

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Иркутский государственный университет путей сообщения»
(ФГБОУ ВО ИрГУПС)

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)

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор В.Н. Сизых

Иркутск 2023

Оглавление

Введение	4
Глава 1. Особенности эксплуатации автоматизированных микропроцессорных устройств релейной защиты фидеров контактной сети	11
1.1 Краткий обзор эволюции устройств релейной защиты фидеров контактной сети переменного тока	11
1.2 Структура, назначение и особенности эксплуатации микропроцессорного устройства релейной защиты фидеров контактной сети ЦЗА-27.5 – ФТС	17
1.3 Анализ статистики аварийных отключений устройств МРЗ в различных условиях эксплуатации	22
1.4 Выводы	30
Глава 2. Повышение селективности микропроцессорной релейной защиты в составе нижнего и среднего уровней АСУ ТП	31
2.1 Методика непрерывного мониторинга со сжатием сплайн-интерполяцией контролируемых МРЗ электрических параметров	32
2.2 Методика фильтрации и выделения первой гармоники тока и напряжения на основе фазовой автоподстройки частоты	48
2.3 Имитационная модель процесса краткосрочного прогнозирования изменения контролируемых МРЗ электрических параметров	58
2.4 Выводы	92
Глава 3. Автоматизированная подсистема микропроцессорной релейной защиты фидеров контактной сети переменного тока	93
3.1 Разработка технических решений для повышения селективности АП МРЗ ФКС переменного тока	93

3.2	Разработка устройства фильтрации и выделения первой гармоники тока и напряжения на основе фазовой автоподстройки частоты	98
3.3	Оценка надежности и безопасности устройства фильтрации и выделения первой гармоники тока и напряжения на основе фазовой автоподстройки частоты	100
3.4	Разработка автоматизированной подсистемы шаблонов аварийных ситуаций	106
3.5	Разработка автоматизированной подсистемы микропроцессорной релейной защиты в составе нижнего и среднего уровней АСУ ТП переменного тока	111
3.6	Выводы	117
	Заключение	118
	Список сокращений и условных обозначений	120
	Список литературы	122
	Приложение 1	140
	Приложение 2	141
	Приложение 3	142
	Приложение 4	143
	Приложение 5	144

Введение

Актуальность темы исследования. «Энергетическая стратегия» ОАО РЖД на перспективу до 2030 года планирует улучшение показателей энергоэффективности перевозочного процесса и в качестве приоритета предусматривает снижение риска возникновения кризисных ситуаций в энергоснабжении железнодорожного транспорта, оснащение эффективными техническими средствами и автоматизированными технологическими комплексами [1].

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 [2, 3, 4]. 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 станций и перегонов [5, 6].

Статистический анализ аварийных срабатываний 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 [7]. 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 ТД (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 (ГИД).

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. С этими обстоятельствами связана необходимость комплексной автоматизации нижнего и среднего уровней АСУ ТП переменного тока, реализация которой предполагает разработку аппаратных средств и алгоритмов на основе 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 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».

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, характеризующаяся 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.

Глава 1. Особенности эксплуатации автоматизированных микропроцессорных устройств релейной защиты фидеров контактной сети

1.1 Краткий обзор эволюции устройств релейной защиты фидеров контактной сети переменного тока

Релейная защита представляет собой комплекс устройств, предназначенных для быстрого автоматического обнаружения и отключения поврежденных элементов системы энергосистемы в аварийной ситуации с целью обеспечения исправной работы всей системы [10, 11].

Защиту первых электроустановок от коротких замыканий обеспечивали плавкие предохранители [12]. В начале 20 века сначала появились реле тока, затем реле напряжения. Токовая защита с 1910 года была дополнена реле направления мощности. Реле сопротивления, как неотъемлемая часть дистанционной защиты, начали выпускаться в начале 20-х годов двадцатого века. Электромагнитные механизмы применялись для реле тока и напряжения, а реле направления мощности и сопротивления были выполнены по индукционному принципу [13, 14].

В начале тридцатых годов появляются высокочастотные защиты линий электропередач на основе электронных ламп. С конца 40-х годов наметились тенденции построения реле с использованием полупроводниковых транзисторов и диодов. Уже в 60-х годах подобные реле стали получать все большее распространение.

Восьмидесятые годы двадцатого века ознаменуются выпуском реле и комплектов защит на основе аналоговых и цифровых микросхем [15]. Дальнейшая тенденция развития устройств релейной защиты связана с использованием микропроцессорной техники. Такие устройства помимо функций релейной защиты выполняют ряд дополнительных сервисных функций, таких как фиксация параметров аварийного режима с отображением их на дисплее, автоматическое повторное включение (АПВ), локализация места повреждения и т.д. [16].

С развитием устройств релейной защиты снижались их габаритные размеры, собственное энергопотребление, улучшались характеристики, увеличивалось быстродействие, чувствительность к электрическим параметрам, надежность аппаратных средств. Совершенствовались и алгоритмы релейных защит.

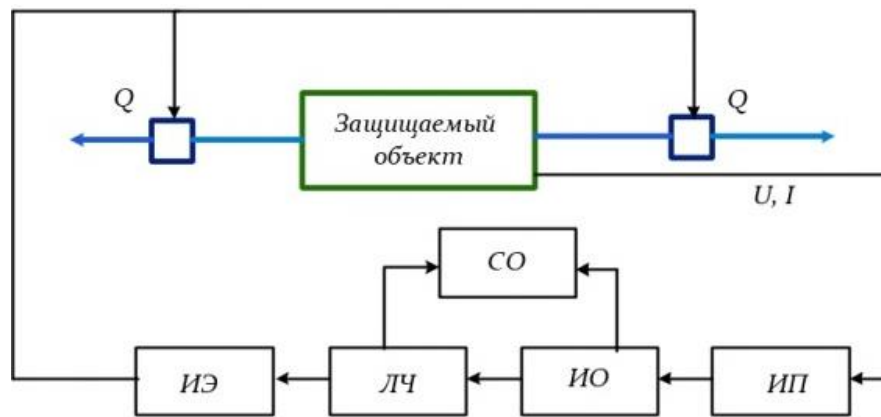
На сегодняшний день в соответствии с Правилами технической эксплуатации электроустановок потребителей [17] и Правилами технической эксплуатации электрических станций и сетей РФ [18] силовое оборудование электростанций, подстанций и электрических сетей должно быть гарантированно защищено от токов короткого замыкания и различных сбоев, отличных от нормального режима работы.

В данное время существует множество технических средств защиты, способных в кратчайшие сроки предотвратить аварию в системах электроснабжения или, в крайнем случае, предупредить персонал о нарушении режима их работы [19].

В основе работы устройств релейной защиты лежат два основных принципа:

- автоматическое определение дефектного объекта, отключение его выключателей и последующий выход на нормальный режим работы для всех остальных частей системы не имеющих повреждений;
- автоматическое определение и установление ненормальных, вынужденных и аварийных режимов работы защищаемой системы электроснабжения, дальнейшие рекомендации по изменению ситуации (отключение или оповещение эксплуатационного персонала) [20].

В общем виде, структурно, релейная защита представляет собой замкнутую систему на основе следующих взаимодействий между объектами (рисунок 1).



(ИП – измерительные и преобразовательные устройства, ИО – измерительные органы, ЛЧ – логическая часть, ИЭ – исполнительные элементы, СО - сигнальный орган, Q – выключатель, защищающий объект)

Рисунок 1- Общий вид структурной схемы релейной защиты

Первичная информация о текущем состоянии защищаемого объекта (значения тока и напряжения) предварительно преобразуется в измерительных трансформаторах тока и напряжения (ИП) соответственно и поступает в измерительные модули (ИО), которые ведут непрерывный мониторинг поступающих данных. Далее эти массивы также непрерывно обрабатываются в модуле контроллера защит и автоматики (ЛЧ), откуда (по ситуации) поступает сигнал (ИЭ) на управление коммутационным аппаратом Q (выключателем). В случае изменения режима работы защищаемого объекта также срабатывает звуковая и световая часть сигнализации релейной защиты (СО).

Назначение устройств релейной защиты и требования, которые предъявляются к ним, состоят в контролировании работы электрооборудования, своевременном реагировании на любые изменения рабочих параметров, мгновенном отключении поврежденных участков и оповещении оперативного персонала об аварии.

К устройствам релейной защиты предъявляются следующие требования:

1. Селективность. Аварийная ситуация должна быть точно идентифицирована относительно кратковременных возможных переходных

процессов и произведено отключение только той части электрооборудования, которая подвержена риску выхода из строя.

2. Чувствительность. Защита должна срабатывать даже при минимальном отклонении контролируемых электрических параметров относительно значений уставок.

3. Быстродействие. Скорость срабатывания защиты должна обеспечивать гарантированную сохранность исправного состояния защищаемого электрооборудования при любых возможных аварийных ситуациях.

4. Надежность. Устройства защиты должны находиться в исправном состоянии на протяжении всего установленного срока эксплуатации при обозначенных производителем условиях работы [21].

С середины прошлого века и до начала 70-х годов в качестве систем, защищающих от токов короткого замыкания и мощных перенапряжений в КС железных дорог переменного тока, предусматривались релейно-контактные защиты (на основе реле сопротивления КРС-132) [22]. Главным недостатком в работе данной релейной системы защиты были массовые случаи залипания подвижной системы на левом неподвижном металлическом упоре, что, в свою очередь, нередко приводило к несрабатыванию устройства.

В 70-80 года прошлого века появляются комплекты защит УЭЗФ (устройство электронной защиты фидеров) разных модификаций. У них появляется первая «память» (зачатки цифровизации), позволяющая игнорировать мертвые зоны при ближних коротких замыканиях (на основе контроля уровня изменения напряжения); отмечается снижение числа ложных срабатываний из-за наличия гололеда на проводах и тросах контактной сети; присутствует быстродействующая блокировка, позволяющая не реагировать на броски тока в смежных фидерах и т.д.

Данная система релейной защиты, ввиду массовости ее внедрения на сети железных дорог, до сих пор эксплуатируется как на отдельных тяговых подстанциях, так и на нескольких межподстанционных зонах, в том числе и на Забайкальской железной дороге.

К основным недостаткам этого типа защит относят несрабатывания или ложные срабатывания ввиду использования на участках железных дорог различных систем телесигнализации, телеуправления и телеблокировки, а также особенностей их настройки и эксплуатации [23].

В конце 90-х - начале 2000-х годов на территории России выделились несколько наиболее перспективных систем микропроцессорных релейных защит фидеров контактной сети (МРЗ ФКС) для железных дорог переменного тока:

- АЗм (автоматизированная защита модернизированная) – не получила широкого внедрения на сети железных дорог [24];

- БМРЗ (блок микропроцессорный релейной защиты) - производство НТЦ «Механотроника», г. Санкт-Петербург [25];

- ИнТер (интеллектуальный терминал) - производство «НИИЭФА – ЭНЭРГО», г. Санкт-Петербург [26, 27];

- ЦЗА (цифровая защита и автоматика) - производство «НИИЭФА – ЭНЭРГО», г. Санкт-Петербург [28, 29].

Принципиальные отличия трех МРЗ (БМРЗ, ИнТер, ЦЗА) несущественны, в основном связаны с типом исполнения, геометрическими размерами, элементной базой, числом и длительностью записи аварийных осциллограмм и т.д. Алгоритмы их работы практически идентичны и заимствованы с предыдущих версий электромеханических релейных защит.

Применение данных МРЗ позволяет:

- реализовать принципиально новые возможности в плане уровня защиты электрооборудования;

- обеспечить работу защиты при поступлении части информации об контролируемых параметрах;

- осуществлять прогноз предаварийных ситуаций;

- обеспечивать самодиагностику своих аппаратных и программных средств;

- обеспечивать большее быстродействие и селективность;

- обрабатывать большой объём информации в единицу времени, в том числе от дополнительных смежных устройств;
- реализовывать функции адаптации.

Максимальная эффективность микропроцессорной системы релейной защиты достигается за счет комплексного использования всех ее возможностей. Совмещение всех функций защиты, подсистем связи и передачи данных, регистрации и отображения информации позволяет реализовать многоуровневую систему автоматического управления [30].

Однако существует и ряд сложностей при использовании современных систем МРЗ:

- надежность МРЗ относительно невысока даже при наличии встроенных функций самодиагностики [31];
- относительно низкая электромагнитная совместимость и помехоустойчивость, особенно в условиях действия преднамеренных дистанционных мощных направленных электромагнитных импульсов;
- сложность настроек при эксплуатации;
- функциональная избыточность;
- относительно высокая стоимость;
- избыточная чувствительность, приводящая к ложным срабатываниям.

К несомненному преимуществу устройств МРЗ следует отнести микропроцессорную основу их реализации, модульность исполнения, многоуровневое иерархическое исполнение, комплексное проектирование [32].

В настоящее время на ЗабЖД наблюдается следующее распределение МРЗ ФКС по числу эксплуатируемых терминалов: АЗм – 1 %; ИнТер – 24 %; ЦЗА – 75 %. По договоренности с Забайкальской дирекцией по энергообеспечению – СП «Трансэнерго» - филиала ОАО «РЖД и Забайкальской дирекцией капитального ремонта и реконструкции объектов электрификации и электроснабжения – СП Центральной дирекции капитального ремонта и реконструкции объектов электрификации и электроснабжения – филиала ОАО «РЖД» в качестве экспериментального полигона определен участок Карымская-Борзя

Забайкальской железной дороги, а в качестве МРЗ ФКС предложена типовая ЦЗА-27,5 – ФТС.

1.2 Структура, назначение и особенности эксплуатации микропроцессорного устройства релейной защиты фидеров контактной сети ЦЗА-27.5 – ФТС

МРЗ ЦЗА-27,5-ФТС имеет блочно-модульное исполнение с кассетным расположением модулей датчиков напряжения (МДН), тока (МДТ), контроллера измерений и защит (МКИЗ) и контроллера автоматики (МКА) (рисунок 2).

