

На правах рукописи



ВОСТРИКОВ Максим Викторович

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ПОДСИСТЕМА
МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ
ФИДЕРОВ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

Специальность 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами
и производствами (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иркутск – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения (ФГБОУ ВО ИрГУПС)

Научный руководитель: **СИЗЫХ Виктор Николаевич**,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Автоматизация
производственных процессов» ФГБОУ ВО
ИрГУПС

Официальные оппоненты: **Суворов Иван Флегонтович**,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Энергетика»
Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего
образования «Забайкальский
государственный университет». (ФГБОУ ВО
«ЗабГУ»), г. Чита.

Арсентьев Михаил Олегович,
кандидат технических наук, доцент кафедры
«Электропривод и электрический транспорт»
Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего
образования «Иркутский национальный
исследовательский технический
университет» (ФГБОУ ВО «ИрНТУ»),
г. Иркутск

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Самарский государственный
университет путей сообщения», г. Самара

Защита состоится «28» сентября 2023 г. в 10-00 на заседании
диссертационного совета 44.2.002.01. на базе ФГБОУ ВО «Иркутский
государственный университет путей сообщения» по адресу: 664074, Иркутская
область, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, ауд. А-803. Тел. 8-(3952)-63-83-94, факс
8-(3952)-38-76-72; e-mail: diss_sovet@irgups.ru

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке и на сайте
ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения»,
<http://www.irgups.ru>

Автореферат разослан « » _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета д.т.н., доцент



Л.В. Аршинский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Энергетическая стратегия ОАО «РЖД» на период до 2015 года и на перспективу до 2030 года нацелена на улучшение показателей энергоэффективности перевозочного процесса – основного вида деятельности холдинга ОАО «РЖД» и, в качестве приоритетных задач, предполагает полное и надежное энергетическое обеспечение перевозочного процесса, снижение рисков при кризисных ситуациях в энергообеспечении железнодорожного транспорта и оснащение эффективными техническими средствами и автоматизированными технологическими системами. Одной из таких важнейших систем является микропроцессорная релейная защита (МРЗ) фидеров контактной сети (ФКС), которая может рассматриваться как автоматизированная подсистема (АП) нижнего уровня в структуре автоматизированной системы управления (АСУ) тяговой подстанции (ТП).

МРЗ обеспечивают высокую степень защиты объектов системы тягового электроснабжения (СТЭ) за счет автоматизации контроля электрических параметров и исполнения релейным персоналом предписанных действий по настройкам значений уставок. Ввиду важности указанных устройств в составе системы автоматизированного управления ТП необходимо отметить, что аварийные отключения, в том числе и по неустановленным причинам, приводят к нарушениям графика движения поездов (ГДП) и снижению пропускной способности перегонов и станций.

Статистический анализ аварийных отключений МРЗ за период с 2018 по 2021 на ряде дистанций электроснабжения ЗабЖД показывает, что на отключения по неустановленным причинам приходится до 26 - 27 % от их общего числа. Данные отключения связаны с резкими динамическими изменениями тока и напряжения, протекающими в контактной сети, вызываемые с троганием тяжеловесных и сдвоенных поездов с места; поднятием токоприемника после прохождения нейтральной вставки; группировкой / перегруппировкой тяговых двигателей электровозов и т.д.

Решению проблемы снижения числа отключений МРЗ по неустановленным причинам может послужить создание автоматизированной подсистемы микропроцессорной релейной защиты (АП МРЗ) в составе нижнего и среднего уровней автоматизированной системы управления тяговой подстанции (АСУ ТП) переменного тока на основе алгоритмов визуализации и краткосрочного прогнозирования электрических параметров СТЭ с привязкой к текущей поездной ситуации.

Исследованием вопросов и принципов построения микропроцессорных релейных защит объектов тягового электроснабжения железных дорог занимались: Б. Е. Дынькин, Е. П. Фигурнов, В.Н. Пупынин, Ю.И. Жарков, П. С. Пинчуков, В. А. Ефремов, Ю. Я. Лямец, М. В. Шевцов, Д. В. Зиновьев, В.А. Зимаков, Т.Е. Петрова и многие другие.

В настоящее время наиболее трудоемкими составляющими процесса выявления, анализа и селекции причин срабатывания МРЗ являются on-line фиксация и запись электрических параметров работы СТЭ с привязкой к текущей поездной ситуации, а также прогнозирование динамики их изменения, что объясняется увеличением масс поездов, пропуском сдвоенных составов, применением режима рекуперации и т.д. В связи с данными обстоятельствами возникает необходимость комплексной автоматизации нижнего и среднего уровней АСУ ТП переменного тока, для осуществления которой представляется перспективным использовать аппаратные

средства и алгоритмы, разработанные на основе применения методов статистической и цифровой обработки информации, математического и имитационного моделирования.

Значительный вклад в развитие и модернизацию автоматизированных систем управления устройствами электроснабжения железных дорог внесли: Ю.И. Жарков, В.Г. Лысенко, А.В. Крюков, Е.А. Стороженко, А.А. Федотов, В.С. Почаевец, В.А. Зимаков, А.Е. Филин, В.А. Хотовник, В.П. Закарюкин, А.С. Серебряков, Л.А. Герман, К.С. Субханвердиев, В.Л. Герман и многие другие.

Таким образом, разработка и исследование АП МРЗ ФКС переменного тока в составе нижнего и среднего уровней АСУ ТП на основе применения методов статистической и цифровой обработки информации, математического и имитационного моделирования, является актуальной научно-технической задачей.

Целью работы является повышение эффективности работы микропроцессорной релейной защиты фидеров контактной сети, за счет использования автоматизированной подсистемы непрерывного мониторинга, анализа и краткосрочного прогнозирования контролируемых МРЗ ФКС электрических параметров в составе нижнего и среднего уровня АСУ ТП переменного тока.

Для достижения поставленной цели необходимо решить **следующие задачи**:

1. Проанализировать современное состояние МРЗ ФКС переменного тока.
2. На основании выполненного анализа разработать:
 - а) методику непрерывного мониторинга, сбора, обработки и хранения контролируемых МРЗ электрических параметров с их одномоментной привязкой к графику исполненного движения поездов;
 - б) методику и устройство фильтрации и выделения первой гармоники тока и напряжения на основе фазовой автоподстройки частоты;
 - в) способ и устройство для краткосрочного прогнозирования изменения контролируемых МРЗ электрических параметров.
3. На основании п. 2 предложить структуру АП МРЗ в составе нижнего и среднего уровней АСУ ТП переменного тока.
4. Провести апробацию предложенной АП МРЗ в составе нижнего и среднего уровней АСУ ТП переменного тока.

