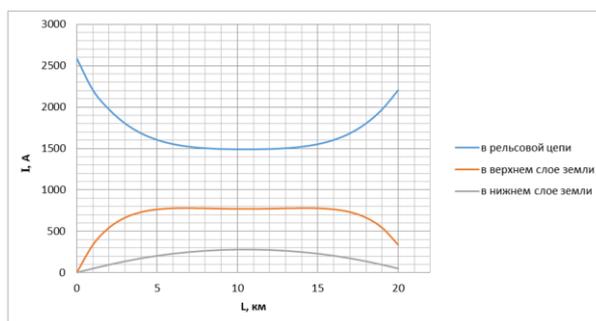


Рисунок 4 – Графики распределения токов в рельсах, в верхнем и нижнем слоях земли при КЗ

Экспериментальные исследования, проведенные в Центре физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН на действующем однопутном участке переменного тока, показали, что доля тока в рельсах составляет 45-65 % от тягового тока. Это качественно соответствует результатам, представленным на рисунке 4 и подтверждает адекватное моделирование процессов на модели № 3.

В диссертации приведены фрагменты моделей тяговых сетей, на которых исследовалось влияние троса группового заземления и износа контактного провода параметры петли короткого замыкания.

Учёт троса группового заземления изменяет параметры петли КЗ: по активной составляющей на 7,22 %; по индуктивной составляющей на 1,79 %; по полному сопротивлению на 3,55 %; по фазовому углу на 2,78 %.

Учёт износа проводов изменяет параметры петли КЗ нового контактного провода по отношению к изношенному: по активной составляющей на 2,86 %; по индуктивной составляющей на 4,91 %; по полному сопротивлению на 5,03 %; по фазовому углу на 0,93 %.

В диссертации на трёх моделях двухпутного участка с двусторонним питанием длиной 54 км выполнены аналогичные исследования влияния степени детализации на параметры петли короткого замыкания. Дополнительно на этом участке исследовалось влияние сезона и уширения междупутья. Например, изменение переходного сопротивления с 1 Ом·км на 10 Ом·км влияет на расхождение параметров петли КЗ по активной составляющей на 6,06 %; индуктивной составляющей на 1,92 %; полному сопротивлению на 2,38 %; фазовому углу на 2,04 %.

На рисунке 5 представлен фрагмент модели двухпутного участка двустороннего питания с усиливающим и экранирующим проводом (ЭУП). Взаимные сопротивления элементов показаны стрелками и внесены в соответствующие матричные формы.

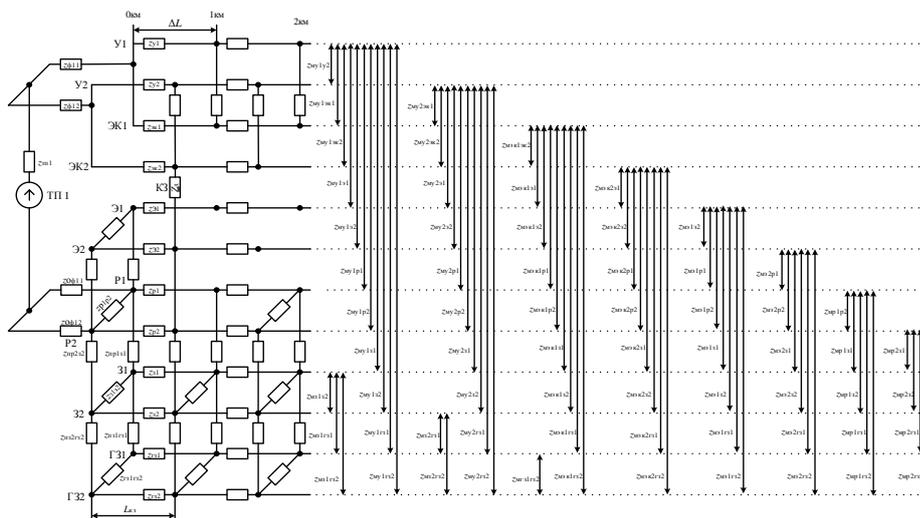


Рисунок 5 – Фрагмент детализированной модели тяговой сети двухпутного участка двустороннего питания с ЭУП

В тяговой сети с ЭУП основные неоднородности связаны с повышенным количеством поперечных связей. Усиливающий провод соединён с контактной подвеской через каждые 600-800 м. Экранирующий провод заземляется на нулевые точки дроссель трансформаторов на расстоянии не менее 4 км. На схеме (рисунок 5) не показаны поперечные соединения между рельсовыми цепями и экранирующими проводами первого и второго пути. Они учтены в модели и располагаются через каждые 4 км.

На схеме также не показан пост секционирования. Он учтен в модели и располагается на 27 км. Взаимные сопротивления всех элементов тяговой сети показаны стрелками и внесены в соответствующие матричные формы.

На модели с ЭУП исследовалось влияние неоднородности тяговой сети в виде поперечных связей контактного и усиливающего проводов, а также экранирующего провода и рельсов на параметры петли КЗ.

Неоднородность тяговой сети, вызванная поперечными связями проводов в системе с ЭУП, создаёт волновые пульсации на графиках параметров петли КЗ.