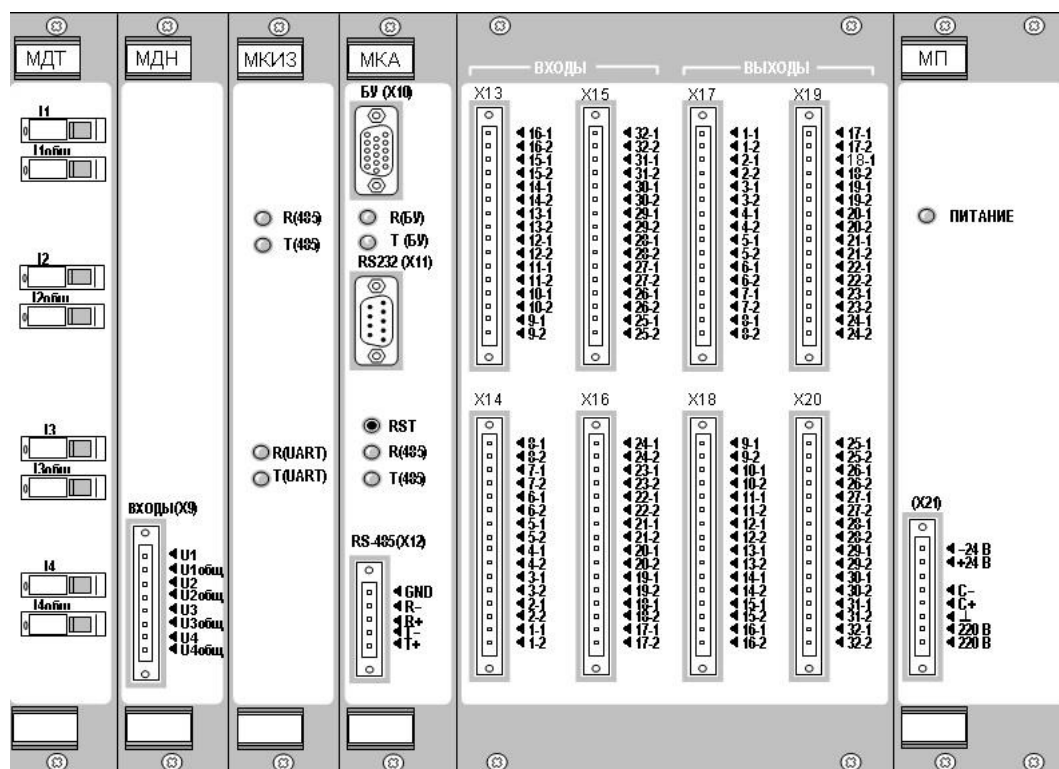


Рисунок 2 - Внешний вид и расположение модулей в ЦЗА -27,5 – ФТС

Модули датчиков напряжения (МДН) и тока (МДТ) состоят из промежуточных трансформаторов и прецизионных усилителей. Промежуточные трансформаторы обеспечивают гальваническую развязку и предварительное масштабирование контролируемых входных сигналов. Прецизионные усилители осуществляют точное масштабирование сигналов и обеспечивают согласование промежуточных трансформаторов с импедансом аналого-цифрового

преобразователя. Неоспоримым преимуществом указанных модулей является тот факт, что они не требуют настройки и регулировки в течение всего времени эксплуатации МРЗ. На лицевых панелях модулей МДН и МДТ расположены клеммные разъемы для подключения внешних цепей от измерительных трансформаторов напряжения и тока.

Модуль МКИЗ предназначен для аналого-цифрового преобразования и обработки сигналов, поступающих с модулей МДН и МДТ и последующей их передачи в модуль МКА, где они проходят обработку посредством алгоритмов защит и автоматики соответствующих ступеней с принятием решения по сохранению рабочего состояния коммутационных аппаратов или их отключению. Существенным недостатком модуля МКИЗ является ограниченность его объема памяти с возможностью сохранения не более 16 последних аварийных осциллограмм.

Модуль МКА – это центральный модуль ЦЗА-27,5-ФТС. Модуль МКА включает в себя:

- память программ (ПП);
- оперативное запоминающее устройство (ОЗУ);
- перепрограммируемое постоянное запоминающее устройство (ППЗУ).

МКА на основе зафиксированных значений электрических параметров принимает решения по управлению выходными контакторами в соответствии с заданными алгоритмами защит, автоматики и управления релейной защитой [29].

Рассмотрим процесс работы МРЗ ЦЗА-27,5-ФТС с аппаратно-программной точки зрения. Контролируемые сигналы непрерывно снимаются с трансформаторов напряжения и тока и поступают на первичные частотные фильтры нижних частот, в которых происходит срез высших гармонических составляющих.

Далее происходит оцифровка сигналов напряжения и тока с целью дальнейшего дискретного преобразования Фурье и представления сигналов в виде гармонического ряда. Цифровые фильтры, реализованные на программном уровне, осуществляют выделение первой (основной) гармоники.

Программный уровень МРЗ анализирует и обрабатывает полученные параметры, выдавая соответствующее управляющее воздействие через цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) на исполнительные органы выключателей ФКС. Параллельно информация об аварийных режимах поступает на пульт-табло оперативного персонала и сохраняется в памяти МКИЗ.

Принятие решения о срабатывании МРЗ осуществляется на основе оценки амплитудных значений напряжения и тока, а также разности их начальных фаз. При этом следует учитывать, что цифровые фильтры дают некоторую погрешность определения фаз контролируемых сигналов в случае отклонения их частоты от номинальных значений.

МРЗ ЦЗА-27,5-ФТС оснащена жидкокристаллическим дисплеем для текущего визуального наблюдения за изменением контролируемых параметров. Имеет возможность регистрации и сохранения информации о случаях аварийных срабатываний. МРЗ различает 18 причин аварийных событий, которые хранятся в меню АВАРИИ и 16 осциллограмм последних аварийных отключений выключателя.

Запись осциллограмм при регистрации производится с дискретизацией 0.833 мс. Длительность записываемых осциллограмм 1,2 с:

- 0,5 с. – временной интервал, предшествующий аварийной ситуации;
- 0,7 с. – временной интервал аварийной ситуации [29].

Просмотр осциллограмм осуществляется оперативным персоналом при помощи ПЭВМ и специальной программы АСУ ЦЗА-ФТС (рисунок 3, 4) [33].

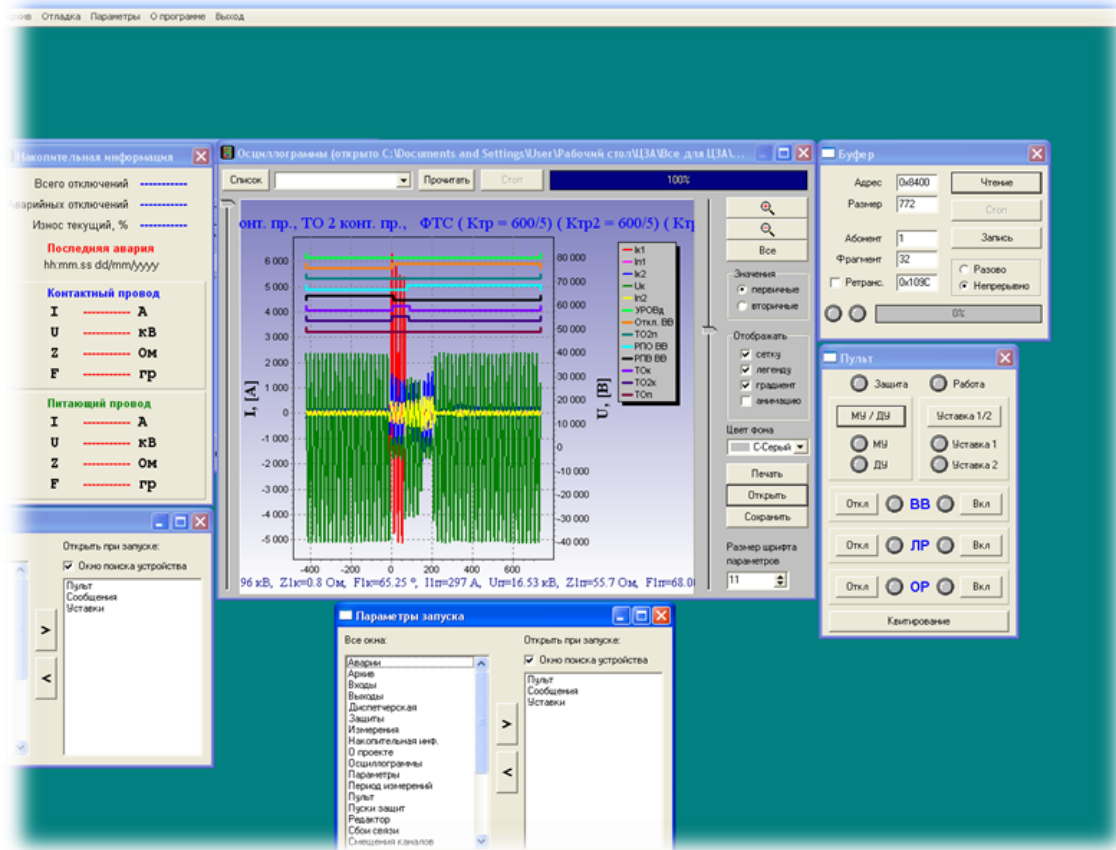


Рисунок 3 – Внешний вид рабочих окон АСУ ЦЗА-ФТС

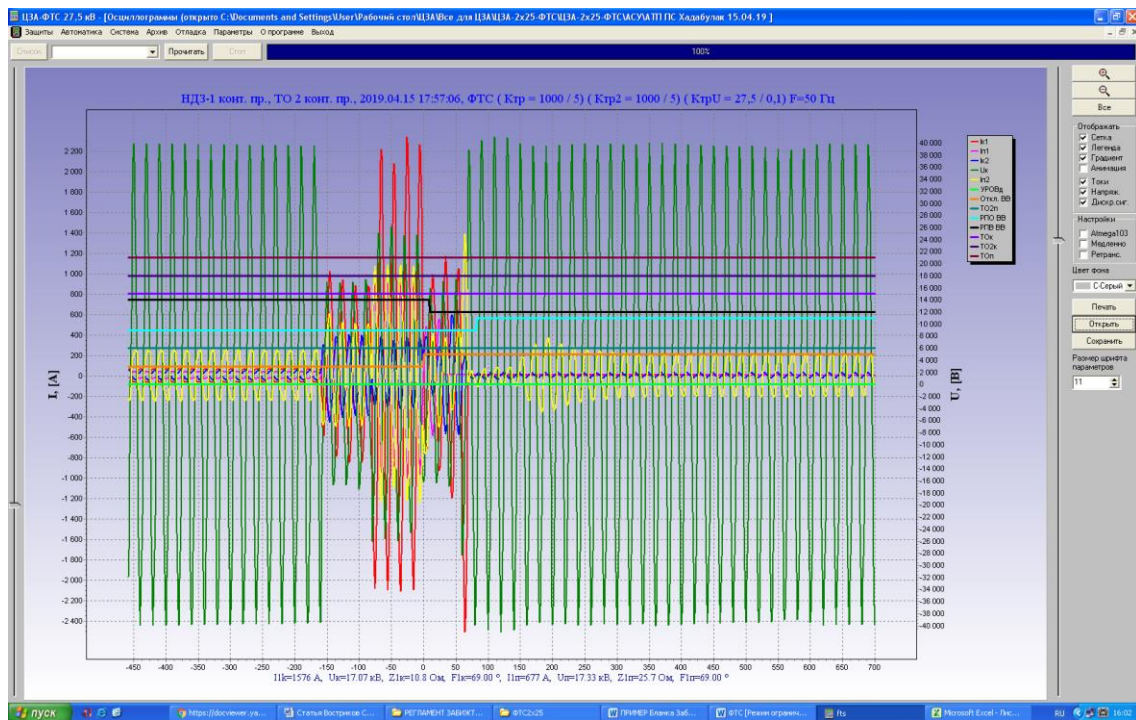


Рисунок 4 – Пример отображения сохраненной аварийной осциллограммы в АСУ ЦЗА-ФТС

Контактная сеть является частным случаем стандартной однофазной (многопроводной) электрической сети, не имеющей резерва (хотя по категории надежности электроснабжения относится к первой). Учитывая специфику возможных режимов работы системы тягового электроснабжения, к устройствам релейной защиты ФКС переменного тока предъявляется ряд дополнительных требований и условий [34, 35, 36].

Релейная защита не может считаться полностью автоматической системой ввиду того, что в ее состав входят следующие системы автоматизации:

- измерительные датчики для получения аналоговых сигналов контролируемых величин;
- объекты для ввода/вывода дискретных сигналов и передачи сигналов управляющих воздействий;
- средства сбора, обработки и хранения необходимой информации – серверы;
- человеко-машинные интерфейсы – панели управления и автоматизированные рабочие места (АРМ).

МРЗ ЦЗА-27,5-ФТС выполняет помимо функции защиты и автоматики, контроля и сигнализации, функцию местного и дистанционного управления фидером тяговой сети (ФТС).

ЦЗА-27,5-ФТС имеет возможность включения в состав автоматизированной системы управления (АСУ) тяговой подстанции в качестве подсистемы нижнего уровня.

МРЗ ЦЗА-27,5-ФТС обеспечивает два режима управления:

- местное управление (пульт блока управления);
- дистанционное управление (по последовательному каналу от АСУ или через дискретные входы от стойки телемеханики) (рисунок 5).

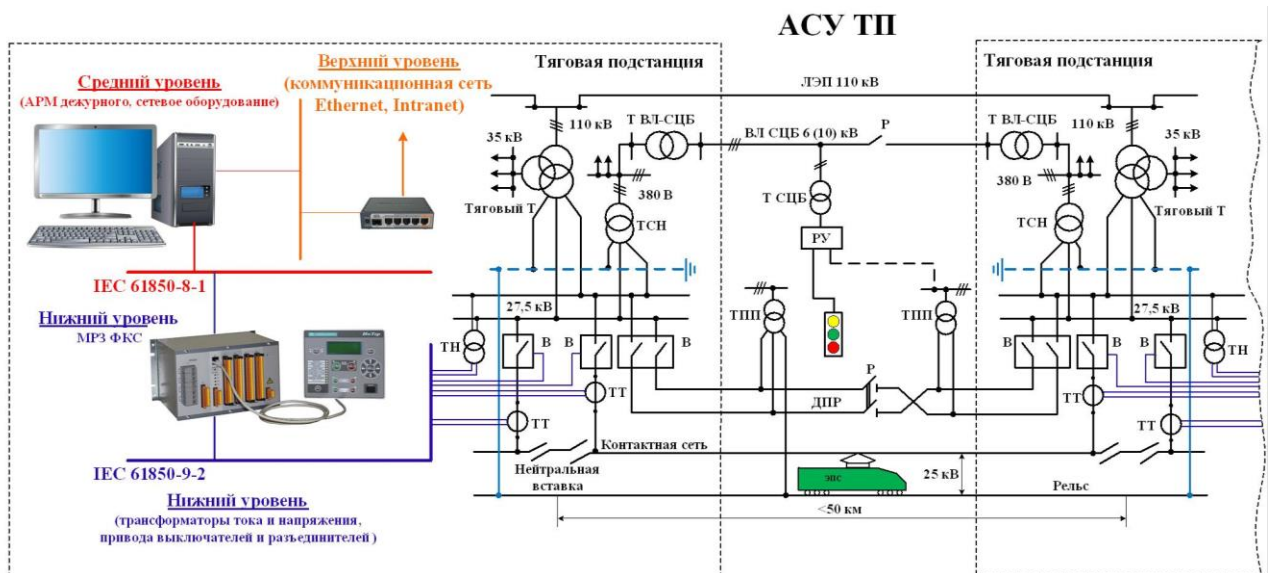


Рисунок 5 - Структурная схема МРЗ ФКС в составе нижнего уровня АСУ ТП переменного тока

Одним из недостатков в эксплуатации МРЗ ЦЗА-27,5-ФТС является отсутствие возможности записи в память устройства данных об изменении токов и напряжений, протекающих в тяговой сети в on-line режиме (записывается только ограниченное число аварийных осциллограмм) и возможности их визуализации (on-line просмотра) на дисплее блока управления или в АСУ ЦЗА-ФТС.