Объектом исследования является АП МРЗ ФКС железных дорог переменного тока, рассматриваемая как система автоматизированного управления объектами СТЭ.

Предметом исследования являются алгоритмы непрерывного сбора, обработки и хранения контролируемых электрических параметров и краткосрочного прогнозирования их изменения в АП МРЗ в составе нижнего и среднего уровней АСУ ТП переменного тока.

Научная новизна работы состоит в том, что:

1. Разработана методика непрерывного мониторинга со сжатием сплайн-интерполяцией контролируемых МРЗ электрических параметров с их одномоментной привязкой к графику исполненного движения поездов.
2. Разработана методика фильтрации и выделения первой гармоники тока и напряжения на основе фазовой автоподстройки частоты.
3. Разработана имитационная модель процесса краткосрочного прогнозирования изменения контролируемых МРЗ электрических параметров, отличающаяся от известных тем, что принятие решения на отключение защищаемого объекта

осуществляется за период, меньший периода времени штатного срабатывания устройств МРЗ.

Практическая значимость работы заключается в том, что:

1. Разработана автоматизированная система непрерывного мониторинга со сжатием сплайн-интерполяцией контролируемых МРЗ электрических параметров с их одномоментной привязкой к графику исполненного движения поездов.

2. Разработано устройство фильтрации и выделения первой гармоники тока и напряжения на основе фазовой автоподстройки частоты для возможности более точного измерения характеристик контролируемых МРЗ электрических параметров, что подтверждено Актом об использовании результатов научной работы в Забайкальской дирекции по энергообеспечению – СП «Трансэнерго» - филиале ОАО «РЖД».

3. Разработан алгоритм и устройство краткосрочного прогнозирования изменения контролируемых МРЗ электрических параметров, разграничивающий аварийные режимы работы СТЭ и кратковременные режимы, связанные с действием переходных и пусковых токов, протекающих в контактной сети.

4. Разработана АП МРЗ в составе нижнего и среднего уровней АСУ ТП переменного тока, позволяющая существенно снизить число срабатываний МРЗ по ранее не установленным причинам, что подтверждено Актом об использовании результатов научной работы в Забайкальской дирекции по капитальному ремонту и реконструкции объектов электрификации и электроснабжения – СП «Центральной дирекции по капитальному ремонту и реконструкции объектов электрификации и электроснабжения» - филиале ОАО «РЖД».

Тематика работы соответствует пунктам паспорта специальности **2.3.3**: п. 10 «Формализованные методы анализа, синтеза, исследования и оптимизация модульных структур систем сбора, хранения, обработки и передачи данных в АСУТП, АСУП, АСТПП и др.»; п. 14 «Теоретические основы и прикладные методы резервирования контуров управления, повышения эффективности, надежности и живучести АСУ на этапах их разработки, внедрения и эксплуатации»; п. 15 «Теоретические основы, методы и алгоритмы диагностирования (определения работоспособности, поиск неисправностей и прогнозирования) АСУТП, АСУП, АСТПП и др.».

Методы исследований. Выводы и результаты работы получены с использованием математического аппарата статистической и цифровой обработки информации, теории электрических цепей, теории надежности, методов математического и имитационного моделирования на ПЭВМ в математическом пакете Mathcad 15.

Степень достоверности результатов работы подтверждается результатами апробации аппаратных средств АП МРЗ ФКС и вычислительных экспериментов.

На защиту выносятся следующие положения и результаты:

1. Методика непрерывного мониторинга со сжатием контролируемых МРЗ электрических параметров, отличающаяся большей информативностью и эффективностью при анализе и выявлении причин аварийных отключений.

2. Методика фильтрации и выделения первой гармоники тока и напряжения, характеризуемая минимальными погрешностями определения величин контролируемых МРЗ электрических параметров за счет прямого метода их измерений.

3. Имитационная модель процесса краткосрочного прогнозирования изменения

контролируемых МРЗ электрических параметров, обеспечивающая четкое разграничение между аварийными режимами работы СТЭ и режимами, связанными с действием пусковых и переходных токов.

Реализация результатов работы подтверждена Актом об использовании результатов научной работы в Забайкальской дирекции по энергообеспечению – СП «Трансэнерго» - филиала ОАО «РЖД», Актом об использовании результатов научной работы в Забайкальской дирекции по капитальному ремонту и реконструкции объектов электрификации и электроснабжения – СП «Центральной дирекции по капитальному ремонту и реконструкции объектов электрификации и электроснабжения» - филиале ОАО «РЖД» и Актом об использовании результатов диссертационного исследования в учебном процессе ЗаБИЖТ – филиала ФГБОУ ВО ИрГУПС.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на: Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Транспортная инфраструктура сибирского региона» (Иркутск, 2017 г., 2018 г., 2019 г., 2021 г.); Всероссийской научно-практической конференции «115 лет железнодорожному образованию в Забайкалье: образование - наука – производство» (Чита, 2017 г.); XII Международной научно-практической конференции «Наука и образование транспорту» (Самара, 2019 г.); Всероссийской научно-практической конференции «Образование – наука – производство» (Чита, 2019 г., 2020 г., 2021 г., 2022 г.); Всероссийской научно-практической конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь» (Иркутск 2021, 2022 г.); Международной студенческой научно-практической конференции «Техника и технологии наземного транспорта» (Нижний Новгород, 2021 г., 2022 г.); Всероссийском конкурсе научно-исследовательских работ по энергосбережению и повышению энергоэффективности «Энергия России» (Вологда, 2022 г.).

Личный вклад. Результаты исследований, составляющие научную новизну и выносимые на защиту, получены лично автором. В совместных публикациях результатов исследований автору принадлежат: анализ современного состояния МРЗ фидеров контактной сети (ФКС) переменного тока, включая статистику аварийных отключений; алгоритм непрерывного мониторинга со сжатием сплайн-интерполяцией контролируемых МРЗ электрических параметров; апробация устройства фильтрации и выделения первой гармоники тока и напряжения на основе фазовой автоподстройки частоты; проведение вычислительного эксперимента, подтверждающего эффективность предложенной методики краткосрочного прогнозирования изменения контролируемых АП МРЗ электрических параметров на основе имитационной модели устройства; разработка структуры АП МРЗ в составе нижнего и среднего уровней АСУ ТП переменного тока.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 20 работ, из них 3 статьи – в изданиях, рекомендованных Высшей Аттестационной Комиссией Российской Федерации (ВАК РФ) для опубликования научных результатов диссертаций; 1 статья – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ по смежным специальностям; 2 статьи, индексированных в базе Scopus; 2 патента на изобретение. В работах с соавторами соискателю в среднем принадлежит от 55 до 90 % результатов.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, библиографического списка (126 наименований). Работа изложена на 144 страницах печатного текста и включает 1 таблицу, 67 рисунков и 5 приложений.