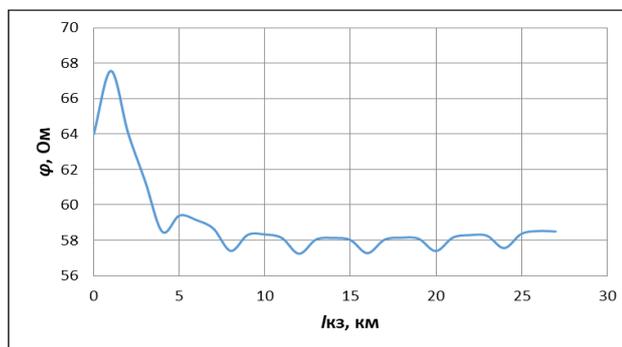


Рисунок 6 – Влияние удаленности места КЗ на фазовый угол сопротивления петли КЗ при схеме двустороннего питания двухпутного участка с ЭУП

В диссертации рассмотрен вопрос о влиянии токов короткого замыкания на удельное сопротивление рельсовой цепи. В нормальных режимах работы принимают допущение о том, что сопротивление рельсов  $z_p$  не зависит от протекающего тока. Это создаёт допустимые погрешности в поставленных

задачах. При коротких замыканиях ток в рельсах может принимать значение нескольких сотен и тысяч ампер на одну рельсовую нить (рисунок 7), что значительно превышает ток рабочего режима, а напряжённость магнитного поля может превышать порог насыщения рельсовой стали  $H=10-12A/cm$ .

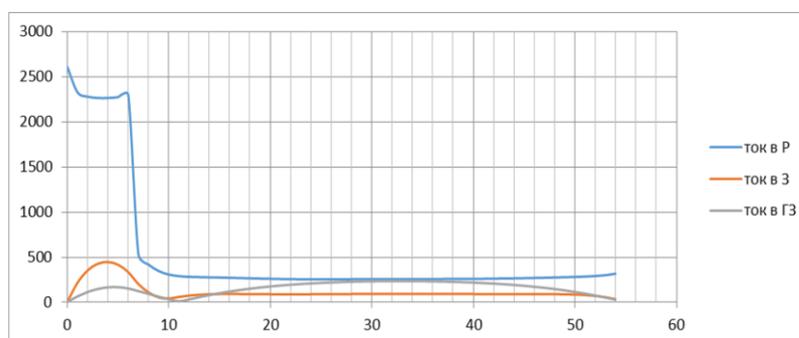


Рисунок 7 – Распределение тока близкого короткого замыкания в тяговой сети при схеме двустороннего питания

Величина тока КЗ в рельсах зависит от места короткого замыкания. Ток распределяется неравномерно в рельсах вдоль пути за счёт утечки в землю. Эту неоднородность достаточно сложно учесть аналитически. Компьютерное моделирование позволяет схемным путём учесть распределение тока в рельсах с учётом свойств балластной призмы и земли. Компьютерная модель позволяет разбить участок рельсовой цепи на отрезки длиной  $\Delta x$  и определять сопротивление каждого такого отрезка с учётом протекающего по нему тока.

Существуют методики, которые позволяют по известному току рассчитать соответствующее сопротивление рельсов. По фактической напряжённости магнитного поля вычисляют заранее полное сопротивление отдельных отрезков рельсов  $\Delta x$ . Полученные сопротивления  $\tilde{z}_p$  заменяют в матрицах справочное сопротивление  $z_p$ , по которому выполнялся первый расчёт. Затем выполняется повторный расчёт параметров петли короткого замыкания.

В таблице 1 приведены для сравнения значения сопротивлений петли КЗ при значениях сопротивлений  $z_p$  и  $\tilde{z}_p$ .

Таблица 1 – Сравнительная оценка параметров петли КЗ при сопротивлениях  $\tilde{z}_p$  и  $z_p$

Наименование параметров петли КЗ	Значения параметров петли КЗ	
	при $z_p$	при $\tilde{z}_p$
$r_{КЗ}$ , Ом	7,55	8,20
$x_{КЗ}$ , Ом	8,66	8,84
$Z_{КЗ}$ , Ом	11,49	12,06
$\varphi_{КЗ}$ , град	48,92	47,16

Учёт влияния токов на сопротивление рельсов позволяет существенно уменьшить погрешность при определении места КЗ. Предлагается при составлении базы данных кластеров (глава 4), содержащих расчётные параметры петель КЗ, расчёты производить в два этапа: сначала производить расчёт токов КЗ

без учёта влияния его на сопротивление рельсов, а затем по величине тока КЗ уточняют сопротивление рельсов и производят окончательный расчёт параметров петли короткого замыкания. Эти расчёты должны производиться при разных значениях сопротивлений дуги.

**В четвёртой главе** рассматривается предлагаемый метод определения места короткого замыкания – метод «С», основанный на сравнительном анализе рассчитанных и измеренных параметров петель коротких замыканий.

Приведены теоретическое и математическое обоснования метода. Показано, что каждое место короткого замыкания имеет некоторый образ в виде множества параметров петли короткого замыкания, характерных для этого места. Предлагается определять место короткого замыкания по результатам сравнения множества  $\{X\}$ , содержащего измеренные параметры петли КЗ, которые получены техническими средствами в момент КЗ, с рассчитанными заранее множествами  $\{x\}$  параметров петель КЗ на множестве заданных вектором  $[L]$  мест короткого замыкания.