1.3. Анализ статистики аварийных отключений устройств МРЗ в различных условиях эксплуатации

На рисунке 6 представлена диаграмма отключений МРЗ ФКС за период 2018-2021 гг. по Борзинской дистанции электроснабжения (ЭЧ-5).

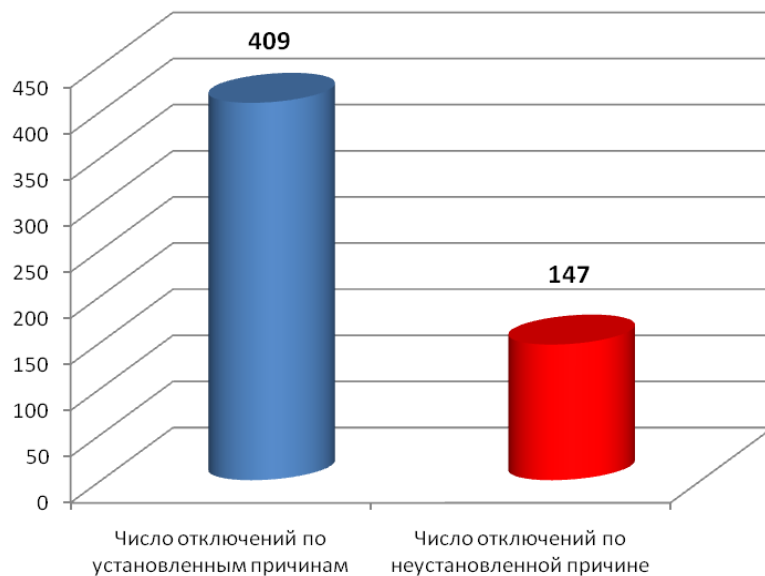
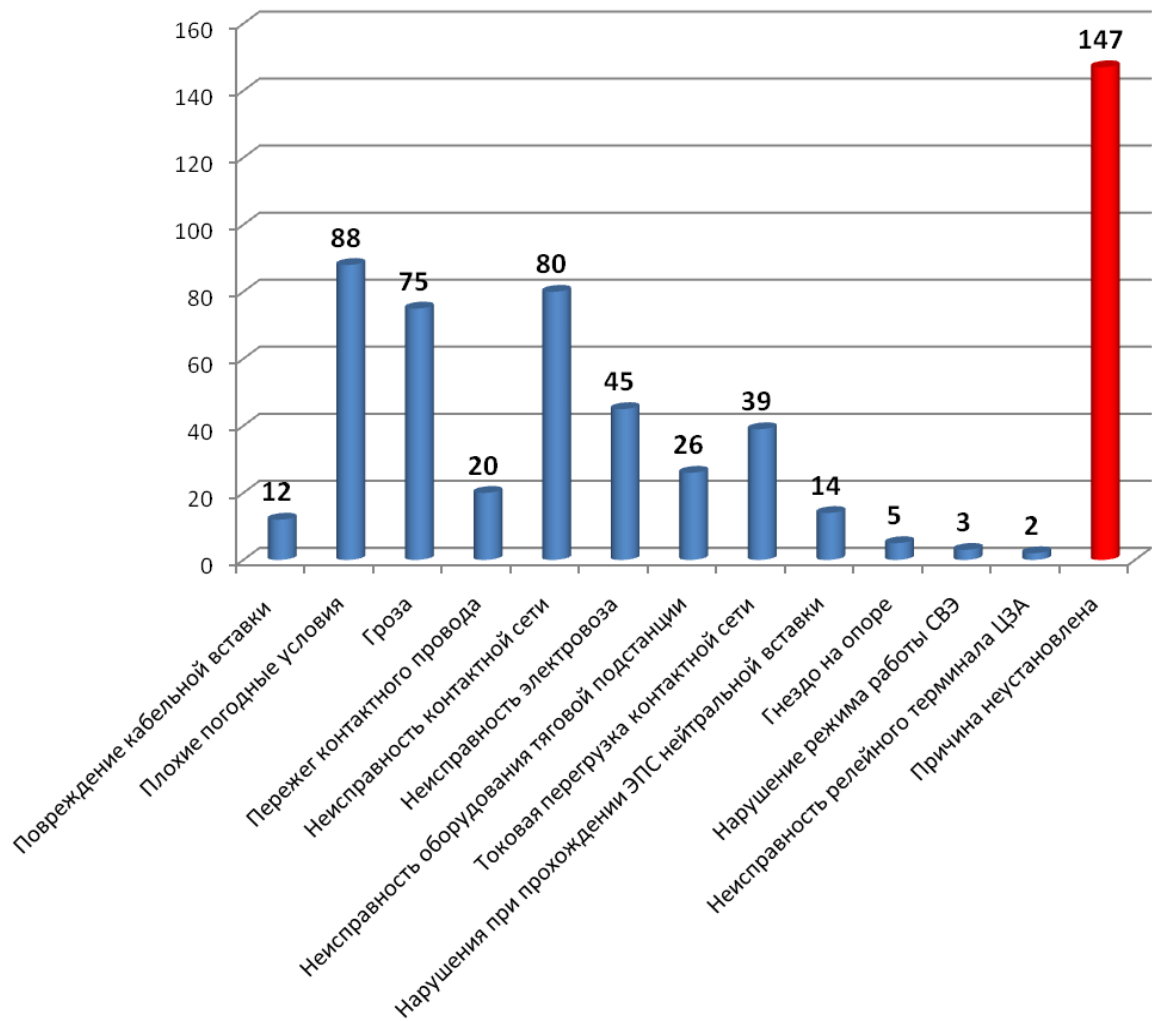


Рисунок 6 – График срабатывания устройств релейной защиты за период 2018-2021 гг. на Борзинской дистанции электроснабжения ЗабЖД (--- общее число отключений по установленным причинам, --- число отключений по неустановленным причинам)

Анализируя диаграмму, можно выделить следующие укрупненные группы событий, по причине которых происходит штатное отключение МРЗ:

- технические неисправности (электровозов, контактной сети, тяговых подстанций);
- плохие погодные условия и гроза;
- нарушение режимов работы сетей внешнего электроснабжения;
- нарушения, связанные с организацией движения поездов (несоблюдение интервалов попутного следования, нарушение чередования и числа поездов в пакете, нарушение скоростного режима ведения и т.д.).

Достаточно большое число (147 раз или 26 %) срабатываний МРЗ приходится на неустановленные причины.

Проанализируем несколько таких осциллограмм, снятых с МРЗ ЦЗА-27,5-ФТС на объектах системы тягового электроснабжения участка ЗабЖД Карымская-Забайкальск за исследуемый период времени (рисунок 7, 9).

Отключение выключателя ФТС 1 на ТП Бурятская зафиксированное 05.04.2018 г. Пиковые значения тока достигают 1180 А, но длится этот режим всего 100 мс.

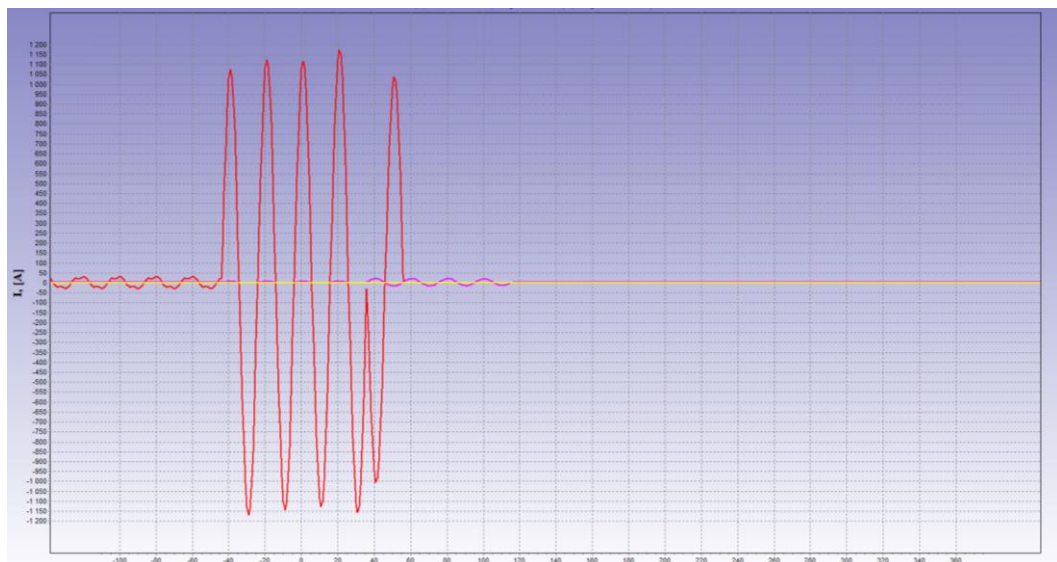
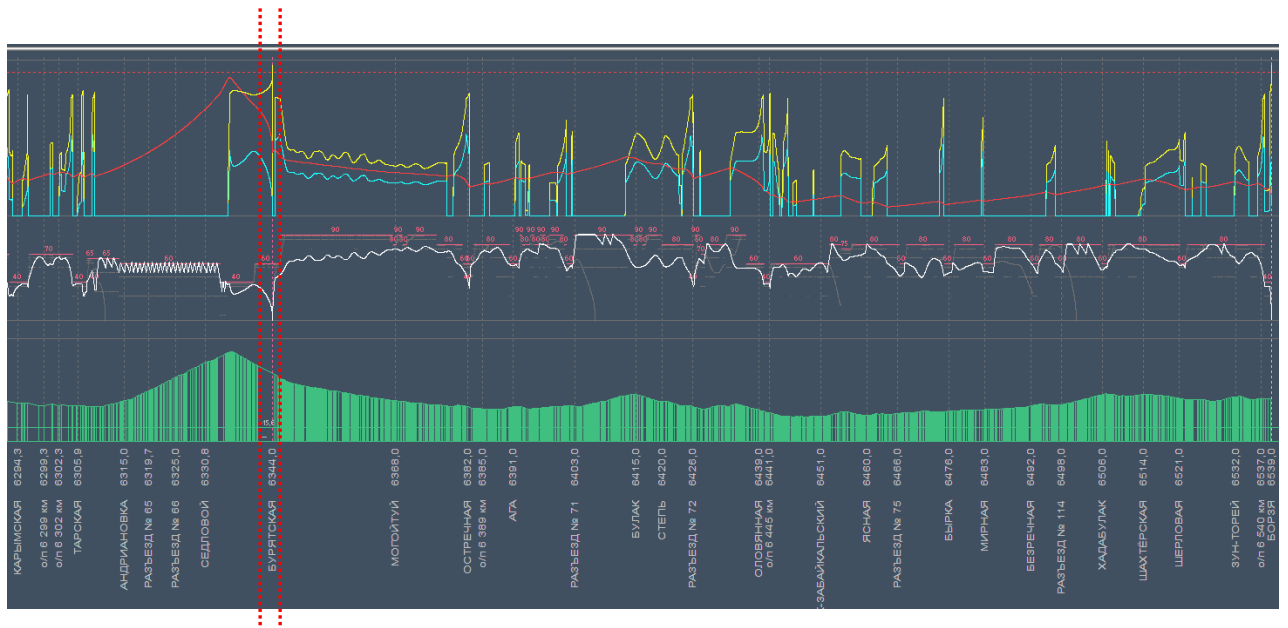


Рисунок 7 – Осциллограмма аварийного отключения устройств МРЗ по неустановленной причине, зафиксированная на ТП Бурятская 05.04.2018 г.

Проведем имитационное моделирование тягового расчета для одиночно движущегося поезда массой 7100 тонн, ведомого электровозом 2ЭС5К в ПК «КОРТЭС», применяемым ОАО «РЖД» для расчета параметров режимов работы СТЭ участков железных дорог [37, 38] (данные о текущей поездной ситуации, сложившейся в тот момент времени, взяты из ГИД) в режиме движения с остановкой в зоне срабатывания МРЗ ФКС [39] (рисунок 8).



L	Ю
6344,90	893
6344,72	918
6344,53	901
6344,35	87
6344,20	0
6344,09	0
6344,02	0
6344,00	88
6343,99	144
6343,97	162

Рисунок 8 – Результат тягового расчета одиночного поезда массой 7100 тонн, ведомого электровозом 2ЭС5К с остановкой на ТП Бурятская и фрагмент изменения тока, протекающего в контактной сети на выделенном участке (----)

Как видно из результатов моделирования, ток, протекающий в контактной сети при данной поездной ситуации, превышает значения 900 А (ток уставки МРЗ). Зафиксированные при моделировании значения тока несколько отличаются от полученных на аварийной осциллограмме, это связано с тем, что минимальный шаг времени (период осреднения) в ПК «КОРТЭС» составляет 15 секунд, а длительность фиксации динамики изменения тока в МРЗ составляют всего 1,2 секунды.