Благодарности. Автор выражает особую благодарность кандидату технических наук, доценту кафедры «Электроснабжение» Забайкальского института железнодорожного транспорта Менакеру Константину Владимировичу за оказание научных консультаций и неоценимую помощь на всех этапах диссертационного исследования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель и поставлены задачи исследования, определены объект и предмет исследования, сформулированы научные положения, выносимые на защиту, отражены новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе проведен анализ существующих систем МРЗ ФКС переменного тока, требования, предъявляемые к ним в зависимости от условий эксплуатации. В настоящее время МРЗ ФКС представлена как автоматизированная подсистема нижнего уровня АСУ ТП переменного тока.

На примере статистики зарегистрированных аварийных отключений МРЗ за период 2018-2021 гг. по нескольким дистанциям электроснабжения Забайкальской дирекции по энергообеспечению показано, что наибольшее количество срабатываний приходится на технические неисправности элементов системы тягового электроснабжения (электровозов, контактной сети, тяговых подстанций) и нарушения, связанные с организацией движения поездов (несоблюдение интервалов попутного следования, нарушение чередования и числа поездов в пакете, нарушение скоростного режима ведения и т.д.). Данные отключения негативно сказываются на соблюдении технологического процесса – графика движения поездов и приводят к нарушениям режима электроснабжения объектов СТЭ.

Установлено, что предпосылками части аварийных отключений МРЗ по неустановленным причинам являются пусковые и переходные токи, протекающие в контактной сети. Показано, что уменьшение числа такого рода отключений по-прежнему остается актуальной задачей, направленной на сохранение и повышение пропускной способности станций и перегонов и сохранение нормальных режимов работы объектов СТЭ.

Показано, что для дальнейшей модернизации и автоматизации МРЗ необходима разработка новых алгоритмов и технических решений, направленных на повышение селективности ее работы в части пусковых и переходных токов.

Во второй главе разработаны методики и имитационная модель, направленные на повышение селективности МРЗ ФКС в составе нижнего и среднего уровней АСУ ТП.

С целью непрерывного сбора, обработки и хранения контролируемых АП МРЗ электрических параметров в виде непрерывных функций во времени для анализа режимов работы СТЭ, связанных с пусковыми и переходными токами, предложена

методика непрерывного мониторинга со сжатием сплайн-интерполяцией контролируемых МРЗ электрических параметров с хранением на ПЭВМ.

Результат работы алгоритма непрерывного мониторинга со сжатием сплайн-интерполяцией контролируемых МРЗ электрических параметров представлен на рисунке 1.

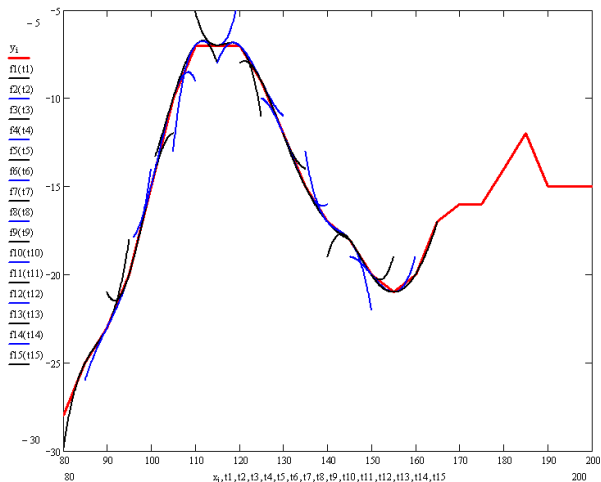


Рисунок 1 – Процесс представления фрагмента контролируемой МРЗ функции тока сплайнами Акима (--- исходная, контролируемая МРЗ функция тока, --- и --- полиномы третьей степени, определенные на частных отрезках)

Процесс непрерывного мониторинга со сжатием сплайн-интерполяцией контролируемых МРЗ электрических параметров представлен в виде алгоритма (рисунок 2).