Показано, что методология такого сравнения аналогична «Методу сравнения эталонов» в теории распознавания образов. При выполнении идентификации образов важным моментом является оценка степени соответствия численных значений измеренных и рассчитанных параметров петель КЗ. Параметры  $\{x\}$  рассчитываются на границах интервалов  $\Delta L_k = L_k - L_{k-1}$ , на которые условно разделяется тяговая сеть ( $\Delta x_k = x_k - x_{k-1}$ ). Элементы  $X$  и  $x$  считаются совпадающими, если  $x_k \geq X \leq x_{k-1}$ . Количество совпадений  $[Y]$ , при сравнении рассчитанных элементов  $\{x\}$  с измеренными  $\{X\}$ , суммируется. Столбец, в котором  $Y$  имеет наибольшее значение, указывает на место короткого замыкания.

Множества  $\{x\}$  в виде векторов-столбцов образуют матрицу  $[M_j]$ . Расчёты параметров  $\{x\}$  в составе матрицы  $[M_j]$  должны производиться при конкретных значениях сопротивлений дуги  $R_d$ . Поскольку  $R_d$  заранее не известно, предлагается расчёты  $\{x\}$  выполнять для множества значений дуги, заданных с определённым шагом в соответствии с элементами вектора-столбца  $[R_d]$ . Это означает, что количество матриц  $[M_j]$  должно быть равно количеству элементов вектора-столбца  $[R_d]$ . Множество матриц  $[M_j]$  образуют сводную матрицу  $[M]$ . Результаты расчётов  $[M]$  сохраняются в базах данных присоединений.

Метод определения места повреждения контактной сети, основанный на сравнительном анализе измеренных и рассчитанных параметров петель коротких замыканий, предложено назвать метод «С».

Порядок формирования сводной матрицы  $[M]$  показан на примере двухпутного участка, представленного на рисунке 8.

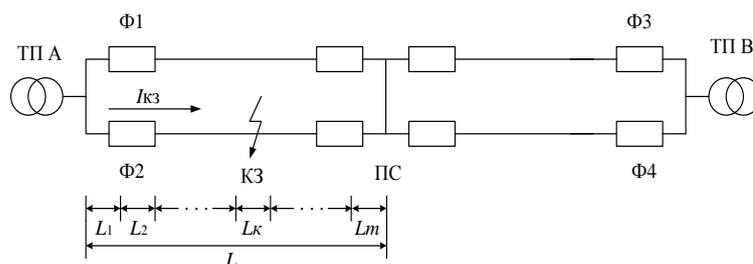


Рисунок 8 – Схема двухпутного участка с двусторонним питанием тяговой сети

Каждый участок тяговой сети  $L$  от подстанции до поста секционирования разбивается на « $m$ » условных участков. Протяжённость каждого условного участка определяется разностью  $\Delta L_k = L_k - L_{k-1}$ . Удобно принимать длину условного участка равной длине пикета – 100 м. На границах выделенных участков  $[L_0, L_1, L_2, \dots, L_k, \dots, L_m]$  производится расчёт токов короткого замыкания при значениях вектора сопротивлений дуги  $[R_d]$ . В результате получают множества расчётных величин токов короткого замыкания  $\{I_p\}$  и фазовых углов  $\{\varphi_p\}$ , по которым вычисляют производные параметры петель КЗ:  $R_p$  – активное,  $X_p$  – индуктивное и  $Z_p$  – полное сопротивление. Численные значения этих параметров вместе с численными значениями фазового угла  $\varphi_p$  являются элементами  $(R_0, X_0, Z_0, \varphi_0)$  векторов-столбцов на множестве  $\{x\}$  матрицы  $[M_j]$ . Результаты расчётов  $\{x\}$  матриц  $[M_j]$  объединены в сводную матрицу  $[M]$  (рисунок 9), которая является одной из частей информационной базы конкретного присоединения.