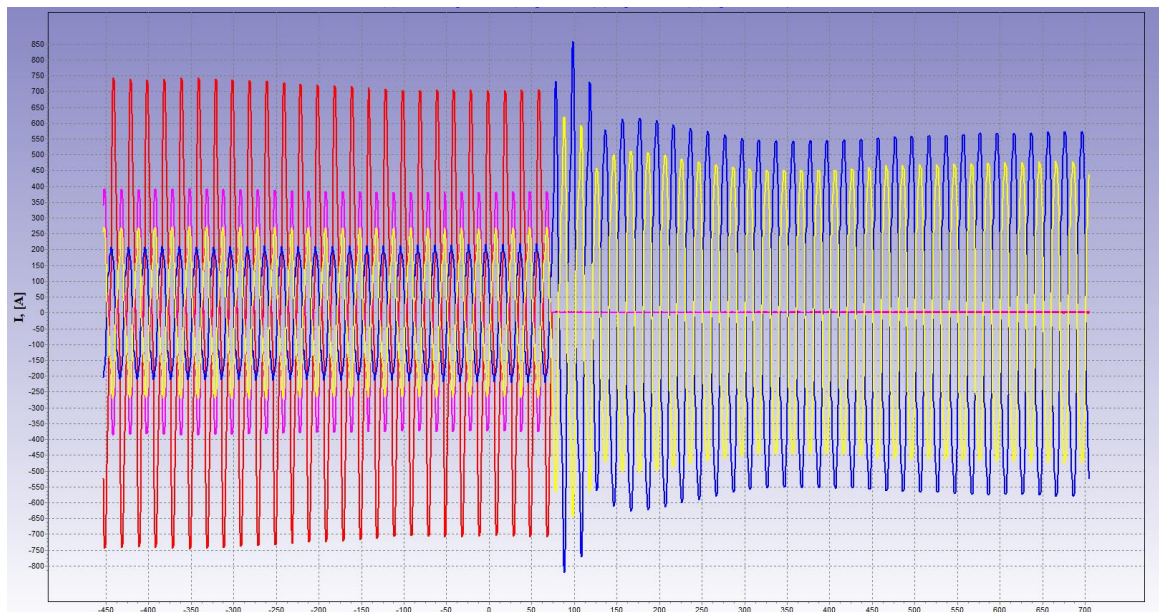
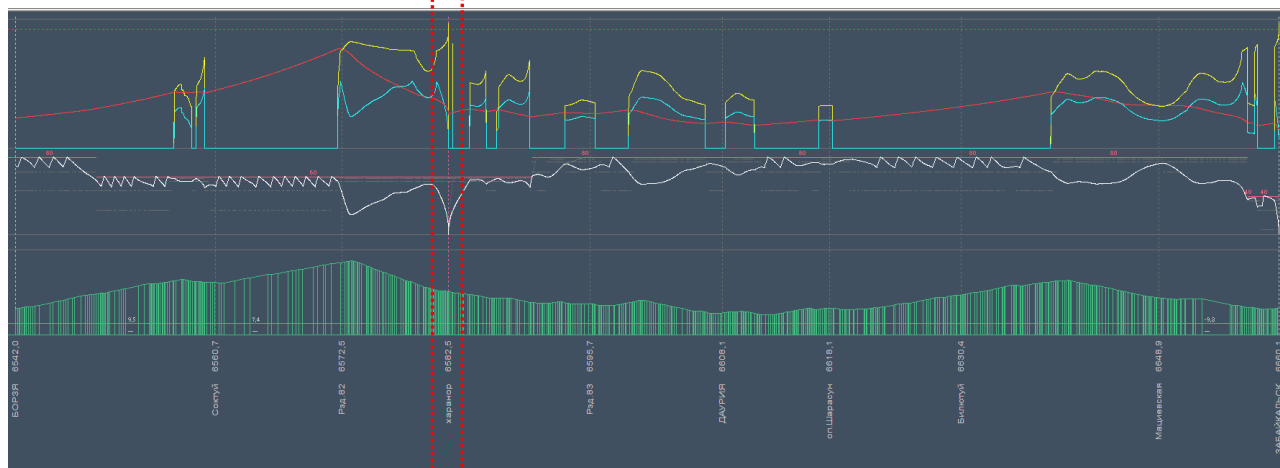


Рисунок 9 – Осциллограмма аварийного отключения устройств МРЗ по неустановленной причине, зафиксированная на ПС Харнор 12.09.2021 г.

Проведем имитационное моделирование тягового расчета для одиночно движущегося поезда массой 7100 тонн, ведомого электровозом 2ЭС5К в ПК «КОРТЭС» (данные о текущей поездной ситуации, сложившейся в тот момент времени взяты из ГИД) в режиме движения с остановкой в зоне срабатывания МРЗ ФКС (рисунок 10).



L	I _э
6580,14	728
6579,93	758
6579,72	791
6579,51	827
6579,31	880
6579,11	922
6578,92	904
6578,73	883
6578,54	870
6578,35	866
6578,17	864

Рисунок 10 – Результат тягового расчета одиночного поезда массой 7100 тонн, ведомого электровозом 2ЭС5К с остановкой на ПС Харанор и фрагмент изменения тока, протекающего в контактной сети на выделенном участке (----)

Для подтверждения чистоты эксперимента (рисунок 11) приведем статистику отключений МРЗ ФКС за период 2018-2021 гг. по Могочинской дистанции электроснабжения (ЭЧ-2).

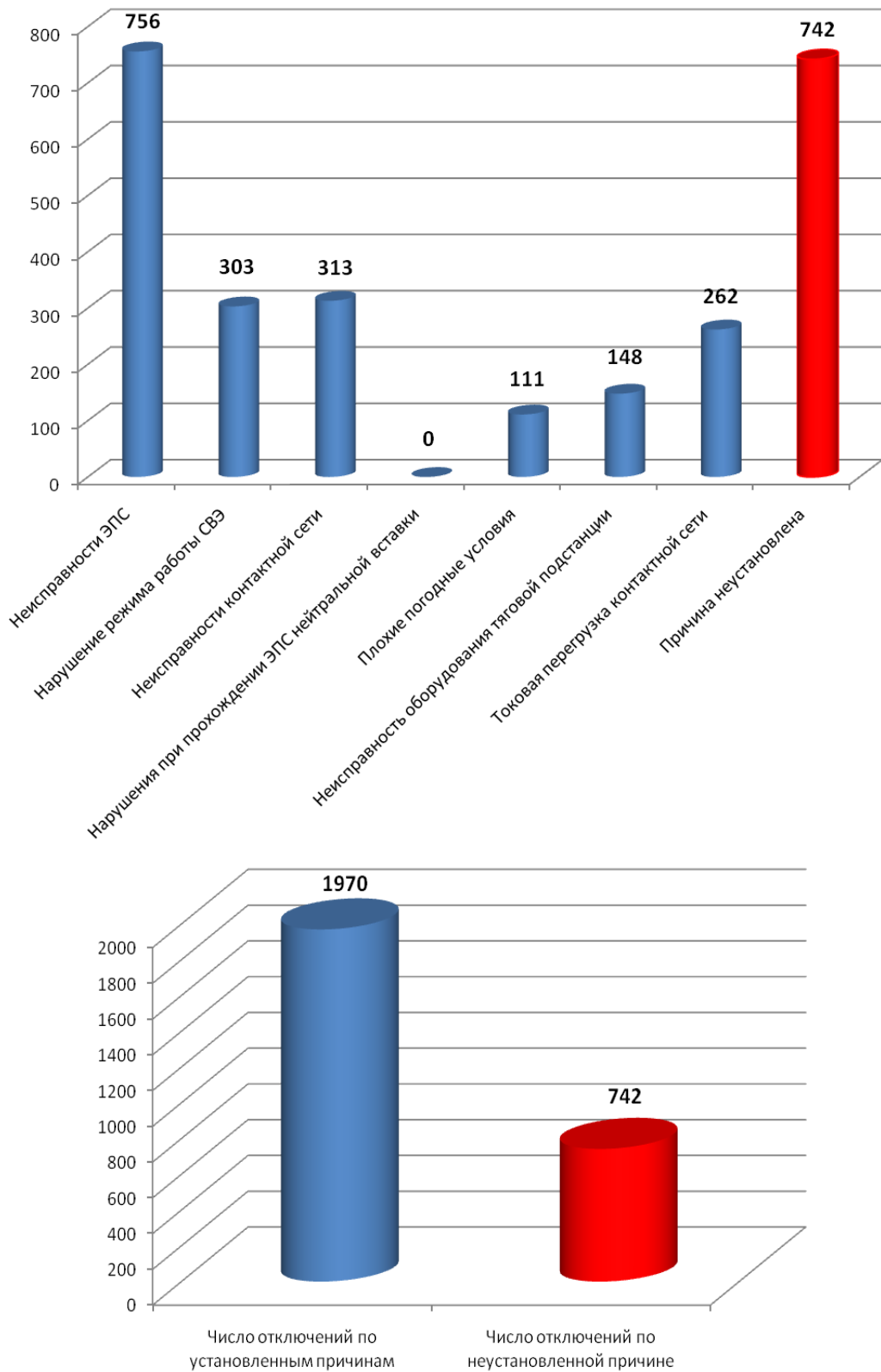


Рисунок 11 – График срабатывания устройств релейной защиты за период 2018-2021 гг. на Могочинской дистанции электроснабжения ЗабЖД (--- общее число отключений по установленным причинам, --- число отключений по неустановленным причинам)

Достаточно большое число (742 раза или 27 %) от общего числа срабатываний МРЗ также приходится на неустановленные причины, что подтверждает актуальность исследуемой проблематики.

Исследуя и анализируя факторы, приводящие к столь частому срабатыванию устройств МРЗ по неустановленным причинам, выявлены следующие недостатки в стандартном алгоритме ее работы, связанные с жестко введенными уставками (не меняются совместно с изменением поездной ситуации и режимом работы СТЭ), которые не позволяют распознать режимы, связанные с кратковременным увеличением тягового тока и изменением угла сдвига фаз между током и напряжением в нормальном режиме работы:

- при трогании тяжеловесных и сдвоенных поездов с места (на станции и на перегоне);
- при возобновлении режима электропотребления после прохождения нейтральной вставки;
- при переключении режимов работы двигателей электровозов;
- при одновременном вступлении или нахождении нескольких тяжеловесных или сдвоенных поездов в зоне действия защиты и при выходе из нее при пакетном и пачечном графике движения [40].

Большая часть поездных ситуаций, приводящих к мгновенному резкому возникновению и протеканию в контактной сети токов больших величин, связана именно с появлением в графике движения тяжеловесных, длинносоставных и сдвоенных поездов. В настоящий момент пакет поездов, пропускаемых по четному направлению движения, выглядит следующим образом: 6300 т. - 7100 т. – 12600 т. – 6300 т. – 7100 т. - 14200 т., т.е. каждый третий поезд в пакете – тяжеловесный. Интервал движения между поездами по режимным картам Забайкальской железной составляет от 10 до 16 минут, следовательно, в защищаемой зоне действия МРЗ одномоментно находятся и перемещаются два или три таких тяжеловесных поезда, ведомые электровозами «ЕРМАК» (2ЭС5К, 3ЭС5К), пусковой ток при трогании с места зачастую превышает значения $I_{п} \geq 1000$ А, а в процессе движения «на подъем» очень близок к этим значениям [41].

1.4 Выводы:

1) МРЗ ФКС является неотъемлемой частью нижнего уровня АСУ ТП переменного тока и от селективности ее работы в значительной мере зависит степень надежности защиты и живучести объектов СТЭ, соблюдение графика движения поездов и безопасность движения [42, 43].

2) Несмотря на широкое применение микропроцессорной техники в устройствах МРЗ ФКС их алгоритмы работы заимствованы от предшествующих электромеханических релейных защит, что делает невозможным использование полного спектра программных и аппаратных возможностей микропроцессора. Поэтому целесообразно уделить внимание усовершенствованию имеющихся и разработке современных алгоритмов функционирования МРЗ ФКС при одновременной их интеграции в состав как нижнего, так и среднего уровней АСУ ТП.

3) Установлено, что предпосылками части аварийных отключений МРЗ ФКС по неустановленным причинам являются пусковые и переходные токи, протекающие в контактной сети. Показано, что уменьшение числа такого рода отключений по-прежнему остается актуальной научно-технической задачей, направленной на повышение степени защиты объектов СТЭ, безопасности движения и соблюдение графика движения поездов.

2. Повышение селективности микропроцессорной релейной защиты в составе нижнего и среднего уровней АСУ ТП

Ранее было установлено, что большинство случаев срабатывания устройств релейной защиты по неустановленным причинам, связаны не с аварийными режимами работы системы тягового электроснабжения, а с пусковыми и переходными токами при пропуске поездов повышенного веса, сдвоенных поездов, реализацией пакетного графика движения, движением поездов по сложному профилю пути, а также применением режима рекуперации на электровозах [3, 7, 10, 19].

Алгоритмы работы РЗА, представленные в настоящее время на рынке микропроцессорных терминалов защит, предполагают четкое, полноценное разграничение нормального и аварийного режимов, где величины контролируемых параметров достоверно указывают на наличие или отсутствие повреждения защищаемого ФКС, т.е. при условии четкой и полной определенности ситуации [21, 24, 25, 27, 28, 29].

На практике устройства МРЗ должны осуществлять управляющие воздействия при одновременном стечении многих внешних и внутренних факторов, что приводит к невозможности однозначной оценки текущего режима работы защищаемого объекта.

Поскольку, при возникновении ситуации с наличием короткого замыкания, для СТЭ могут наблюдаться более серьезные последствия, существующие алгоритмы защитных устройств ориентированы на отключение, в том числе, и в случае штатного режима работы энергосистемы.

Между тем, применение микропроцессорной элементной базы позволяет реализовывать качественно новые современные методы и алгоритмы МРЗ, в том числе защит фидеров контактной сети.

2.1 Методика непрерывного мониторинга со сжатием сплайн-интерполяцией контролируемых МРЗ электрических параметров

Измеряемые сигналы тока и напряжения в современных терминалах МРЗ снимаются с низковольтных обмоток измерительных трансформаторов тока и напряжения. Далее сигналы поступают во входные преобразователи, которые обеспечивают гальваническую развязку внешних цепей от внутренних, приведение контролируемых сигналов к нормированному уровню и предварительную частотную фильтрацию перед их аналого-цифровым преобразованием (АЦП).

В АЦП осуществляется преобразование мгновенных значений входных сигналов в цифровые значения. Преобразования выполняются с частотой выборок до 2000 Гц. Далее полученные цифровые сигналы тока и напряжения с целью дополнительной фильтрации и гармонического анализа в микропроцессоре проходят через операцию быстрого преобразования Фурье. После чего по выборкам рассчитываются интегральные параметры контролируемых сигналов и их гармоник (амплитудные, действующие значения и т.д.).

Аналитическое представление осциллограмм тока и напряжения в виде непрерывной функции во времени используется только для визуализации информации в моменты срабатывания устройств МРЗ [32]. В алгоритмах действующих защит применяются только интегральные параметры контролируемых сигналов и их гармоник. В этом и состоит главный недостаток, не позволяющий осуществлять прогноз динамики изменения пусковых и переходных токов, протекающих в контактной сети. Полноценный анализ состояния вопроса показал, что в настоящее время имеется множество способов аналитического представления, сжатия и хранения оцифрованных электрических сигналов.