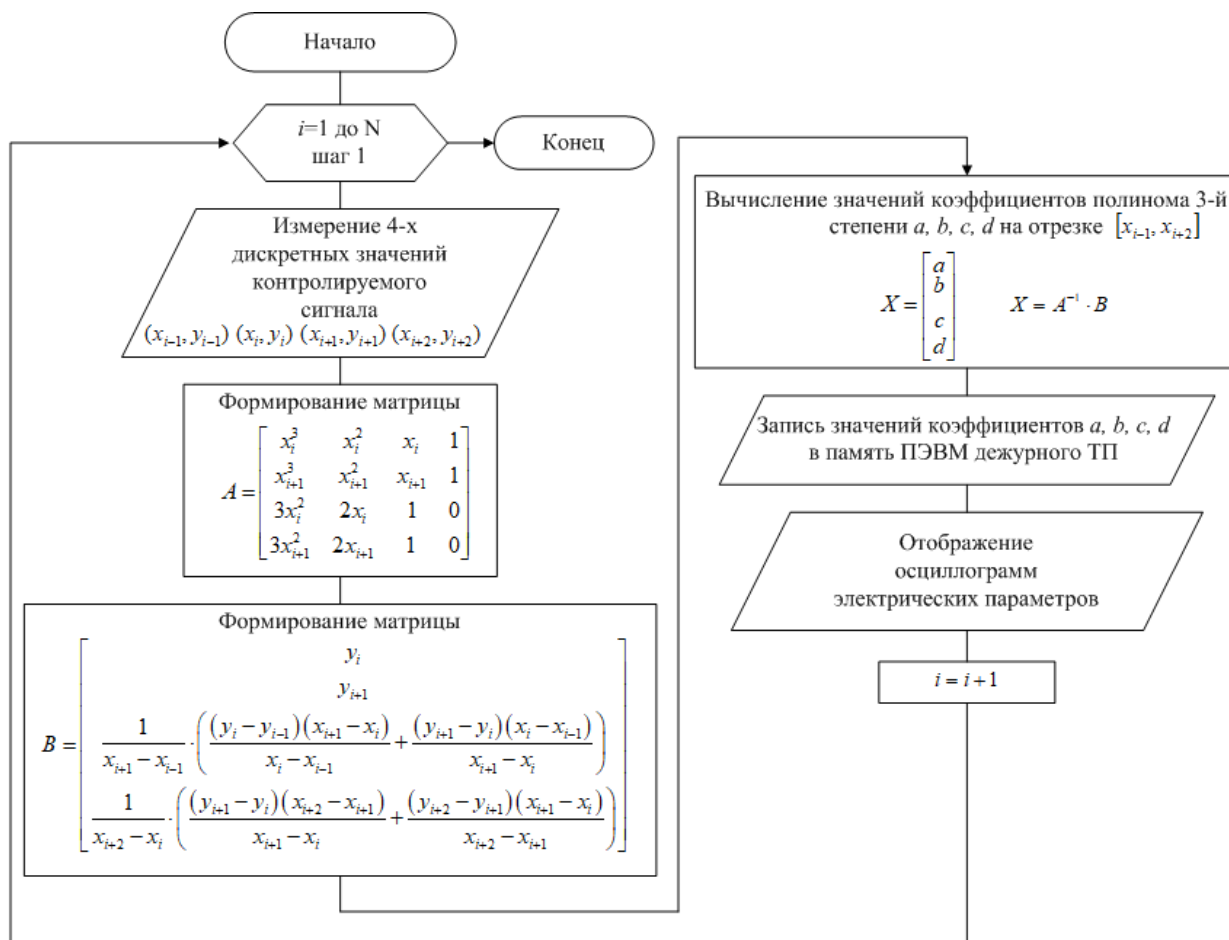


Рисунок 2 – Алгоритм непрерывного мониторинга со сжатием сплайн-интерполяцией контролируемых МРЗ электрических параметров



Рисунок 3 – Алгоритмы работы устройства фильтрации и выделения первой гармоники тока на основе фазовой автоподстройки частоты

С целью дальнейшего повышения селективности МРЗ ФКС была предложена имитационная модель процесса краткосрочного прогнозирования изменения контролируемых МРЗ электрических параметров. В основу имитационной модели положен принцип фиксации моментов времени прохождения контролируемых МРЗ сигналов через нулевые отметки и формирование гармонических колебаний по частоте и фазе совпадающих с их основными гармониками. Контролируемый сигнал подвергается предварительной фильтрации посредством фильтра нижних частот, настроенного на частоту среза третьей гармоники 150 Гц для исключения влияния последующих высших гармоник.

Отфильтрованный сигнал подается на вход ФАПЧ с целью фиксации моментов времени его прохождения через нулевые отметки и дальнейшего восстановления первой гармоники путем коммутации транзисторными ключами колебательного контура.

К примеру, процесс фильтрации и выделения первой гармоники тока представлен в виде алгоритма (рисунок 3).

Проведенный анализ электрических и временных параметров защищаемых объектов СТЭ показал, что запас времени на анализ текущей ситуации и выработку команды на отключение устройством релейной защиты составляет 0,04 с. (2 периода тока промышленной частоты) для значения тока в контактной сети 3000 А.

Работа имитационной модели процесса краткосрочного прогнозирования изменения контролируемых МРЗ электрических

параметров основывается на экстраполяции контролируемых сигналов тока и напряжения синусоидальными функциями $i(t) = I_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_i)$, $u(t) = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_u)$ по крайним измеренным дискретным значениям:

- уравнения циклической частоты и начальной фазы прогнозной функции тока и напряжения

$$\omega_I = \frac{\pi}{t_{0(k)} - t_{0(k-1)}} \quad \omega_U = \frac{\pi}{t_{i0(k)} - t_{i0(k-1)}} \quad (1)$$

$$\varphi_I = 360^0 \cdot \frac{t_{0(k-1)}}{2 \cdot (t_{0(k)} - t_{0(k-1)})} \quad \varphi_U = 360^0 \cdot \frac{t_{i0(k-1)}}{2 \cdot (t_{i0(k)} - t_{i0(k-1)})} \quad (2)$$

- уравнения амплитуд прогнозных функций тока и напряжения по значениям первых производных контролируемых сигналов, найденных в окрестностях их нулевых отметок и по трем экспериментальным точкам, найденных в окрестностях их локальных максимумов в зависимости от текущей фазы контролируемых сигналов

$$I_m = \frac{\frac{I_i - I_{0(k)}}{i \cdot 0,00001 - t_{0(k)}}}{\omega_I \cdot \cos\left(\omega_I \cdot \frac{i \cdot 0,00001 - t_{0(k)}}{2} + \varphi_I\right)} \quad U_m = \frac{\frac{U_i - U_{0(k)}}{i \cdot 0,00001 - t_{0(k)}}}{\omega_U \cdot \cos\left(\omega_U \cdot \frac{i \cdot 0,00001 - t_{0(k)}}{2} + \varphi_U\right)} \quad (3)$$

$$I_m = \sqrt{\frac{I_i^2 \cdot (I_{i+1} - I_{i-1})^2}{4 \cdot I_i^2 - (I_{i+1} + I_{i-1})^2} + I_i^2} \quad U_m = \sqrt{\frac{U_i^2 \cdot (U_{i+1} - U_{i-1})^2}{4 \cdot U_i^2 - (U_{i+1} + U_{i-1})^2} + U_i^2} \quad (4)$$

Предложенная имитационная модель реализована в среде Mathcad в виде блочной схемы (рисунок 4).

Алгоритм краткосрочного прогнозирования изменения контролируемых МРЗ электрических параметров (на примере тока) на основе полученной имитационной модели представлен на рисунке 5. Алгоритмы краткосрочного прогнозирования контролируемых МРЗ сигналов тока и напряжения аналогичны и представлены в диссертационном исследовании.

Результат работы предложенного алгоритма для сигнала тока, представленный на рисунке 6, подтверждает повышение эффективности работы МРЗ ФКС в части снижения числа аварийных отключений, связанных с пусковыми и переходными токами, протекающими в контактной сети.

Вычислительный эксперимент, проведенный на основе анализа выборки, состоящей из ста аварийных осциллограмм отключений МРЗ по неустановленным причинам (срабатывание ступеней НДЗ-1, НДЗ-2, НДЗ-3), показал потенциально высокую эффективность (68 %) предложенной методики краткосрочного прогнозирования изменения контролируемых МРЗ электрических параметров.