Наименование вычисляемых производных параметров	$R_d$ , Ом	Значения вычисленных параметров петли КЗ на участках разбиения схемы питания					Производные параметры по результатам измерений	
		№1 $[L_0, \dots, L_1]$	№2 $[L_1, \dots, L_2]$	...	№ $k$ $[L_{k-1}, \dots, L_k]$	...		№ $m$ $[L_{m-1}, \dots, L_m]$
$R_p$ , Ом	$R_{до}$	$[R_{0,0}; R_{0,1}]$	$[R_{0,1}; R_{0,2}]$	...	$[R_{0,k-1}; R_{0,k}]$	...	$[R_{0,m-1}; R_{0,m}]$	$R_{и}$ , Ом
$X_p$ , Ом		$[X_{0,0}; X_{0,1}]$	$[X_{0,1}; X_{0,2}]$	...	$[X_{0,k-1}; X_{0,k}]$	...	$[X_{0,m-1}; X_{0,m}]$	$X_{и}$ , Ом
$Z_p$ , Ом		$[Z_{0,0}; Z_{0,1}]$	$[Z_{0,1}; Z_{0,2}]$	...	$[Z_{0,k-1}; Z_{0,k}]$	...	$[Z_{0,m-1}; Z_{0,m}]$	$Z_{и}$ , Ом
$\varphi_p$ , град		$[\varphi_{0,0}; \varphi_{0,1}]$	$[\varphi_{0,1}; \varphi_{0,2}]$	...	$[\varphi_{0,k-1}; \varphi_{0,k}]$	...	$[\varphi_{0,m-1}; \varphi_{0,m}]$	$\varphi_{и}$ , град
$R_p$ , Ом	$R_{д1}$	$[R_{1,0}; R_{1,1}]$	$[R_{1,1}; R_{1,2}]$	...	$[R_{1,k-1}; R_{1,k}]$	...	$[R_{1,m-1}; R_{1,m}]$	$R_{и}$ , Ом
$X_p$ , Ом		$[X_{1,0}; X_{1,1}]$	$[X_{1,1}; X_{1,2}]$	...	$[X_{1,k-1}; X_{1,k}]$	...	$[X_{1,m-1}; X_{1,m}]$	$X_{и}$ , Ом
$Z_p$ , Ом		$[Z_{1,0}; Z_{1,1}]$	$[Z_{1,1}; Z_{1,2}]$	...	$[Z_{1,k-1}; Z_{1,k}]$	...	$[Z_{1,m-1}; Z_{1,m}]$	$Z_{и}$ , Ом
$\varphi_p$ , град		$[\varphi_{1,0}; \varphi_{1,1}]$	$[\varphi_{1,1}; \varphi_{1,2}]$	...	$[\varphi_{1,k-1}; \varphi_{1,k}]$	...	$[\varphi_{1,m-1}; \varphi_{1,m}]$	$\varphi_{и}$ , град
$R_p$ , Ом	$R_{д2}$	$[R_{2,0}; R_{2,1}]$	$[R_{2,1}; R_{2,2}]$	...	$[R_{2,k-1}; R_{2,k}]$	...	$[R_{2,m-1}; R_{2,m}]$	$R_{и}$ , Ом
$X_p$ , Ом		$[X_{2,0}; X_{2,1}]$	$[X_{2,1}; X_{2,2}]$	...	$[X_{2,k-1}; X_{2,k}]$	...	$[X_{2,m-1}; X_{2,m}]$	$X_{и}$ , Ом
$Z_p$ , Ом		$[Z_{2,0}; Z_{2,1}]$	$[Z_{2,1}; Z_{2,2}]$	...	$[Z_{2,k-1}; Z_{2,k}]$	...	$[Z_{2,m-1}; Z_{2,m}]$	$Z_{и}$ , Ом
$\varphi_p$ , град		$[\varphi_{2,0}; \varphi_{2,1}]$	$[\varphi_{2,1}; \varphi_{2,2}]$	...	$[\varphi_{2,k-1}; \varphi_{2,k}]$	...	$[\varphi_{2,m-1}; \varphi_{2,m}]$	$\varphi_{и}$ , град
$\Sigma$		0	0	...	4	...	3	

Рисунок 9 – Структура матрицы  $[M]$

Степень дискретности элементов вектора  $[R_d]$  влияет на точность определения места КЗ. Изменяя шаг дискретности, можно свести до минимума фактор случайности переходного сопротивления дуги.

Разработана структурная схема определения места короткого замыкания методом «С» (рисунок 10). На схеме изображены: место энергодиспетчера (2); интеллектуальный терминал ИнТер-27,5-ФКС (1); блок передачи данных (1); блок поиска баз данных (3), связанный с энергодиспетчером; кластер баз данных параметров коротких замыканий (4); блок передачи конкретной базы данных (5); операционный блок поиска места КЗ (6), который связан с рабочим местом энергодиспетчера. Существующая автоматизированная система управления электрооборудованием (АСУЭ) обеспечивает связь рабочего места энергодиспетчера с интеллектуальными терминалами ИнТер-27,5-ФКС тяговых подстанций.

Центральным местом схемы является кластер (4), в котором размещены базы данных расчетных параметров петель КЗ. Каждая такая база содержит информацию по конкретной питающей линии: номер аварийной зоны, схему питания, сезон, рассчитанные заранее блоки параметров петель КЗ в заданных точках зоны: сопротивления  $R_p$ ,  $X_p$ ,  $Z_p$  и фазовых углов  $\varphi_p$  при разных значениях сопротивлений дуги.

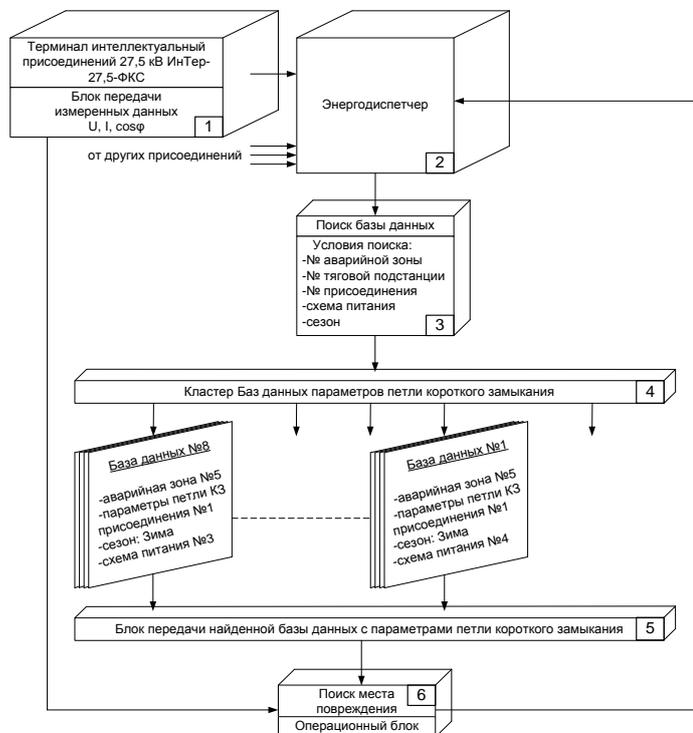


Рисунок 10 – Структурная схема определения места короткого замыкания методом «С»