Среди современных эффективных методов сжатия, хранения и представления графической информации можно выделить такие стандарты как MPEG4, DivX 5.x, JPEG, JPEG2000. Проведенные в работах [44, 45] исследования

позволили выявить оптимальный подход к решению поставленной задачи, заключающийся в сочетании многомасштабного анализа и сплайн-функций, которые используются для восстановления дискретной информации. Сплаины при обработке плавных и резко переменных во времени сигналов имеют лучшие аппроксимационные свойства и, при этом, обеспечивают минимально возможную погрешность. При их применении существенно уменьшается объем вычислений, что особенно важно при on-line измерениях. Поскольку сплайны – это кусочно-полиномиальные функции, они легко могут быть использованы при вычислениях, включая операции интегрирования, дифференцирования и т.д.

Алгоритмы для графического изображения сигналов с помощью сплайнов и вычисления их коэффициентов чрезвычайно эффективны как при их программной, так и аппаратной реализации.

Метод адаптивного сжатия информации при сплайн-интерполяции позволяет представить анализируемый сигнал при плавном или наоборот резко переменным изменении с максимальным или минимальным шагом дискретизации соответственно. Это позволяет обеспечить максимальную точность графического представления сигналов при наименьшем объеме вычислений и объеме хранимой информации.

Метод адаптивного сжатия информации при сплайн-интерполяции заключается в прореживании узлов «склейки» сплайна (измеренных дискретных отчетов) в два раза. При этом проверяется сумма квадратов отклонений сплайна от аппроксимированных точек. При допустимых отклонениях процесс циклического двукратного уменьшения числа дискретных отчетов повторяется.

Алгоритм сжатия графических данных, построенный на основе сплайнового многомасштабного анализа с адаптивным расчетом коэффициентов, по данным исследования, позволил увеличить коэффициент сжатия (при идентичном качестве представленного сигнала) на 5-15 %.

Уменьшение же времени вычислений при применении данного алгоритма составило 30-40 % по сравнению с самой быстрой на сегодня технологией JPEG.

Данный факт подтверждает возможность его использования для on-line измерений сигналов тока и напряжения в МРЗ.

В процессе реализации сплайн-интерполяции контролируемых сигналов МРЗ возник вопрос о выборе вида сплайнов, которых на сегодняшний момент насчитывается несколько десятков.

Линейная интерполяция, интерполяция полиномами Лагранжа и Ньютона, сплайн-интерполяция, Sinc-интерполяция [46-49] открывают широкие возможности для аналитической фиксации и представления контролируемых параметров.

Специфика поставленной задачи аналитического представления осциллограмм тока и напряжения в виде непрерывной функции во времени состоит:

- в непрерывном появлении новых измеренных значений;
- в on-line представлении функций;
- в быстропеременном характере анализируемых функций.

Проведенный анализ показал нецелесообразность применения полиномов Лагранжа и Ньютона применительно к решению поставленной задачи в виду значительной сложности вычислений и относительно больших погрешностей приближения функций в промежуточных точках. Коэффициенты полиномов Лагранжа и Ньютона определяются для всех измеренных точек одновременно. Степень полиномов определяется числом измеренных точек. За один период изменения функции тока и напряжения число дискретных отчетов в современных устройствах релейной защиты достигает двух и более тысяч. Сложность вычислений полиномов таких степеней, невозможность их пересчета при появлении новых измеренных значений и значительные погрешности приближения функций в промежуточных точках приводит к необходимости поиска других подходов для решения поставленной задачи.

Метод Sinc-интерполяции, с одной стороны, идеально подходит для относительно медленно изменяющихся функций тока и напряжения в устройствах МРЗ. Данный метод является следствием теоремы Котельникова [50]:

$$f(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} F(t_i) \cdot \frac{\sin\left(\pi \frac{t-T_i}{T_{i+1}-T_i}\right)}{\pi \frac{t-T_i}{T_{i+1}-T_i}}, \quad (1)$$

Однако практическое применение выражения (1) выявило его главный недостаток. Для вычисления промежуточных точек требуется суммирование бесконечного ряда слагаемых, учитывающих дискретные предшествующие и последующие измеренные дискретные значения сигналов. В результате этого по скорости вычислений данный метод проигрывает сплайн-интерполяции на порядки [9, 51].

Метод кубической сплайн-интерполяции для решения поставленной задачи может быть выбран как наиболее оптимальный. К преимуществам кубических сплайнов следует отнести непрерывность и гладкость функции при одновременном ее описании в пределах отдельного интервала многочленом не выше третьей степени. Непрерывность первой и второй производной ведет к упрощению вычислений с одной стороны и обеспечивает плавность интерполируемой функции с другой. Входными данными для интерполяции кубическими сплайнами является набор результирующих точек, снятых в результате измерений на определенном отрезке времени.

Таким образом, для решения поставленной задачи, в качестве основного метода интерполяции контролируемых функций тока и напряжения целесообразно выбрать интерполяцию кубическими сплайнами в виду их простоты, высокой скорости вычислений в онлайн режиме и точности описания [51-53].

Однако, по способу склейки, кубические сплайны делятся на сплайны, которые приближаются к прямой линии, параболе и кубической функции в граничных точках [54, 55].

Проведенные многочисленные исследования [9, 54, 55] позволили выявить оптимальный метод сплайн-интерполяции функций тока и напряжения.

Склейка полиномов с приближением функций к параболе и кубической функции дают побочные эффекты при интерполяции резкопеременных отрезков функций пусковых и переходных токов (рисунок 14, 15) [9, 46]. Способ сплайн-интерполяции с приближением участков склейки к прямой линии (метод Хироши Акимы) дает наилучшие результаты (рисунок 13).

В качестве доказательства на рисунках 13-15 приведены результаты сплайн-интерполяции осциллограмм тока и напряжения, зафиксированных снятых устройствами ЦЗА-27,5-ФТС на тяговой подстанции ЗабЖД – филиала ОАО «РЖД» (рисунок 12).

Анализ точности интерполяции различных способов, проведенный с помощью оценки среднеквадратичных отклонений функций тока в узловых точках n подтвердил оптимальность использования метода кубической сплайн-интерполяции с приближением к прямой линии в граничных точках (метод Хироши Акимы).

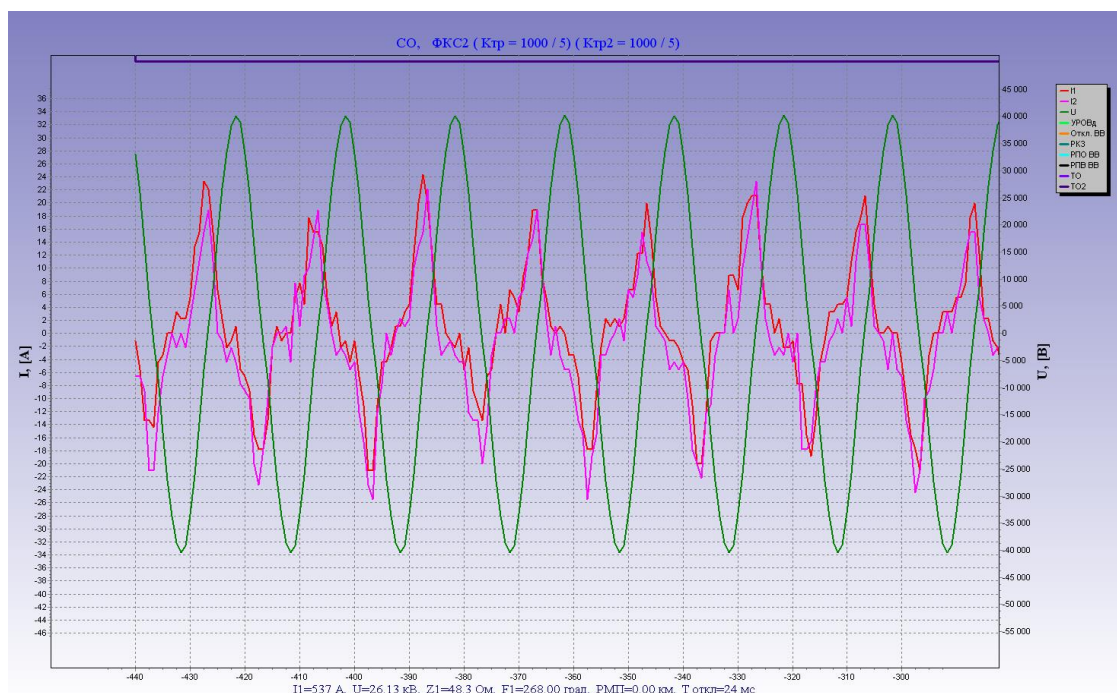


Рисунок 12 - Осциллограммы тока и напряжения, зафиксированные МРЗ ЦЗА-27,5-ФТС

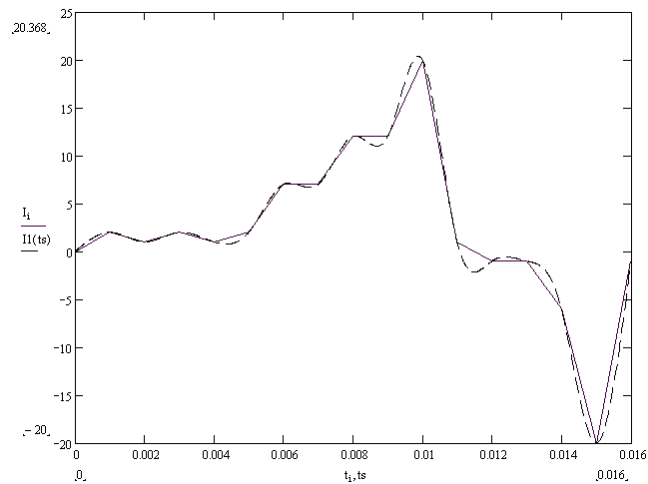


Рисунок 13 - Графики функций тока, полученные в виде линейной и кубической сплайн-интерполяции с приближением к прямой линии в граничных точках

Среднеквадратичные отклонения функций тока на анализируемом интервале функции тока (см. рисунок 12), описанной кубическими сплайнами с приближением в точках склейки соответственно линейной функцией (рисунок 13), параболой (рисунок 14) и кубической функцией (рисунок 15), снятые для 160 промежуточных точек составили [9]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (I_j - i(t))^2}{n}}, \quad (2)$$

$$\sigma_1 = 1.015, \quad \sigma_2 = 1.255, \quad \sigma_3 = 1.552$$

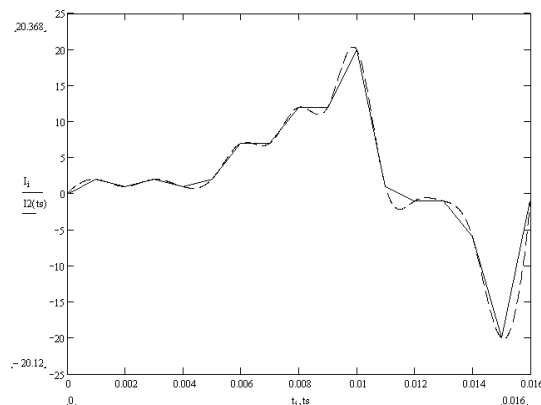


Рисунок 14 - Графики функций тока, полученные в виде линейной и кубической сплайн-интерполяции с приближением к параболе в граничных точках

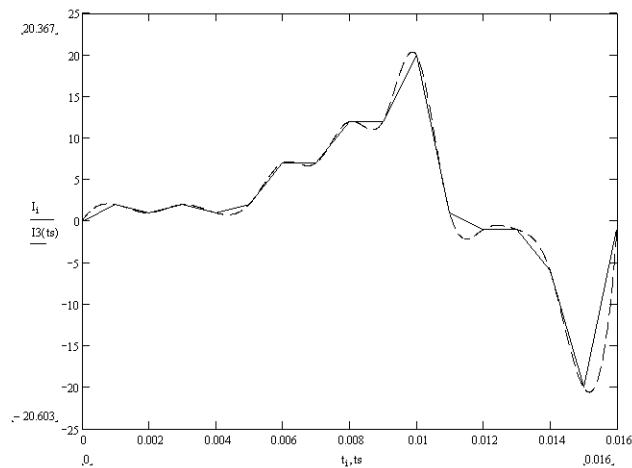


Рисунок 15 - Графики функций тока, полученные в виде линейной и кубической сплайн-интерполяции с приближением к кубической функции в граничных точках

Наименьшая погрешность аналитического описания составила при использовании метода кубической сплайн-интерполяции с приближением к прямой линии в граничных точках (метод Хироши Акимы).

В качестве еще одного доказательства проведем сплайн-интерполяцию осциллограммы напряжения контактной сети, полученной штатным терминалом МРЗ на временном интервале 50 мс (см. рисунок 16).

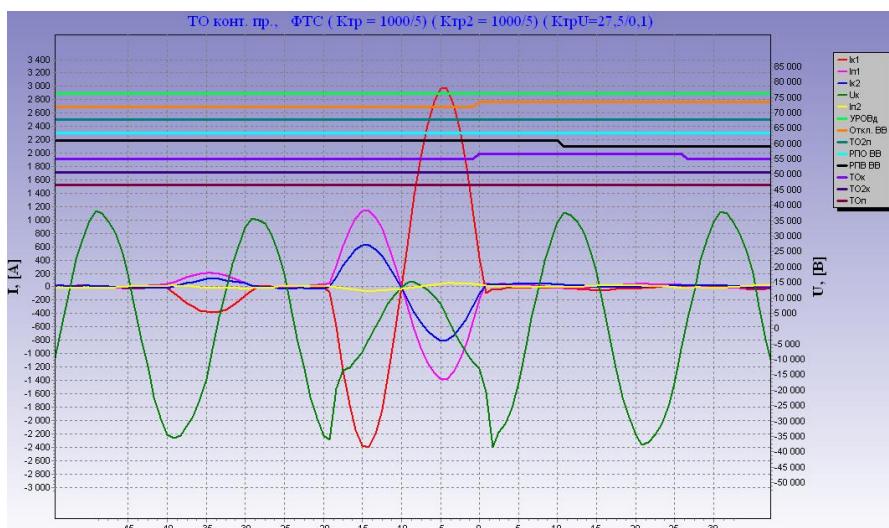


Рисунок 16 - Осциллограммы тока и напряжения, полученные штатным терминалом МРЗ

Результаты сплайн-интерполяции различными способами склейки многочленов представлены на рисунках 17-19.