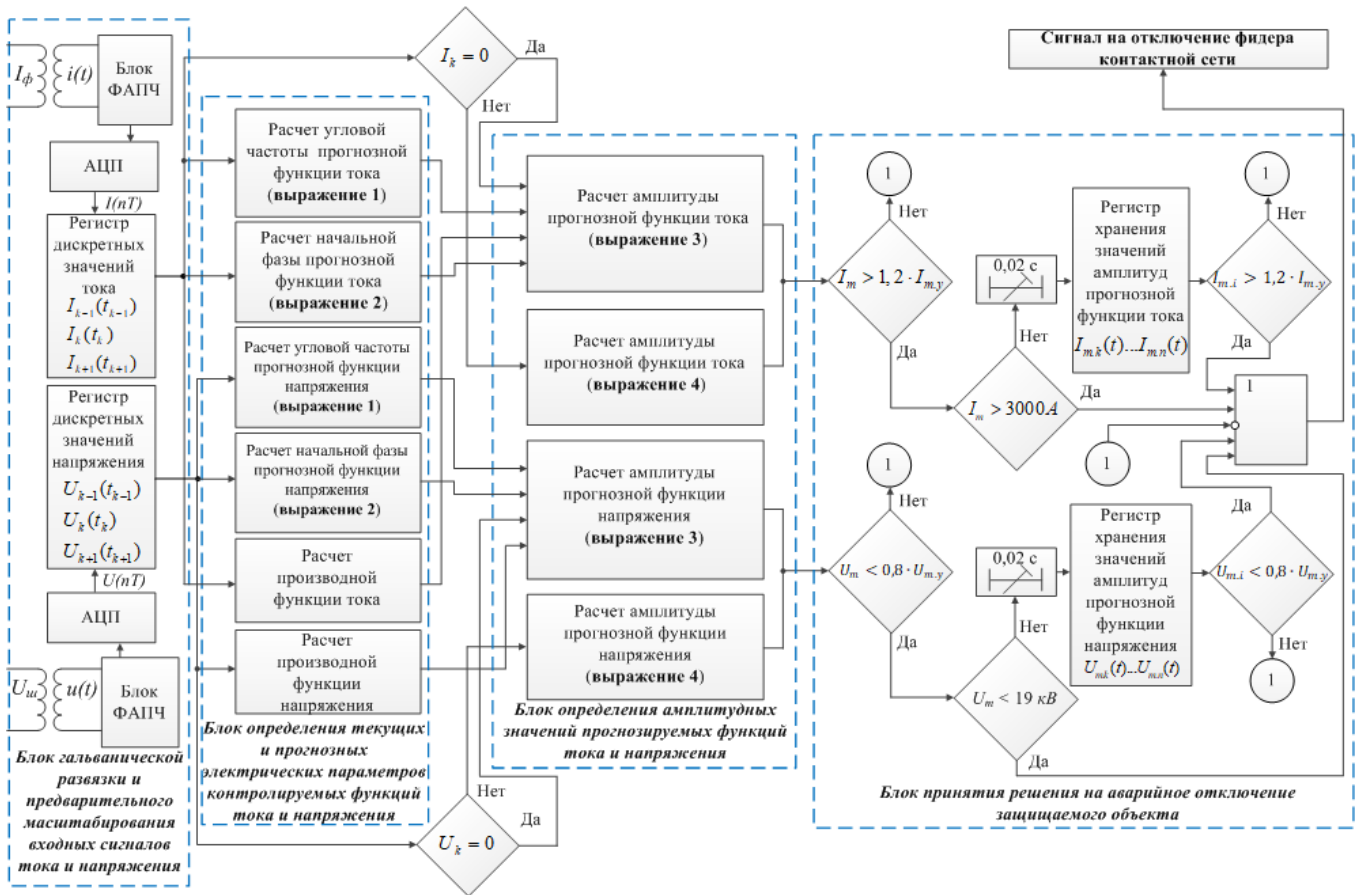


Рисунок 4 - Блочная схема имитационной модели процесса краткосрочного прогнозирования изменения контролируемых МРЗ электрических параметров

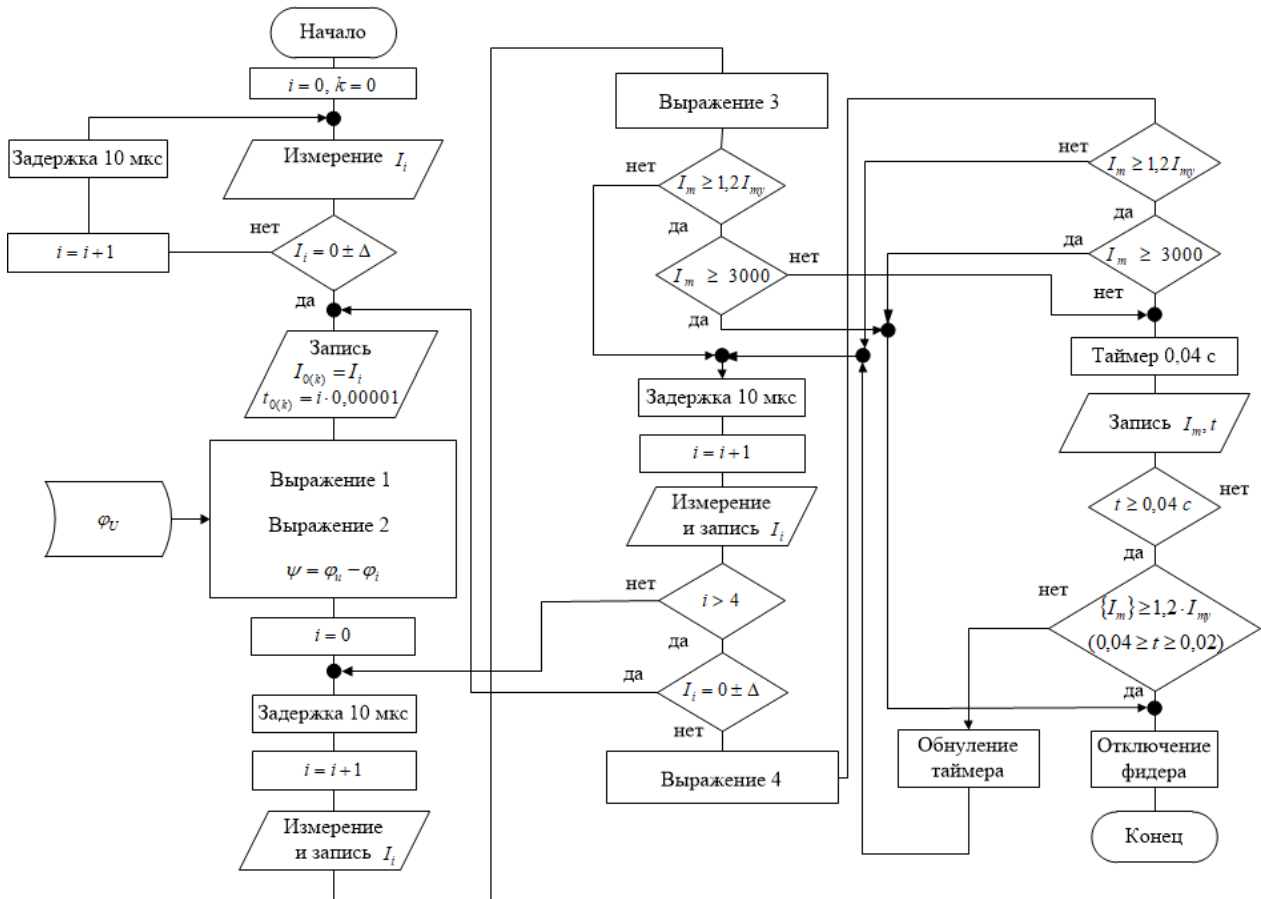


Рисунок 5 - Алгоритм краткосрочного прогнозирования контролируемого АП МРЗ сигнала тока