В момент реального устойчивого КЗ интеллектуальный терминал фиксирует измеренные параметры КЗ  $U_{и}$ ,  $I_{и}$ ,  $\cos\varphi_p$  и передаёт их производные сопротивления  $Z_{и}$ ,  $R_{и}$ ,  $X_{и}$  и фазовый угол  $\varphi_{и}$  в операционный блок 6 (рисунок 10). Одновременно из терминала ИнТер-27,5-ФКС диспетчеру поступает информация о номерах аварийной тяговой подстанции и аварийной питающей линии (фидера).

Диспетчер, убедившись, что КЗ является устойчивым, вводит в поисковую систему запрос, содержащий номер аварийной зоны, номер аварийного присоединения (фидера), схему питания, погодные условия (сезон).

Поисковая система автоматически выбирает из кластера требуемую базу данных и отправляет ее в операционный блок. В операционном блоке происходит совмещение измеренных параметров петли короткого замыкания с параметрами из базы данных по аварийной зоне (рисунок 9).

Определение места короткого замыкания в операционном блоке сводится к процедуре сравнения значений измеренных элементов множеств  $\{R_{и}, X_{и}, Z_{и}, \varphi_{и}\}$  со значениями множеств  $\{R_0, X_0, Z_0, \varphi_0\}$  на участках  $[\Delta L_k]$ , из которых состоит матрица рассчитанных производных параметров короткого замыкания (рисунок 9). При каждом сравнении производится суммирование количества попаданий значений элементов множеств  $\{R_{и}, X_{и}, Z_{и}, \varphi_{и}\}$  в интервалы значений множества

$\{R_0, X_0, Z_0, \varphi_0\}$  в границах участков  $L_{k+1} \dots L_k$  при определенном значении дуги  $R_d$ . Участок  $\Delta L_k$  с наибольшей суммой попаданий разноимённых элементов в область с определенным значением дуги  $R_d$  соответствует месту короткого замыкания. В матрице на рисунке 9 это интервал  $\Delta L_k$  при значении дуги  $R_{d2}$  с наибольшим числом попавших разноимённых элементов 4. На способ определения места короткого замыкания получен патент на изобретение.

*Оценка погрешности предлагаемого метода «С».* Для оценки достоверности результатов определения места короткого замыкания методом «С» проводилось сравнение его результатов с имеющимися экспериментальными данными параметров короткого замыкания, которые были получены на действующем участке. Эксперимент проводился с целью получения фактических данных параметров петли короткого замыкания через дугу при заданном месте короткого замыкания.

Для исследований был выбран двухпутный участок СКЖД Погорелово – Старая Станица – Сысоево, оборудованный системами регистрации и сбора данных. Этот участок явился полигоном для разработки и корректировки метода «С».

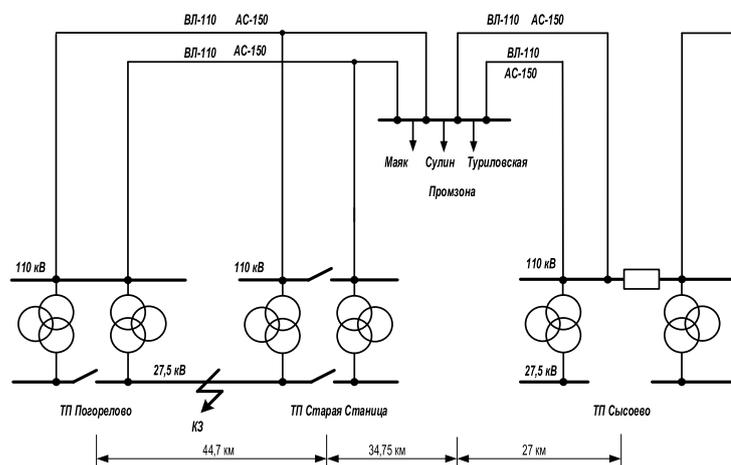


Рисунок 11 – Схема электроснабжения участка СКЖД Погорелово – Старая Станица – Сысоево

Тяговые подстанции Погорелово и Сысоево являются опорными. Между ними расположены промежуточная отпаечная подстанция Старая Станица и районная подстанция Промзона. Серия из трёх коротких замыканий была проведена в апреле 2011 года на межподстанционной зоне Погорелово – Старая Станица на перегоне Тарасовка – Глубокая в трёх местах на фиксаторах опор: № 242 (998 км) – первое КЗ; № 352 (1001 км 3 ПК) – второе КЗ; № 360 (1001 км 5 ПК) – третье КЗ. Сезон проведения эксперимента: весна,  $t=15^{\circ}\text{C}$ , пасмурно. Измерение параметров дуги КЗ выполнялось системой диагностики параметров подстанции СДПП.