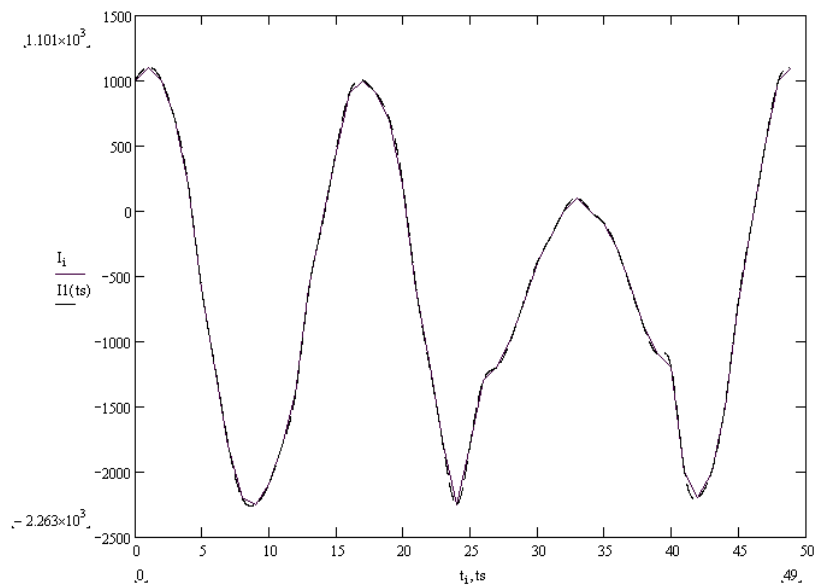


Рисунок 17 - Графики функций напряжения, полученные в виде линейной и кубической сплайн-интерполяции с приближением к прямой линии в граничных точках

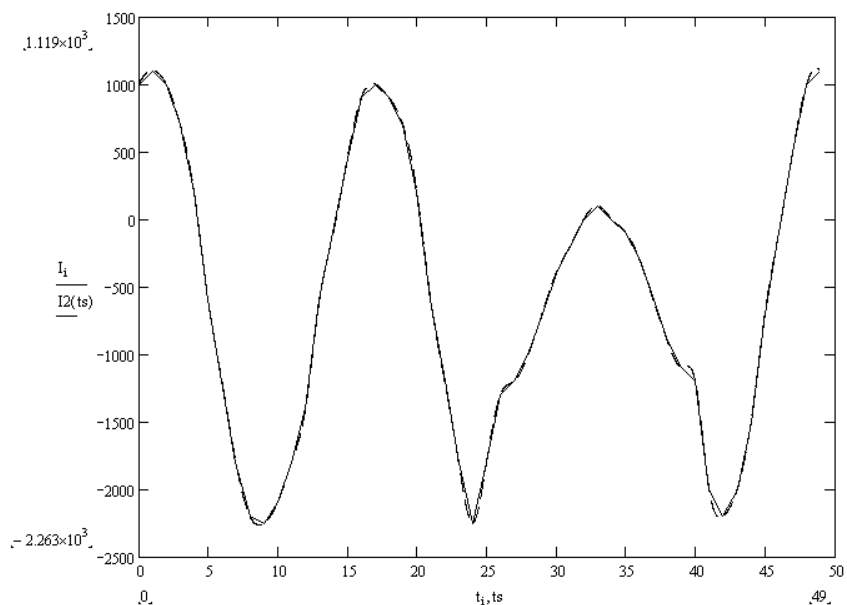


Рисунок 18 - Графики функций напряжения, полученные в виде линейной и кубической сплайн-интерполяции с приближением к параболе в граничных точках

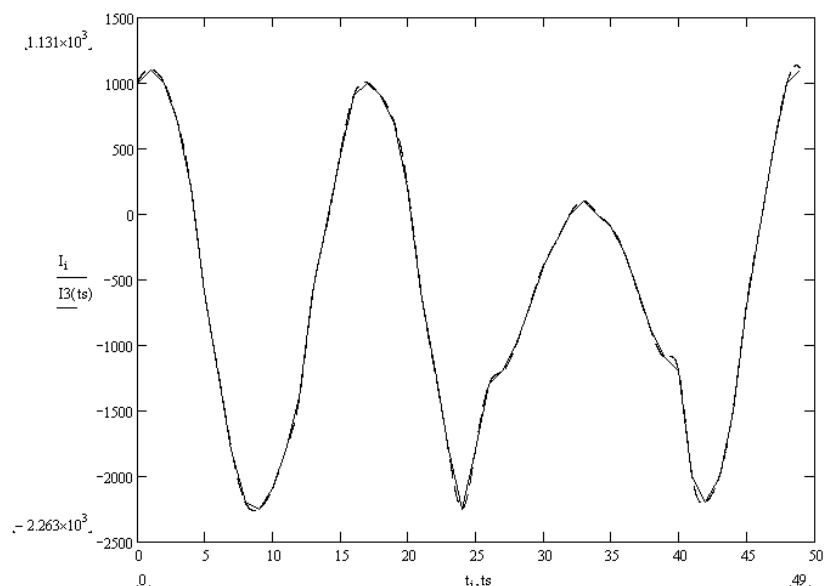


Рисунок 19 - Графики функций тока, полученные в виде линейной и кубической сплайн-интерполяции с приближением к кубической функции в граничных точках

Значения среднеквадратичных отклонений функции напряжения, определенные по 5000 промежуточным точкам с приближением в точках склейки многочленов линейной, параболической и кубической функцией, соответственно составили:

$$\sigma_1 = 24.664, \quad \sigma_2 = 41.957, \quad \sigma_3 = 56.282$$

Наименьшая погрешность аналитического описания составила при использовании метода кубической сплайн-интерполяции с приближением к прямой линии в граничных точках (метод Хироши Акимы).

Необходимо отметить, что использование метода кубической сплайн-интерполяции с приближением к прямой линии в граничных точках для аналитического представления сигналов тока и напряжения в устройствах релейной защиты позволит не только повысить точность представления данных. Данный метод отличается от других способов склейки меньшим числом вычислений, и, следовательно, большим быстродействием.

Аналитически метод кубической сплайн-интерполяции контролируемых функций тока и напряжения с приближением к прямой линии в граничных точках (метод Хироши Акимы) реализуется следующим образом.

Сплайны Акима (А-сплайн) представляет собой простейший вид кубического сплайна, описываемого следующим выражением:

$$y = Ax^3 + Bx^2 + Cx + D \quad (3)$$

Коэффициенты полинома А, В, С, D определяются следующими условиями [56, 57]:

$$\begin{cases} y_i = Ax_i^3 + Bx_i^2 + Cx_i + D \\ y_{i+1} = Ax_{i+1}^3 + Bx_{i+1}^2 + Cx_{i+1} + D \\ 3Ax_i^2 + 2Bx_i + C = \frac{1}{d_{i-1} + d_i} \cdot \left(\frac{(y_i - y_{i-1})d_i}{d_{i-1}} + \frac{(y_{i+1} - y_i)d_{i-1}}{d_i} \right) \\ 3Ax_{i+1}^2 + 2Bx_{i+1} + C = \frac{1}{d_i + d_{i+1}} \cdot \left(\frac{(y_{i+1} - y_i)d_{i+1}}{d_i} + \frac{(y_{i+2} - y_{i+1})d_i}{d_{i+1}} \right) \end{cases} \quad (4)$$

где $d_{i-1} = x_i - x_{i-1}$, $d_i = x_{i+1} - x_i$, $d_{i+1} = x_{i+2} - x_{i+1}$

Решение системы уравнений (4) направлено на поиск коэффициентов полинома третьей степени, построенного по двум смежным измеренным значениям контролируемых функций (x_i, y_i) и (x_{i+1}, y_{i+1}) .

Первые два уравнения системы представляют значения функции в двух смежных точках x_i, x_{i+1} . Третье уравнение представляет собой склейку искомого полинома на отрезке $[x_i, x_{i+1}]$ с ранее найденным полиномом на отрезке $[x_{i-1}, x_i]$, путем приравнивания первой производной искомого полинома в точке (x_i, y_i) с тангенсом угла α_{i-1} , образованном катетами $[y_{i+1}, y_{i-1}]$ и $[x_{i+1}, x_{i-1}]$ (рисунок 20).

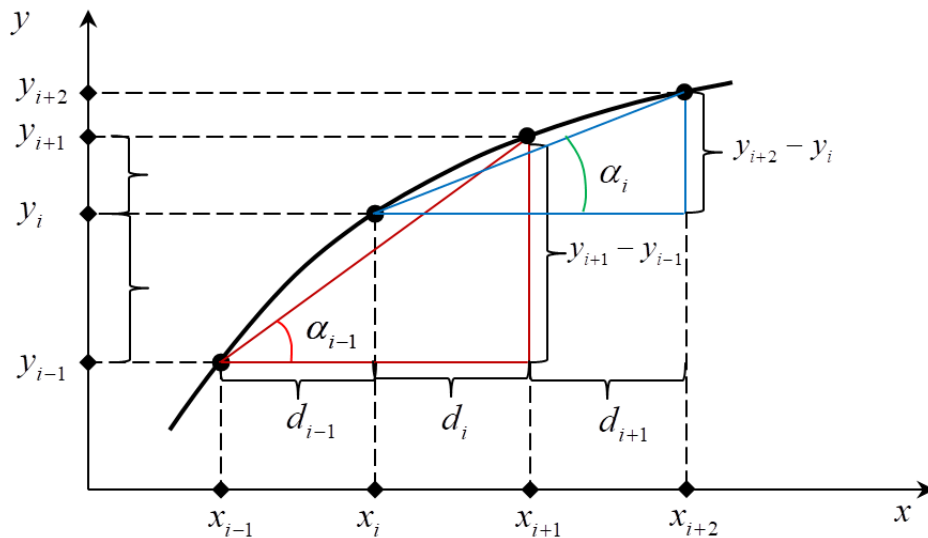


Рисунок 20 - Склейка полиномов в сплайнах Акима

При равенстве шага измерения $d_{i-1} = d_i = d_{i+1}$ третье уравнение системы (4) принимает вид:

$$3Ax_i^2 + 2Bx_i + C = \frac{1}{2d} \cdot (y_i - y_{i-1} + y_{i+1} - y_i) = \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{2d} \quad (5)$$

Четвертое уравнение представляет собой склейку искомого полинома на отрезке $[x_i, x_{i+1}]$ со следующим полиномом на отрезке $[x_{i+1}, x_{i+2}]$, путем приравнивания первой производной искомого полинома в точке (x_{i+1}, y_{i+1}) с тангенсом угла α_i , образованном катетами $[y_{i+2}, y_i]$ и $[x_{i+2}, x_i]$ (рисунок 20).

При равенстве шага измерения $d_{i-1} = d_i = d_{i+1}$ четвертое уравнение системы (4) принимает вид:

$$3Ax_{i+1}^2 + 2Bx_{i+1} + C = \frac{1}{2d} \cdot (y_{i+1} - y_i + y_{i+2} - y_{i+1}) = \frac{y_{i+2} - y_i}{2d} \quad (6)$$

Таким образом, склейка полиномов на соседних частных отрезках осуществляется с приближением к прямой линии в граничных точках.

В момент проведения i -го измерения для нахождения коэффициентов полинома на частном отрезке $[x_i, x_{i+1}]$ необходима информация еще о двух точках, (x_{i+1}, y_{i+1}) и (x_{i+2}, y_{i+2}) , не считая предыдущего измерения (x_{i-1}, y_{i-1}) . Исходя из этого методика on-line визуализации контролируемых АП МРЗ электрических параметров будет заключаться в следующем:

1. Производится измерение четырех дискретных значений контролируемого сигнала тока или напряжения $(x_{i-1}, y_{i-1}), (x_i, y_i), (x_{i+1}, y_{i+1})$ и (x_{i+2}, y_{i+2})

2. По результатам четырех измерений $(x_{i-1}, y_{i-1}), (x_i, y_i), (x_{i+1}, y_{i+1})$ и (x_{i+2}, y_{i+2}) формируется основная матрица [54, 55]:

$$A = \begin{bmatrix} x_i^3 & x_i^2 & x_i & 1 \\ x_{i+1}^3 & x_{i+1}^2 & x_{i+1} & 1 \\ 3x_i^2 & 2x_i & 1 & 0 \\ 3x_{i+1}^2 & 2x_{i+1} & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

3. Формируется матрица свободных членов:

$$B = \begin{bmatrix} y_i \\ y_{i+1} \\ \frac{1}{x_{i+1} - x_{i-1}} \cdot \left(\frac{(y_i - y_{i-1})(x_{i+1} - x_i)}{x_i - x_{i-1}} + \frac{(y_{i+1} - y_i)(x_i - x_{i-1})}{x_{i+1} - x_i} \right) \\ \frac{1}{x_{i+2} - x_i} \cdot \left(\frac{(y_{i+1} - y_i)(x_{i+2} - x_{i+1})}{x_{i+1} - x_i} + \frac{(y_{i+2} - y_{i+1})(x_{i+1} - x_i)}{x_{i+2} - x_{i+1}} \right) \end{bmatrix} \quad (8)$$

4. Формируется матрица неизвестных:

$$X = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} \quad (9)$$

5. Вычисление значений коэффициентов a, b, c, d полинома 3-й степени на отрезке $[x_i, x_{i+1}]$ путем решения системы линейных алгебраических уравнений матричным методом [56, 57]:

$$X = A^{-1} \cdot B \quad (10)$$

где A^{-1} - обратная матрица для матрицы A .

6. Запись значений коэффициентов a, b, c, d в память ПЭВМ дежурного ТП.
7. Проведение следующего измерения (x_{i+3}, y_{i+3}) .
8. Вычисление по результатам измерений $(x_i, y_i), (x_{i+1}, y_{i+1}), (x_{i+2}, y_{i+2})$ и (x_{i+3}, y_{i+3}) коэффициентов полинома на отрезке $[x_{i+1}, x_{i+2}]$ и т.д. (рисунок 21).