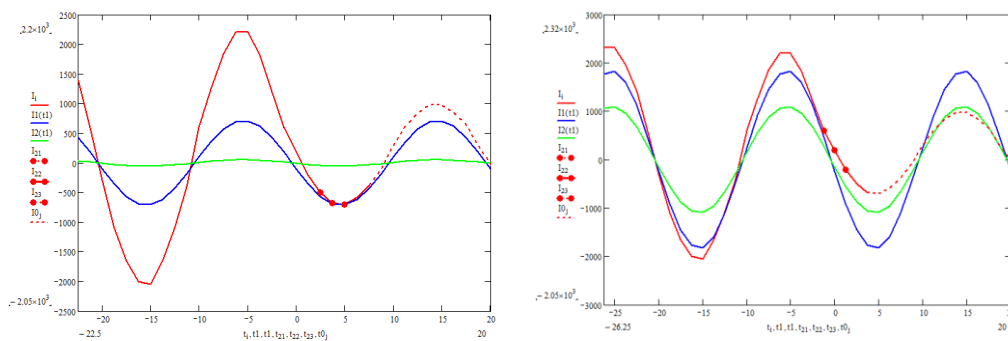


Рисунок 6 -
Результат работы
алгоритма
краткосрочного
прогнозирования
контролируемого
МРЗ сигнала тока

--- $I_1(t_1)$ – прогнозная функция с определением амплитуды по трем крайним экспериментальным точкам; --- $I_2(t_1)$ – прогнозная функция с определением амплитуды через производную, --- $I(t)$ - исходная, контролируемая МРЗ функция тока

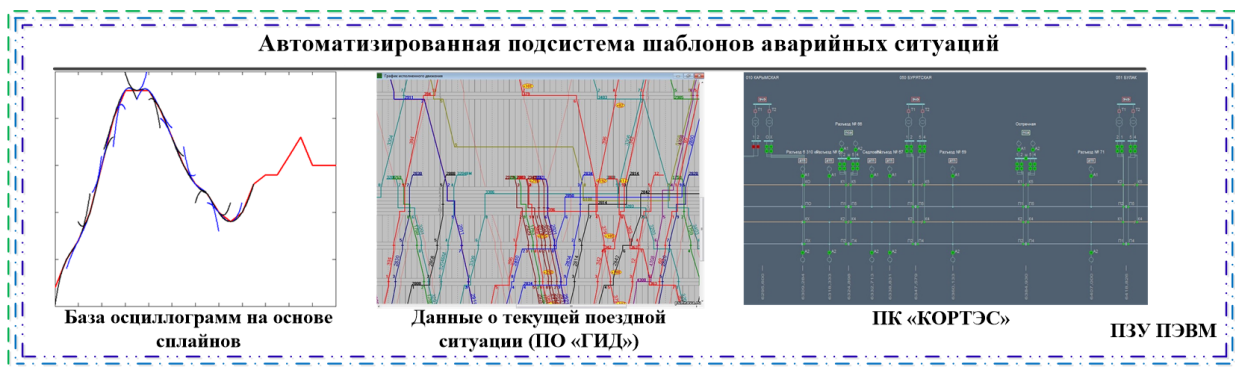
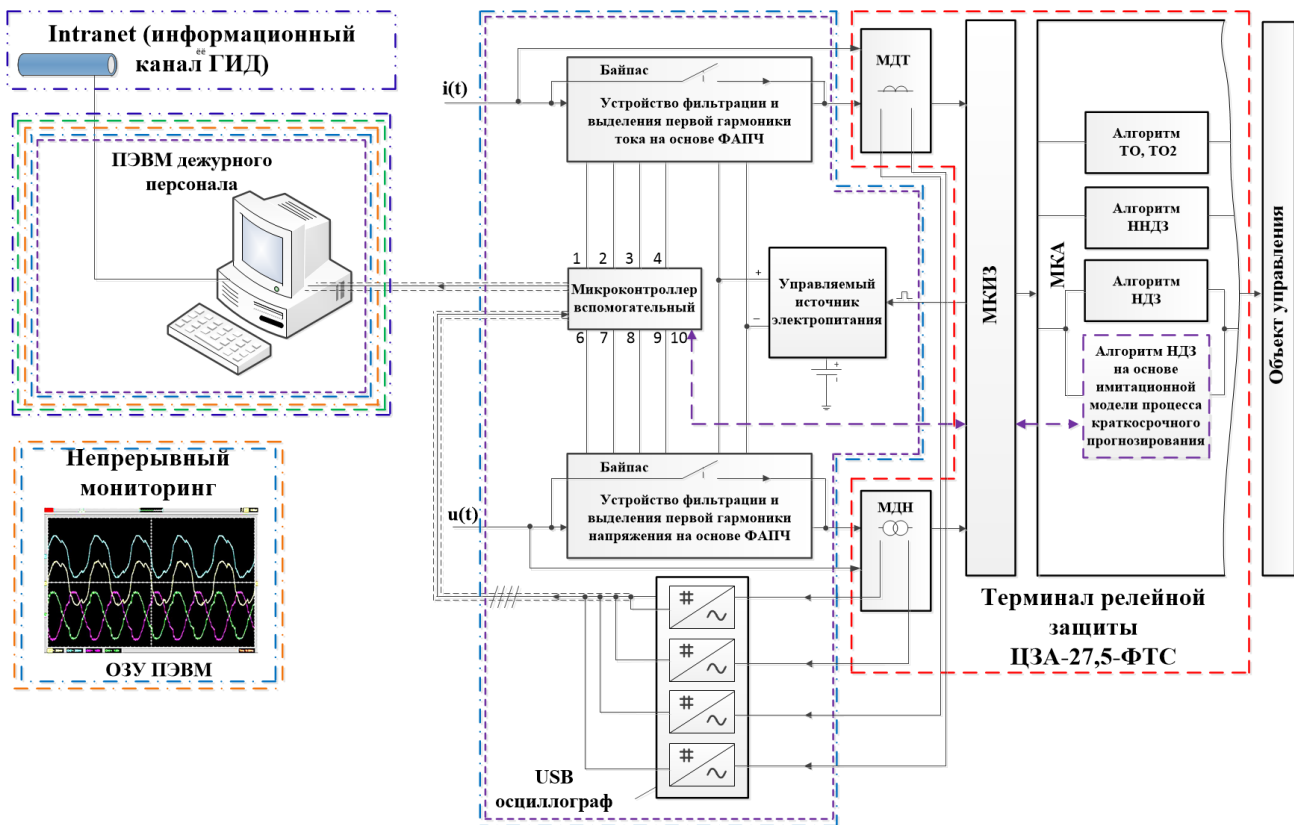
В третьей главе предложены технические решения для повышения селективности МРЗ ФКС переменного тока и разработана структурная схема АП МРЗ ФКС в составе нижнего и среднего уровней АСУ ТП переменного тока.