*Расчёт параметров короткого замыкания для матрицы [M].* По технологии, описанной выше, на компьютерной модели был выполнен расчёт параметров короткого замыкания участка, на котором производился эксперимент. При составлении модели использованы параметры трансформаторов подстанций и контактной сети межподстанционной зоны Старая Станица – Погорелово. Параметры переходного сопротивления системы рельсы-земля выбраны в соответствии с

сезоном. Контактная сеть и рельсовая цепь были представлены самостоятельными элементами на каждом пути. Было учтено, что балластная призма опирается на глубокую землю. Расчёты проводились при параметрах дуги в предполагаемом диапазоне 0 – 10 Ом с шагом 0,1 Ом. Кроме того, при моделировании учтены конфигурация и параметры системы внешнего электроснабжения.

Практика расчётов показала, что границы интервалов разбиения участка  $\Delta L_k$  не следует размещать в каждом столбце матрицы [M], а удобнее считать границами интервалов смежные столбцы матрицы [M] (рисунок 12). Такой подход сокращает объём вводимой информации.

*Определение места короткого замыкания по результатам первого эксперимента на 998км на опоре № 242*

Параметры петли КЗ	Дуга, Ом	Расчитанные данные												Изм. данные	
		997	997,1	997,2	997,3	997,4	997,5	997,6	997,7	997,8	997,9	998	998,1		998,2
r	2,6	13,17	13,26	13,36	13,45	13,54	13,64	13,73	13,83	13,92	14,01	14,10	14,19	14,37	14,70
		11,66	11,76	11,85	11,94	12,03	12,12	12,21	12,31	12,40	12,47	12,53	12,60	12,65	12,18
		17,59	17,72	17,85	17,98	18,12	18,25	18,38	18,51	18,64	18,75	18,87	18,98	19,13	19,09
		41,53	41,55	41,57	41,59	41,61	41,63	41,65	41,67	41,69	41,66	41,63	41,60	41,37	39,64
x	2,7	13,47	13,57	13,67	13,76	13,86	13,95	14,05	14,15	14,24	14,34	14,43	14,52	14,65	14,70
		11,68	11,77	11,86	11,95	12,04	12,13	12,23	12,32	12,41	12,48	12,54	12,61	12,66	12,18
		17,83	17,96	18,09	18,23	18,36	18,49	18,62	18,76	18,89	19,00	19,12	19,23	19,36	19,09
		40,91	40,93	40,95	40,97	40,99	41,01	41,03	41,05	41,07	41,04	41,01	40,97	40,83	39,64
r	2,8	13,78	13,88	13,97	14,07	14,17	14,27	14,37	14,47	14,56	14,66	14,76	14,85	14,93	14,70
		11,69	11,78	11,87	11,96	12,05	12,15	12,24	12,33	12,42	12,49	12,56	12,62	12,66	12,18
		18,07	18,20	18,34	18,47	18,60	18,74	18,87	19,01	19,14	19,26	19,38	19,49	19,58	19,09
		40,30	40,32	40,34	40,36	40,38	40,40	40,42	40,44	40,46	40,43	40,40	40,36	40,29	39,64
r	2,9	14,08	14,18	14,28	14,38	14,49	14,59	14,69	14,79	14,89	14,99	15,09	15,18	15,22	14,70
		11,70	11,79	11,88	11,97	12,07	12,16	12,25	12,34	12,43	12,50	12,57	12,64	12,66	12,18
		18,31	18,44	18,58	18,72	18,85	18,99	19,12	19,26	19,40	19,52	19,63	19,75	19,80	19,09
		39,71	39,73	39,75	39,77	39,79	39,81	39,83	39,85	39,87	39,84	39,80	39,77	39,77	39,64
r	3	14,39	14,49	14,59	14,70	14,80	14,90	15,00	15,11	15,21	15,31	15,41	15,51	15,50	14,70
		11,71	11,80	11,89	11,99	12,08	12,17	12,26	12,35	12,45	12,51	12,58	12,65	12,67	12,18
		18,55	18,69	18,83	18,96	19,10	19,24	19,38	19,52	19,65	19,77	19,90	20,02	20,02	19,09
		39,14	39,16	39,18	39,20	39,21	39,23	39,25	39,27	39,29	39,26	39,22	39,19	39,26	39,64
r	3,1	14,69	14,80	14,90	15,01	15,11	15,22	15,32	15,43	15,53	15,64	15,74	15,85	15,78	14,70
		11,72	11,81	11,90	12,00	12,09	12,18	12,27	12,37	12,46	12,52	12,59	12,66	12,67	12,18
		18,79	18,93	19,07	19,21	19,35	19,49	19,63	19,77	19,91	20,03	20,16	20,28	20,24	19,09
		38,58	38,60	38,62	38,63	38,65	38,67	38,69	38,71	38,73	38,69	38,66	38,63	38,76	39,64
r	3,2	15,00	15,10	15,21	15,32	15,43	15,53	15,64	15,75	15,86	15,96	16,07	16,18	16,06	14,70
		11,73	11,82	11,92	12,01	12,10	12,19	12,28	12,38	12,47	12,54	12,60	12,67	12,68	12,18
		19,04	19,18	19,32	19,46	19,61	19,75	19,89	20,03	20,17	20,30	20,42	20,55	20,46	19,09
		38,03	38,05	38,07	38,09	38,11	38,13	38,14	38,16	38,18	38,15	38,11	38,08	38,28	39,64
$\Sigma$	1	1	1	2	2	2	3	1	1	1	1	1	1		

Рисунок 12 – Фрагмент матрицы [M] с результатом определения места КЗ по параметрам первого эксперимента