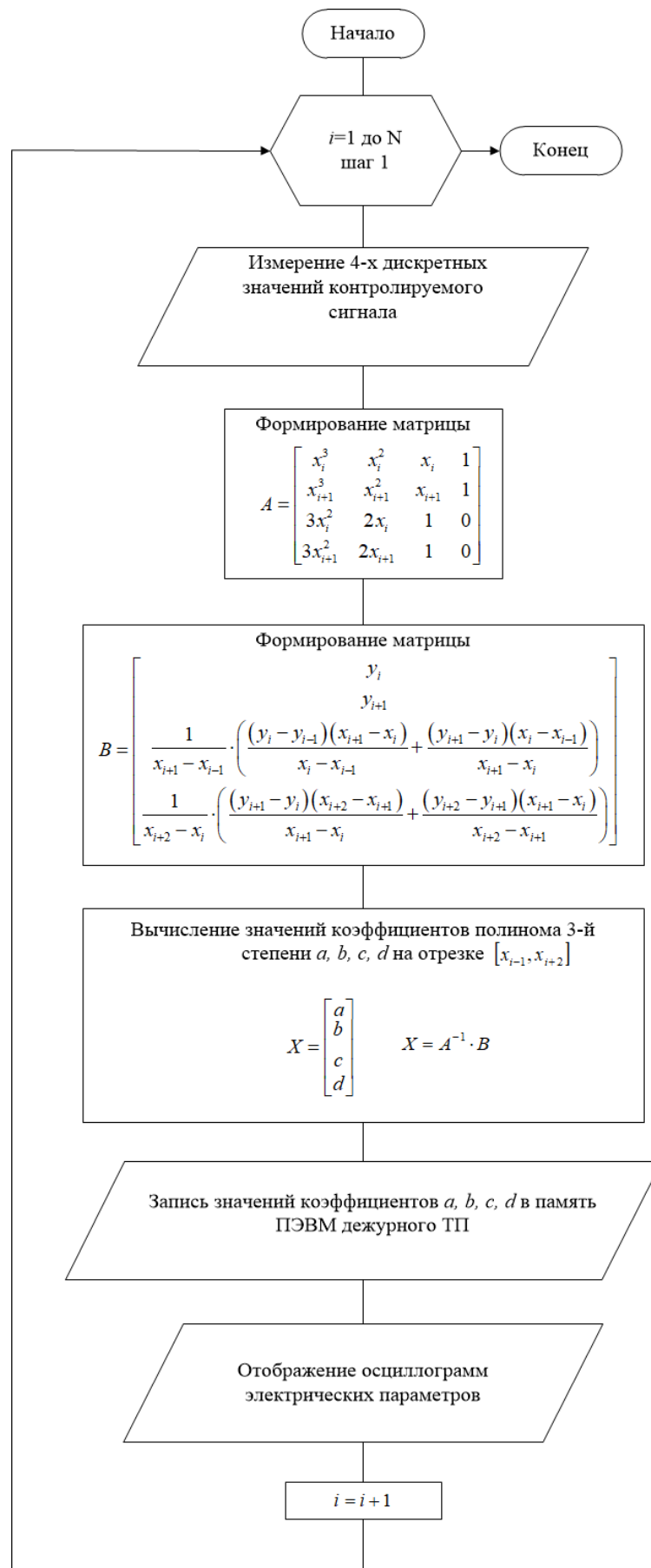


Рисунок 21 – Алгоритм непрерывного мониторинга со сжатием сплайн-интерполяцией контролируемых МРЗ электрических параметров

Преимуществом данного подхода является нахождения коэффициентов полинома только на одном частном отрезке по ранее измеренным значениям без необходимости пересчета коэффициентов после последующих измерений.

В качестве примера практической реализации предложенного подхода рассмотрим процесс интерполяции осциллограммы напряжения ФКС, снятой на ТП Бурятская Забайкальской железной дороги, на временном интервале от 80 до 200 мс (рисунок 22). Снятие дискретных значений функции напряжения осуществлялось с постоянным шагом 5 мс.

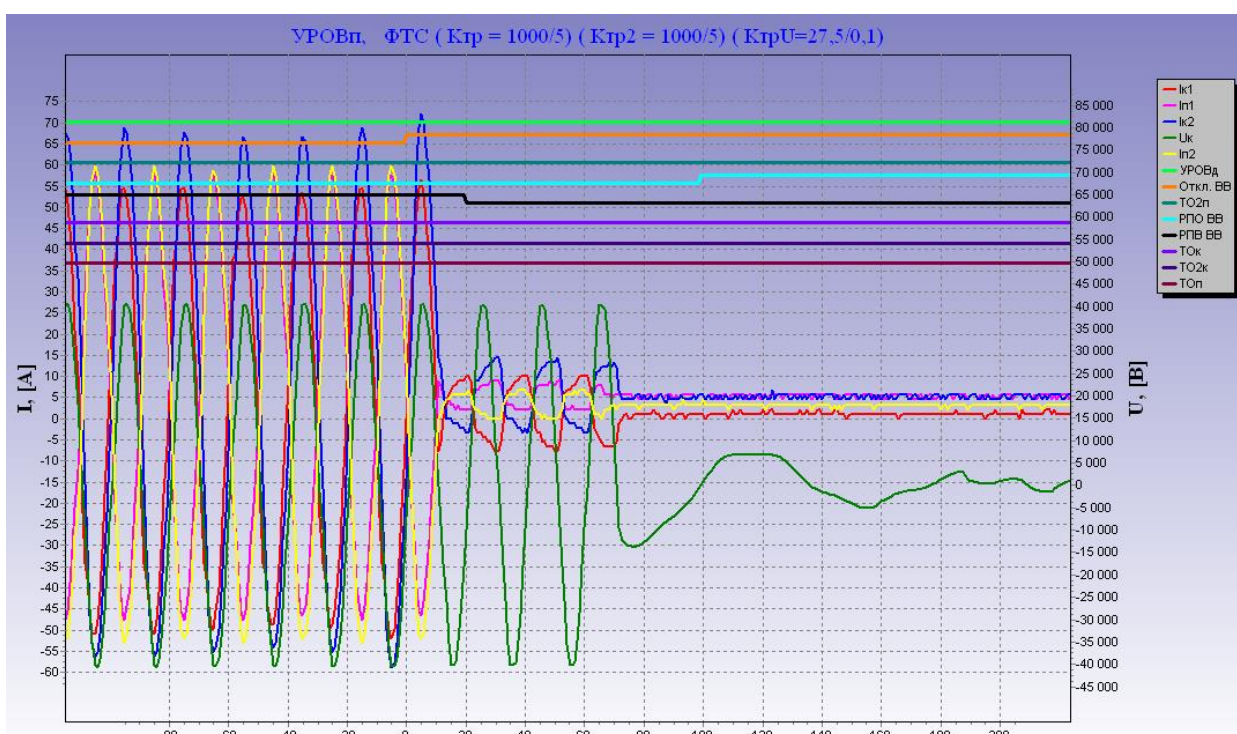


Рисунок 22 - Осциллограммы аварийного режима, снятые устройствами релейной защиты на ТП Бурятская

На рисунке 23 представлен график функции напряжения на временном интервале от 80 до 200 мс с одновременным наложением найденных полиномов третьей степени по методу Акимы на отдельных частных отрезках. На рисунке 24 представлен тот же график, масштабированный на временном интервале от 80 до 110 мс. Анализ графиков показывает высокую точность интерполирования исходной функции с помощью сплайнов Акимы при малом объеме вычислений и

подтверждает применимость данного метода для аналитического представления функций тока и напряжения в современных устройствах релейной защиты.

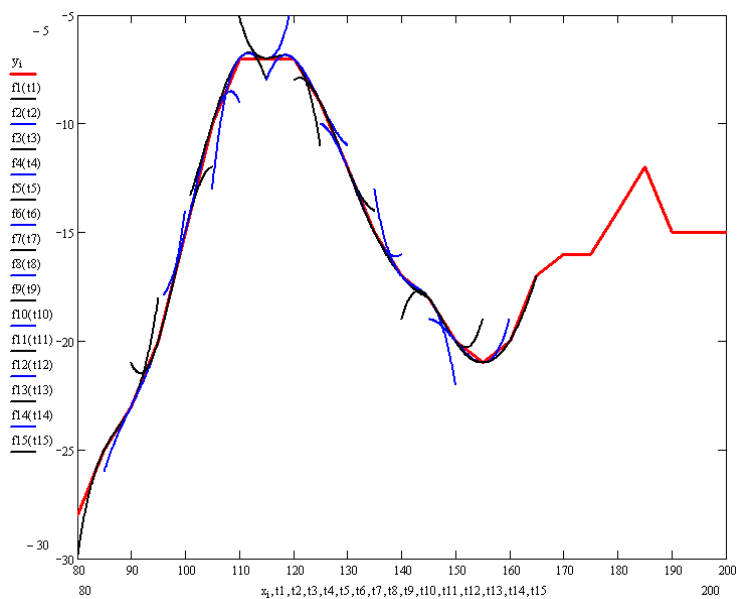


Рисунок 23 - График функции напряжения с наложением полиномов третьей степени по методу Акимы на отдельных частных отрезках

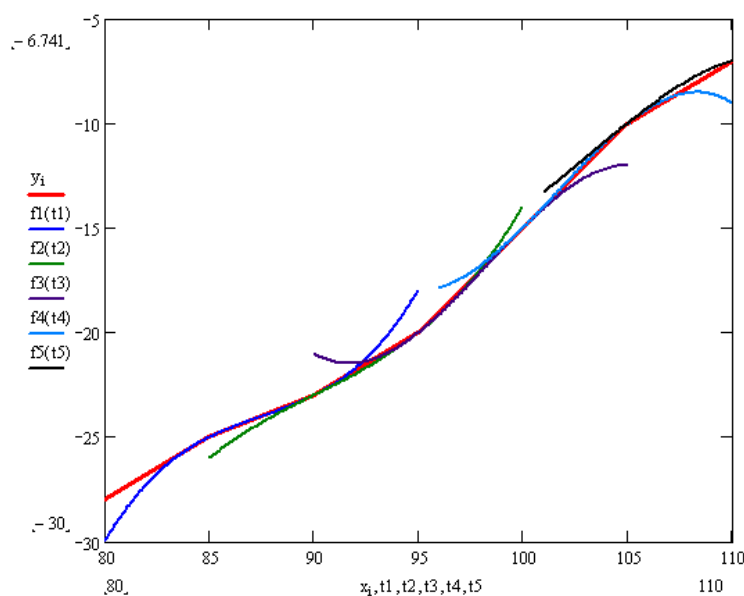


Рисунок 24 - Масштабированный график функции напряжения с наложением полиномов третьей степени по методу Акимы на интервале от 80 до 110 мс

2.2 Методика фильтрации и выделения первой гармоники тока и напряжения на основе фазовой автоподстройки частоты

Контролируемые сигналы тока и напряжения в системе тягового электроснабжения зачастую не являются синусоидальными сигналами и содержат помимо полезного сигнала помехи. В связи с этим входным каскадом современных устройств МРЗ неизменно являются цифровые фильтры (ЦФ).

Назначение цифрового фильтра – изолировать полезный сигнал (обычно основной) и максимально подавить помехи. Как правило, мешающие сигналы включают: гармоники, кратные основной частоте и дополнительные составляющие [60-62].

Анализ работы цифровых фильтров показывает, что частота дискретизации входного сигнала увеличивается в течение периода промышленных частот, несмотря на постоянные усовершенствования, связанные с реализацией все более сложных алгоритмов обработки контролируемых сигналов, и это лишь незначительно влияет на качество выделения основной гармоники. Одним из главных недостатков ЦФ является сложность их технической реализации, которая связана с построением различных алгоритмов обработки сигналов на основе метода наименьших квадратов, на основе дискретного преобразования Фурье, формирования ортогональных составляющих и других методик, в зависимости от набора компонент в помехе [63-65].

Также к существенному недостатку цифровых фильтров можно отнести завышенную погрешность определения полезных параметров сигнала при отклонении частоты управляющего сигнала от номинальной величины. На практике, при отклонении частоты сигнала, алгоритм цифрового фильтра автоматически изменит количество выборок, как в целых, так и в дробных пределах числа. Этот факт и приводит к увеличению доли ошибок (погрешностей) при нахождении необходимых значений.

Использование процесса фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) для определения временных параметров контролируемых сигналов показывает его

высокую эффективность по сравнению с применением методов цифровой фильтрации.

Основной задачей методики, основанной на теории ФАПЧ, является отслеживание фазы и частоты контролируемых сигналов при их прохождении через нулевые отметки и формирование гармонических колебаний по частоте и фазе совпадающих с их основными гармониками. Таким образом, использование ФАПЧ (как метода прямых измерений) является одним из самых точных для решения поставленной задачи.

Для демонстрации возможности использования технологии (основанной на ФАПЧ) в устройствах релейной защиты рассмотрим ее работу на примере обработанных МРЗ сигналов тока и напряжения с одного из ФКС ТП Карымская ЗабЖД (рисунок 25).

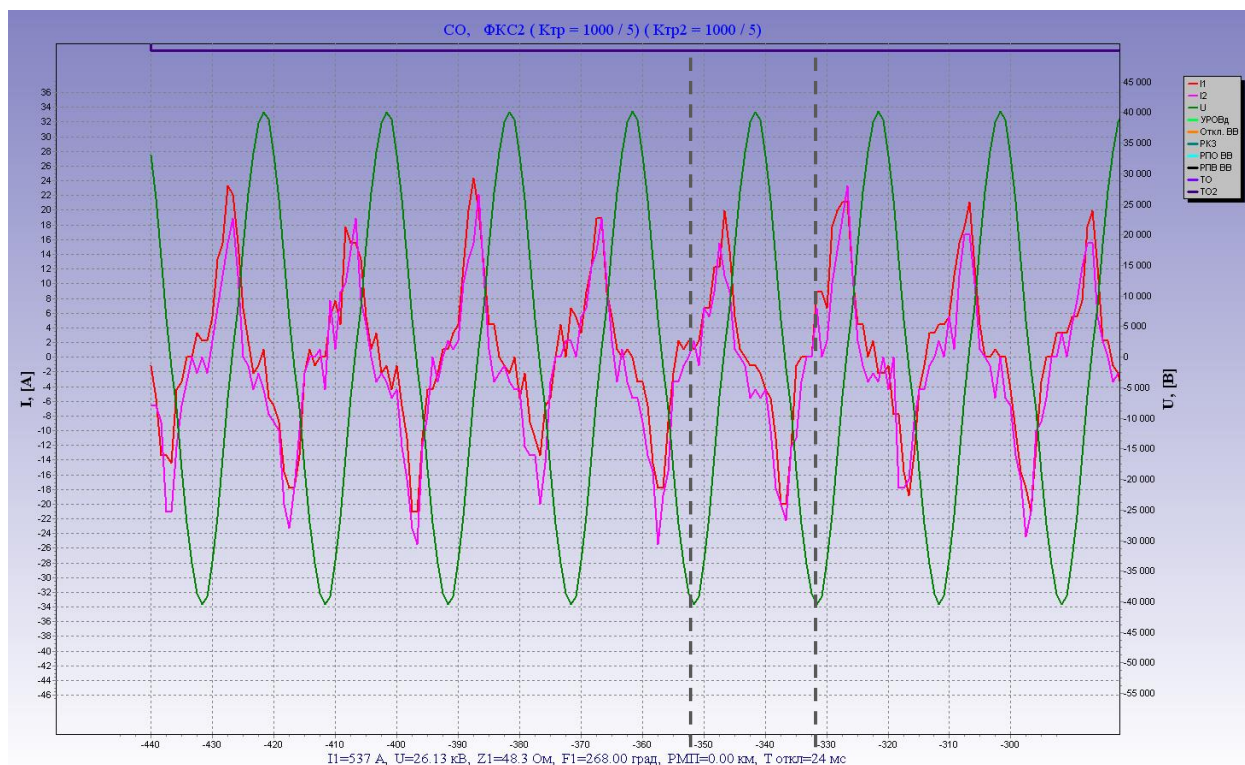


Рисунок 25 - Осциллограммы тока и напряжения с МРЗ ФКС ТП Карымская

Рассмотрим длительность тока I1 в интервале времени от 335 до 355 мс (этот интервал отмечен штриховой линией на рисунке 25). Выполним линейное

преобразование анализируемой функции тока в ПК Mathcad 13.0 (рисунок 26), а затем преобразуем ее в ряд Фурье [66-68]:

$$I_f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^9 \left[\left(\frac{1}{0.01} \cdot \int_0^{0.02} I(t) \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot n \cdot t}{0.01}\right) \cdot dt \right) \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot n \cdot t}{0.01}\right) + \left(\frac{1}{0.01} \cdot \int_0^{0.02} I(t) \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot n \cdot t}{0.01}\right) \cdot dt \right) \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot n \cdot t}{0.01}\right) \right] \quad (11)$$

где $I(t)$ - линейно интерполированная функция тока (см. рисунок 26);

$$a_0 = \frac{1}{0.01} \cdot \int_0^{0.02} I(t) \cdot dt \quad (12)$$

Графики функции (10) и первой гармонике представлены на рисунке 27.