Проведенные исследования показали, что надежность разработанного устройства фильтрации и выделения первой гармоники тока и напряжения на основе фазовой автоподстройки частоты составила 0,930 по сравнению с аналогичными показателями действующих терминалов БМРЗ и ЦЗА - 0,906 и 0,923, что соответствует требованиям, предъявляемым к железнодорожным устройствам МРЗ.

Предложенная во второй главе методика непрерывного мониторинга со сжатием сплайн-интерполяцией контролируемых МРЗ электрических параметров при ее технической реализации, ввиду отсутствия доступа в схемные решения штатных терминалов МРЗ, привела к необходимости применения независимого измерительного оборудования и устройства обработки. Запись осциллограмм предложено осуществлять синхронно с параметрами текущей поездной ситуации (ПО «ГИД») в привязке к схеме питания и секционирования контактной сети и режимам работы объектов СТЭ. Для идентификации режимов работы СТЭ также предложено использовать ПК «КОРТЭС» (разработка ВНИИЖТ), применяемого на ОАО «РЖД» для расчета схожих процессов работы СТЭ участка. Таким образом технически реализована автоматизированная подсистема шаблонов аварийных ситуаций, которая будет пополняться и храниться на ПЭВМ дежурного персонала.

На основе обобщения результатов исследования в третьей главе предложена структурная схема АП МРЗ в составе нижнего и среднего уровней АСУ ТП переменного тока на основе предложенных методик и устройств (рисунок 7).

Предлагаемые аппаратные средства в рамках разработанной АП МРЗ ФКС переменного тока в виде устройства фильтрации и выделения первой гармоники тока и напряжения на основе фазовой автоподстройки частоты, устройства краткосрочного прогнозирования изменения контролируемых МРЗ электрических параметров, вспомогательного микроконтроллера, цифрового USB-осциллографа и цифрового канала ГИД обеспечат работоспособность предлагаемых программных средств и необходимое сопряжение штатных терминалов МРЗ и ПЭВМ дежурного персонала тяговой подстанции.



- терминал релейной защиты (МРЗ)
- алгоритм НДЗ на основе имитационной модели краткосрочного прогнозирования
- ПЭВМ дежурного персонала тяговой подстанции
- информационный канал «ГИД»
- алгоритм непрерывного мониторинга
- автоматизированная подсистема шаблонов аварийных ситуаций

Рисунок 7 - Структурная схема АП МРЗ ФКС в составе нижнего и среднего уровней АСУ ТП переменного тока

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

При выполнении диссертации получены следующие основные результаты:

1. Проанализировано современное состояние устройств МРЗ ФКС переменного тока, включая статистику их аварийных отключений на участке Карымская-Борзя Забайкальской железной дороги.

2. Предложена методика непрерывного мониторинга со сжатием сплайн-интерполяцией контролируемых МРЗ электрических параметров, отличающаяся большей информативностью и эффективностью при анализе и выявлении причин аварийных отключений.

3. Предложена методика фильтрации и выделения первой гармоники тока и

напряжения на основе фазовой автоподстройки частоты и устройство на ее основе, отличающееся минимальными погрешностями определения величин контролируемых МРЗ электрических параметров за счет прямого метода их измерений.

4. Предложен способ для краткосрочного прогнозирования изменения контролируемых МРЗ электрических параметров и устройство, обеспечивающее четкое разграничение между аварийными режимами работы СТЭ и режимами, связанными с действием пусковых и переходных токов.

5. Разработана автоматизированная подсистема шаблонов аварийных ситуаций на основе методики непрерывного мониторинга со сжатием сплайн-интерполяцией контролируемых МРЗ электрических параметров, отличающаяся большей информативностью и возможностью синхронной привязки сохраняемых параметров к ПО «ГИД-Урал» и ПО «КОРТЭС».

6. Разработана автоматизированная подсистема микропроцессорной релейной защиты фидеров контактной сети в составе нижнего и среднего уровней АСУ ТП переменного тока на основе методик и устройств, изложенных в п. 2 – 5.

7. Проведенная апробация автоматизированной подсистемы микропроцессорной релейной защиты фидеров контактной сети в составе нижнего и среднего уровней АСУ ТП переменного тока позволяет говорить о том, что цель диссертационной работы достигнута. Предложенные научно-технические решения, в совокупности, позволили повысить селективность действующих устройств МРЗ и на 18 % уменьшить общее число аварийных отключений по ранее неустановленным причинам.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Автоматизация устройств микропроцессорной релейной защиты на основе использования нейросетевых технологий / В. Н. Сизых, А. В. Данеев, **М. В. Востриков**, К. В. Менакер // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 11. – С. 324-337. – DOI 10.24412/2071-6168-2021-11-324-337.

2. Оценка надежности автоматизированного устройства фильтрации в модернизированной микропроцессорной релейной защите фидеров контактной сети / **М. В. Востриков**, А. В. Данеев, К. В. Менакер, В. Н. Сизых // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2021. – Т. 23. – № 6(104). – С. 126-139. – DOI 10.37313/1990-5378-2021-23-6-126-139.

3. Повышение селективности работы микропроцессорной релейной защиты фидеров контактной сети железных дорог переменного тока / **М. В. Востриков**, А. В. Данеев, К. В. Менакер, В. Н. Сизых // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 5. – С. 358-372. – DOI 10.24412/2071-6168-2022-5-358-372.

В изданиях, рекомендованных ВАК по смежным специальностям:

4. Менакер, К. В. Применение схем фазовой автоподстройки частоты в измерительных органах тока и напряжения микропроцессорных устройств релейной защиты / К. В. Менакер, **М. В. Востриков**, В. А. Тихомиров // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – № 3(67). – С. 180-189. – DOI 10.26731/1813-9108.2020.3(67).180-189.

В изданиях, индексируемых в базе SCOPUS:

5. Automation of the Process of Measurement of Electrical Parameters in Microprocessor Devices of Relay Protection / V. Sizykh, A. Daneev, **M. Vostrikov**, K. Menaker // Transportation Research Procedia: 12, Irkutsk-Krasnoyarsk, 06–08 октября 2021 года. – Irkutsk-Krasnoyarsk, 2022. – P. 467-474. – DOI 10.1016/j.trpro.2022.01.076.