В верхней строке матрицы [M] (рисунок 12) приведены координаты отрезков пути с шагом 0,1 км, на которые разделена тяговая сеть. В крайнем левом столбце матрицы размещены наименования рассчитанных параметров петли короткого замыкания  $R$ ,  $X$ ,  $Z$ ,  $\varphi$ . Каждому такому параметру соответствуют численные значения в горизонтальной строке. Во втором столбце матрицы размещен вектор-столбец  $[R_{д}]$ , содержащий возможные параметры дуги с шагом 0,1 Ом. В крайнем правом столбце размещены численные значения измеренных параметров петли короткого замыкания, представляющие вектор-столбец,

$R_{и}$	14,70
$X_{и}$	12,18
$Z_{и}$	19,09
$\varphi_{и}$	39,64

которые повторены в соответствии с количеством заданных численных значений параметров дуги. Затенённые элементы строк соответствуют совпадению измеренных и рассчитанных параметров петли КЗ. В нижней строке матрицы показаны суммарные количества совпадений по каждому столбцу. Наибольшее количество совпадений (3) приходится на столбец с местом КЗ на 997,6 км. В этом столбце при сопротивлении дуги 2.9 Ом сошлись в одном месте, обведенном рамкой

на рисунке 4.14, значения всех параметров петли КЗ. В действительности КЗ проводилось на 998 км, т.е. расчётное место КЗ отличается от реального на 400 м.

По результатам второго эксперимента на 1001,3 км на опоре № 352 место короткого замыкания определено с погрешностью 200-300 м. По результатам третьего эксперимента на 1001,5 км на опоре № 360 место короткого замыкания определено с погрешностью 300 м.

В диссертации приведены дополнительные материалы, которые показывают, что не учёт особенностей системы внешнего электроснабжения создаёт дополнительную погрешность до 100 м при определении места КЗ.

Результаты экспериментов подтверждают, что детализированное компьютерное моделирование, учитывающее неоднородности тяговой сети в сочетании с методикой учёта сопротивления дуги, применяемой в методе «С», позволяет повысить точность определения места КЗ по сравнению с известными методами.

### **Основные результаты и выводы**

1. Произведён анализ существующих методов определения места короткого замыкания в тяговой сети переменного тока. Отмечено, что по этой тематике разработано большое количество методов, теоретических и практических исследований, издано много научных публикаций. Это свидетельствует о сложности, практической значимости и актуальности проблемы определения удалённости короткого замыкания. Однако при разработке существующих методов использовались сложные аналитические выражения и измерения. Целью упрощения применялось эквивалентирование элементов тяговой сети и недостаточный учёт неоднородностей её структуры, что влияет на точность определения места короткого замыкания.

2. Исследованы и обозначены существующие неоднородности структуры тяговой сети, которые потенциально могут влиять на погрешности при определении места повреждения.

3. Выполнен анализ влияния параметров тяговой сети и дуги на параметры петли короткого замыкания. Установлено, что только совокупность измеренных и производных параметров петли короткого замыкания может быть использована при определении места короткого замыкания.

4. Создана детализированная компьютерная модель тяговой сети, в которой платформой моделирования избран Matlab, а математическим аппаратом – матричный анализ. В модели к минимуму сведено эквивалентирование элементов тяговой сети и учитывается большинство неоднородностей структуры тяговой сети.

5. Разработан метод определения места короткого замыкания, получивший название метод «С», содержащий способ и алгоритм его использования, который позволяет с повышенной точностью определять удаленность места устойчивого короткого замыкания. Дано математическое обоснование метода. На способ определения места короткого замыкания получен патент.

6. Детализированная модель является основой метода «С». Модель позволяет рассчитывать схемы тяговой сети любой сложности, используя единый алгоритм расчёта.

7. Выполнен анализ влияния неоднородностей структуры тяговой сети, дуги, схем питания и степени их детализации на погрешности при определении

места короткого замыкания.

8. Проведена экспериментальная проверка предлагаемого метода на действующем двухпутном участке СКЖД Старая Станица – Погорелово, оборудованном системами регистрации и сбора данных. Результаты эксперимента показали, что метод «С» позволяет с погрешностью 300 – 400 м, определять место короткого замыкания.

#### **Рекомендации и перспективы разработки темы**

1. Детализированная компьютерная модель тяговой сети требует подготовки и переработки больших объёмов исходной цифровой информации. Внедрение на железнодорожном транспорте цифровых и компьютерных технологий способствует успешному решению этой задачи.

2. Предлагается создание комплекса, объединяющего предложенный метод «С» с техническими средствами устройств цифровой защиты и автоматики фидера контактной сети ИнТер-27,5-ФКС с целью их совместной практической реализации.

#### **Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:**

##### *Публикации в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК*

1. Быкадоров, А.Л. Анализ взаимного влияния параметров тяговой сети переменного тока на полное сопротивление петли короткого замыкания / А.Л. Быкадоров, Т.А. Заруцкая, А.С. Муратова-Милехина // Вестник транспорта Поволжья. 2013. № 5(41). – С. 7-15.

2. Быкадоров, А.Л. Повышение эффективности определения места короткого замыкания в тяговых сетях переменного тока на основе информационных технологий / А.Л. Быкадоров, Т.А. Заруцкая, А.С. Муратова-Милехина // Вестник транспорта Поволжья. 2015. № 6(54). – С. 15-19.

3. Быкадоров, А.Л. Детализация структуры тяговых сетей переменного тока в задачах моделирования и расчёта параметров петли короткого замыкания / А.Л. Быкадоров, Т.А. Заруцкая, А.С. Муратова-Милехина, И.В.Гаврилов// Электроника и электрооборудование транспорта. 2015. №4. – С. 7-12.

4. Быкадоров, А. Л. Применение теории распознавания образов при определении места короткого замыкания в тяговых сетях переменного тока / А.Л. Быкадоров, Т.А. Заруцкая, А.С. Муратова-Милехина // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2021. № 2. – С. 119-128.

##### *Публикации в других изданиях*

5. Быкадоров, А.Л. Расчёт сопротивления тяговой сети сложной конфигурации / А.Л. Быкадоров, Т.А. Заруцкая, А.С. Мороз<sup>1</sup> // Труды Всерос. научно-практ. конф. «Транспорт-2009». - Ростов н/Д: РГУПС, 2009. Т. 3. С. 303.

6. Быкадоров, А.Л. Повышение надёжности систем с экранирующим и усиливающим проводами в тяговых сетях переменного тока / А.Л. Быкадоров, Т.А. Заруцкая, А.С. Мороз, А.А. Триллер // VLI. Mezinarodni seminar Katedry elektrotechniky VSB-TU Ostrava, červen 2012 -68g.-ISBN 978-80-248-2699-8.

7. Быкадоров, А.Л. Технология проведение опыта короткого замыкания на участке контактной сети переменного тока / А.Л. Быкадоров, А.С. Мороз,

---

<sup>1</sup> Девичья фамилия соискателя

Е.А. Николаев, А.А. Триллер, Т.А. Заруцкая // Труды Всерос. научно-практ. конф. «Транспорт-2012». - Ростов н/Д, РГУПС, 2012. Т.1. С. 296-297.

8. Быкадоров, А.Л. Метод определения места короткого замыкания в тяговых сетях переменного тока на основе информационных технологий / А.Л. Быкадоров, А.С. Муратова-Милехина // Труды Междунар. научно-практ. конф. «Транспорт-2013». - Ростов н/Д: РГУПС, 2013. Т.3. С. 138-140.

9. Быкадоров, А.Л. Моделирование параметров аварийного режима в тяговой сети переменного тока / А.Л. Быкадоров, Т.А. Заруцкая, А.С. Муратова-Милехина // Материалы VII Междунар. научно-практ. конф. «Электрификация транспорта «ТРАНСЭЛЕКТРО - 2014» - Днепропетровск: ДНУЖ, 2014. С. 15-16.

10. Быкадоров, А.Л. Определение параметров петли и места короткого замыкания в тяговой сети с экранирующим и усиливающим проводами / А.Л. Быкадоров, Т.А. Заруцкая, А.С. Муратова-Милехина // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. 2015. №2(31). С. 10-14.

11. Быкадоров, А.Л. Анализ влияния степени эквивалентирования параметров тяговой сети на параметры петли короткого замыкания / А.Л. Быкадоров, Т.А. Заруцкая, А.С. Муратова-Милехина // Труды Междунар. научно-практ. конф. «Перспективы развития и эффективность функционирования транспортного комплекса Юга России». - Ростов н/Д: ФГБОУ ВО РГУПС. 2015. Т.2. С. 148-149.

12. Быкадоров, А.Л. Исследование особенностей параметров петли короткого замыкания в тяговой сети с экранирующим и усиливающим провод / А.Л. Быкадоров, Т.А. Заруцкая, А.С. Муратова-Милехина // Труды Междунар. научно-практ. конф. «Транспорт-2015». - Ростов н/Д: ФГБОУ ВО РГУПС. 2015. Т.3. С. 87-89.

13. Муратова-Милехина, А.С. Повышение точности определения места короткого замыкания в системе тягового электроснабжения 25 кВ за счет учета неоднородности тяговой сети // Сборник научных трудов «Транспорт: наука, образование, производство. (Транспорт-2016)». Ростов н/Д: ФГБОУ ВО РГУПС: 2016. Т.2. С. 293.

14. Быкадоров, А.Л. Сравнительный анализ экспериментального и расчетного многопараметрического метода определения места короткого замыкания / А.Л. Быкадоров, Т.А. Заруцкая, А.С. Муратова-Милехина // Сборник научных трудов «Транспорт: наука, образование, производство. («Транспорт-2018)». - Ростов н/Д: ФГБОУ ВО РГУПС. 2018. Т.1. С. 250-253.

#### *Патенты и авторские свидетельства*

15. Способ определения места короткого замыкания контактной сети электрифицированного транспорта [текст]: пат. 2566458 РФ, МПК G01rB 60m /А.С. Муратова-Милехина, А.Л. Быкадоров, Т.А. Заруцкая (RU) №2014106435/11; Заявл. 20.02.2014; Оpubл. 27.10.2015, Бюл. №30.

**Личный вклад соискателя.** Основные положения и результаты исследований самостоятельно получены автором. Статья [14] подготовлена единолично. Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве: [1-13] – анализ, разработка метода, создание моделей, проведение расчетов.

Муратова-Милехина Анна Сергеевна

**РАЗРАБОТКА ИННОВАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ  
ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ  
ТЯГОВОЙ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано к печати 13.10.2021  
Формат 60×84/16. Бумага офсетная.  
Ризография. Усл.-печ. л.1.0  
Тираж 100 экз. Заказ №

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