6. **Vostrikov, M. V.** Creation of a learning microprocessor system for protection of contact network feeders using adaptive parametric identification methods / **M. V. Vostrikov**, K. V. Menaker, V. A. Ushakov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region, SibTrans 2019, Moscow, 21–24 мая 2019 года. – Moscow: Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 012066. – DOI 10.1088/1757-899X/760/1/012066. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/760/1/012066/pdf> (дата обращения 20.03.2023 г.). – Текст: электронный.

Патенты на изобретения и полезные модели:

7. Патент № 2708684 С1 Российская Федерация, МПК G01R 31/00. Устройство фильтрации и выделения первой гармоники в микропроцессорных устройствах релейной защиты фидеров контактной сети на основе схем ФАПЧ: № 2018134810: заявл. 01.10.2018: опубл. 11.12.2019 / К. В. Менакер, **М. В. Востриков**, Д. А. Яковлев, Е. В. Ярилов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Иркутский государственный университет путей сообщения (ФГБОУ ВО ИрГУПС).

8. Патент № 2784890 С1 Российская Федерация, МПК H02H 7/26. Способ аварийной защиты элементов систем тягового электроснабжения железных дорог переменного тока и устройство для его осуществления: № 2021129643: заявл. 11.10.2021: опубл. 30.11.2022 / **М. В. Востриков**, К. В. Менакер, А. В. Пультяков, В. Н. Сизых; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Иркутский государственный университет путей сообщения

В других изданиях:

9. **Востриков, М. В.** Прогнозирование динамики пусковых и переходных токов с целью повышения селективности микропроцессорных устройств релейной защиты фидеров контактной сети / М. В. Востриков, К. В. Менакер, А. В. Пультяков // Транспорт Урала. – 2021. – № 1(68). – С. 86-92. – DOI 10.20291/1815-9400-2021-1-86-92.

10. Морозов, Е. А. Повышение селективности работы микропроцессорных терминалов ЦЗА-27,5-ФКС(ФТС) с целью снижения числа отключений по неустановленным причинам / Е. А. Морозов, В. В. Фареньк, **М. В. Востриков**, В. А. Тихомиров // Молодая наука Сибири. – 2022. – № 3(17). – С. 63-76.

11. Морозов, Е. А. Особенности возможной реализации концепции «цифровая железная дорога» на примере микропроцессорных релейных защит фидеров контактной сети с использованием технологии «цифровой двойник» в границах Забайкальской железной дороги / Е. А. Морозов, В. В. Фареньк, **М. В. Востриков** // Техника и технологии наземного транспорта: Материалы международной студенческой научно-практической конференции, Нижний Новгород, 15 декабря 2021 года. – Нижний Новгород: филиал СамГУПС в г. Нижнем Новгороде, 2022. – С. 236-243.

12. Муравейко, Л. А. Способ on-line визуализации и хранения информации о токах, протекающих в контактной сети с привязкой к графику движения поездов на примере релейной защиты ЦЗА-27,5-ФТС / Л. А. Муравейко, **М. В. Востриков**, В. А. Тихомиров // Молодая наука Сибири. – 2021. – № 1(11). – С. 244-249.

13. Савватеев, В. А. Возможность использования современных USB осциллографов для on-line регистрации информации об изменении формы кривых тока и напряжения, протекающих в контактной сети с устройства микропроцессорной релейной защиты ЦЗА-27,5-ФТС / В. А. Савватеев, **М. В. Востриков**, Л. А. Муравейко // Образование - Наука - Производство : Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции, Чита, 24 декабря 2020 года. – Чита: Забайкальский институт железнодорожного транспорта - филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Иркутский университет путей сообщения", 2020. – С. 189-194.

14. Савватеев, В. А. Альтернативный способ снятия информации о пусковых и переходных токах, протекающих в тяговой сети, с микропроцессорной релейной защитой ЦЗА-27,5-ФТС / В. А. Савватеев, **М. В. Востриков**, Е. А. Титова // Образование - наука - производство : Материалы III Всероссийской научно-практической конференции, Чита, 20 декабря 2019 года. – Чита: Забайкальский институт железнодорожного транспорта - филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Иркутский университет путей сообщения", 2019. – С. 221-225.

15. **Востриков, М. В.** Повышение селективности микропроцессорных устройств релейной защиты путем прогнозирования динамики пусковых и переходных токов, протекающих в контактной сети / М. В. Востриков // Наука и образование транспорту. – 2019. – № 1. – С. 361-365.

16. **Востриков, М. В.** Повышение надежности работы микропроцессорной защиты фидеров контактной сети на основе использования схем ФАПЧ / М. В. Востриков, К. В. Менакер, В. А. Ушаков // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. – 2018. – Т. 1. – С. 625-628.

17. **Востриков, М. В.** Применение схем фазовой автоподстройки частоты для выделения первой гармоники в микропроцессорных устройствах релейной защиты фидеров контактной сети / М. В. Востриков, К. В. Менакер, В. А. Ушаков // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. – 2018. – Т. 1. – С. 629-633.

18. Епифанов, Е. Л. Проблемы существующих устройств релейной защиты фидеров контактной сети и пути их решения / Е. Л. Епифанов, С. А. Филиппов, **М. В. Востриков** // 115 лет железнодорожному образованию в Забайкалье: образование - наука - производство : Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Чита, 07–08 декабря 2017 года. – Чита: Забайкальский институт железнодорожного транспорта - филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Иркутский университет путей сообщения", 2017. – С. 217-223.

19. **Востриков, М. В.** Альтернативный способ модернизации схемы управления оперативной цепи блока БЗА ИнТер-27,5 кВ / М. В. Востриков // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. – 2017. – Т. 1. – С. 689-693.

20. **Востриков, М. В.** Повышение надежности перевозочного процесса за счет внедрения устройства адаптивной дистанционной защиты резервных ступеней фидеров контактной сети / М. В. Востриков, С. А. Филиппов, Д. А. Яковлев // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. – 2017. – Т. 1. – С. 745-748.

Научное издание

Востриков Максим Викторович

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Автоматизированная подсистема
микропроцессорной релейной защиты
фидеров контактной сети переменного тока

Специальность 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами
и производствами (технические науки)

Подписано в печать 27.03.2023. Печать офсетная. Бумага тип №2.
Формат 60x84/16. Печ.л. 1,0. Тираж 130 экз.

Забайкальский институт железнодорожного транспорта
672040, г. Чита, ул. Магистральная, 11
Редакционно-издательский отдел