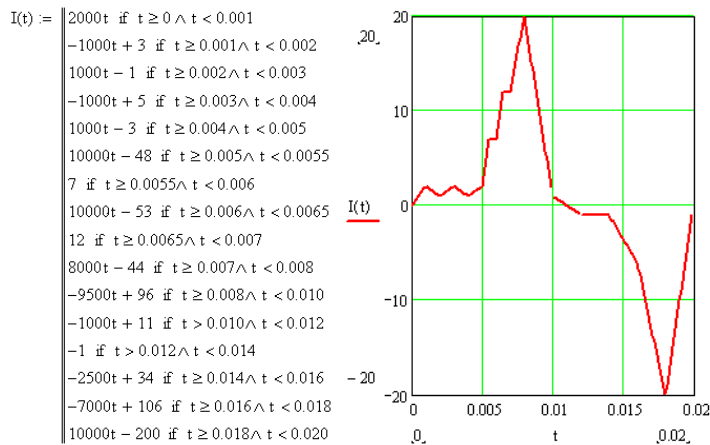


Рисунок 26 - Линейная интерполяция функции тока

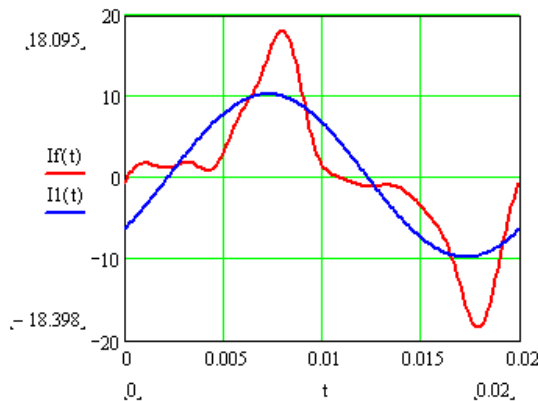


Рисунок 27 - Графики функции тока, разложенные в ряд Фурье и в виде первой гармоники

Элементные усовершенствования в терминалах РЗиА позволили учесть эффекты, возникающие при появлении гармоник неосновной частоты, однако исследованиями [69-71] доказана целесообразность учета числа гармоник не выше 7-9-й. Поэтому в выражении (11) произведен учет гармоник исследуемого сигнала тока с 1 по 9 включительно.

С помощью полученного выражения для тока (11) определим основные параметры исходного сигнала $I(t)$ за период в сравнении с параметрами сигнала $I_f(t)$, представленного в виде ряда Фурье и сигнала $I_1(t)$ первой гармоники.

Среднее значение тока за период:

$$I_{cp} = \frac{1}{0.02} \cdot \int_0^{0.02} I(t) \cdot dt = 0,275 \text{ A}, \quad I_{fcp} = \frac{1}{0.02} \cdot \int_0^{0.02} I_f(t) \cdot dt = 0.275 \text{ A},$$

$$I_{1cp} = \frac{1}{0.02} \cdot \int_0^{0.02} I_1(t) \cdot dt = 0.275 \text{ A}$$

Средневыпрямленное значение тока:

$$I_{cpe} = \frac{1}{0.02} \cdot \int_0^{0.02} |I(t)| \cdot dt = 5.825 \text{ A}, \quad I_{fcpe} = \frac{1}{0.02} \cdot \int_0^{0.02} |I_f(t)| \cdot dt = 5.825 \text{ A}$$

$$I_{1cpe} = \frac{1}{0.02} \cdot \int_0^{0.02} |I_1(t)| \cdot dt = 6.389 \text{ A}$$

Действующее значение тока:

$$I = \sqrt{\frac{1}{0.02} \cdot \int_0^{0.02} I^2(t) \cdot dt} = 8.292 \text{ A}, \quad I_f = \sqrt{\frac{1}{0.02} \cdot \int_0^{0.02} I_f^2(t) \cdot dt} = 8.272 \text{ A}$$

$$I_1 = \sqrt{\frac{1}{0.02} \cdot \int_0^{0.02} I_1^2(t) \cdot dt} = 7.099 \text{ A}$$

Анализ полученных данных показывает приемлемые отклонения параметров сигнала первой гармоники относительно исходного сигнала тока и сигнала, представленного в виде ряда Фурье.

Имитационную проверку применения ФАПЧ (с оценкой возможности выделения гармоники основной частоты исследуемого сигнала тока) проведем в программе электронного моделирования Multisim 11.0.

Воспроизведение формы исследуемого сигнала в программе Multisim 11.0 осуществим с помощью источника кусочно-линейного напряжения (см. рисунок 28).

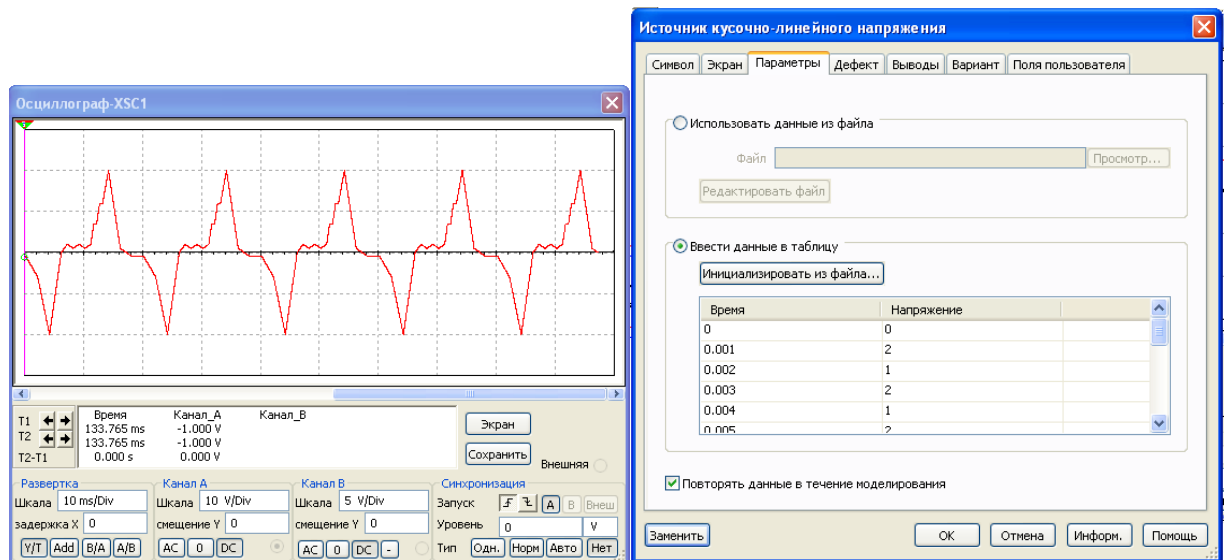


Рисунок 28 - Форма воспроизведения исследуемого сигнала в программе Multisim 11.0

Процесс реализации ФАПЧ воспроизведем в программе Multisim 11.0 (см. рисунок 29).

Опытную проверку осуществим с подачи на вход ФАПЧ исходного сигнала, синтезированного с помощью источника кусочно-линейного напряжения (рисунок 29). Осциллограммы входного и выходных сигналов приведены, соответственно, на рисунках 30, 31.

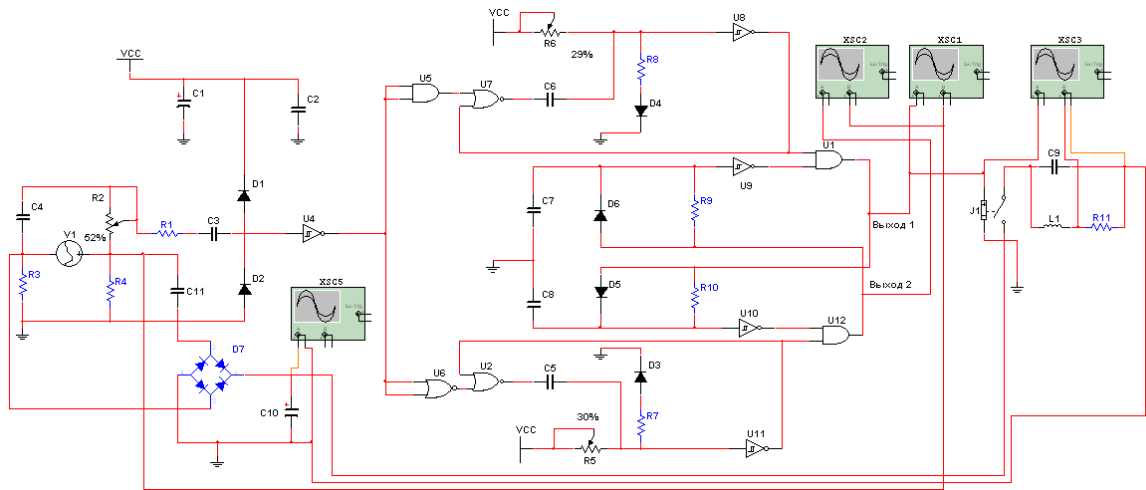


Рисунок 29 - Реализация ФАПЧ в программе Multisim 11.0

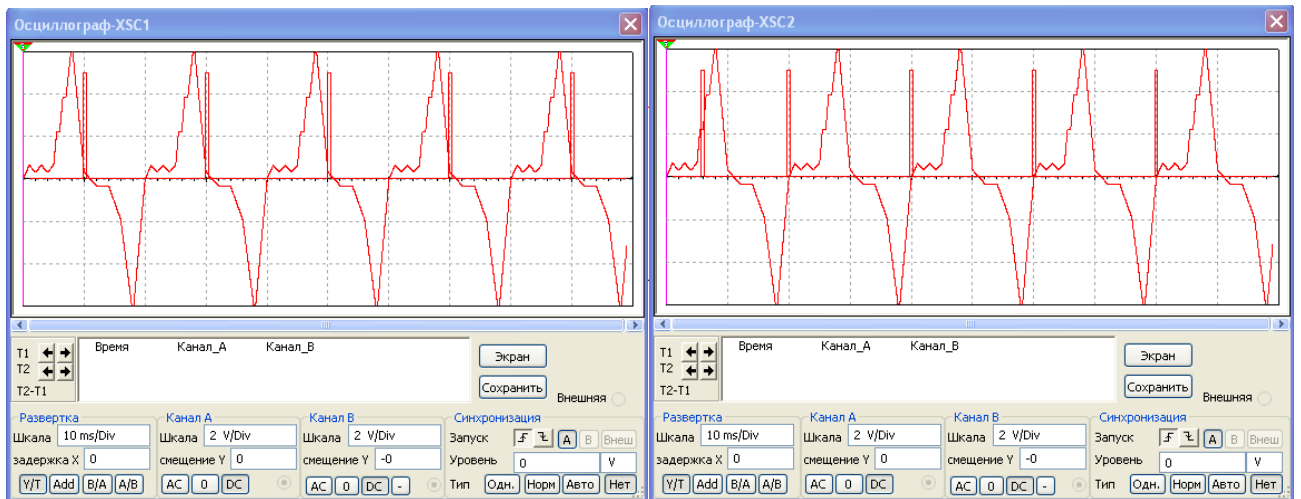


Рисунок 30 - Осциллограммы входного и выходных сигналов ФАПЧ

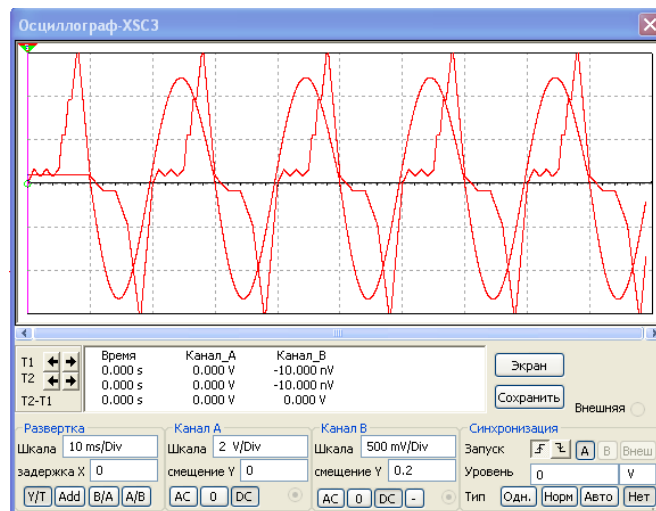


Рисунок 31 - Осциллограммы входного и выходного (первая гармоника) сигналов ФАПЧ

Анализ полученных осциллограмм показывает, что ФАПЧ точно фиксирует мгновения времени, приходящиеся на нулевые отметки входного сигнала, а также восстанавливает первую гармонику. Однако наличие в получаемом сигнале гармоник неосновной частоты приводит к погрешности фазы восстановленной первой гармоники, по сравнению с фазой первой гармоники, полученной через преобразование Фурье (см. рисунок 27). Однако, чем сильнее исходный анализируемый сигнал отклоняется от синусоидальной формы, тем большему сдвигу подвергается и фаза восстановленной первой гармоники [72]. С целью уменьшения погрешности фазы восстановленного сигнала на практике прибегают к предварительной фильтрации анализируемого сигнала. Пропустив исходный сигнал через ФНЧ, настроенный на частоту 150 Гц, удастся исключить составляющие высших гармоник и значительно повысить точность фазы восстановленной гармоники основной частоты после ФАПЧ.

Установим на входе ФАПЧ фильтр низких частот, схема которого и осциллограммы на входе и выходе представлены на рисунке 32.

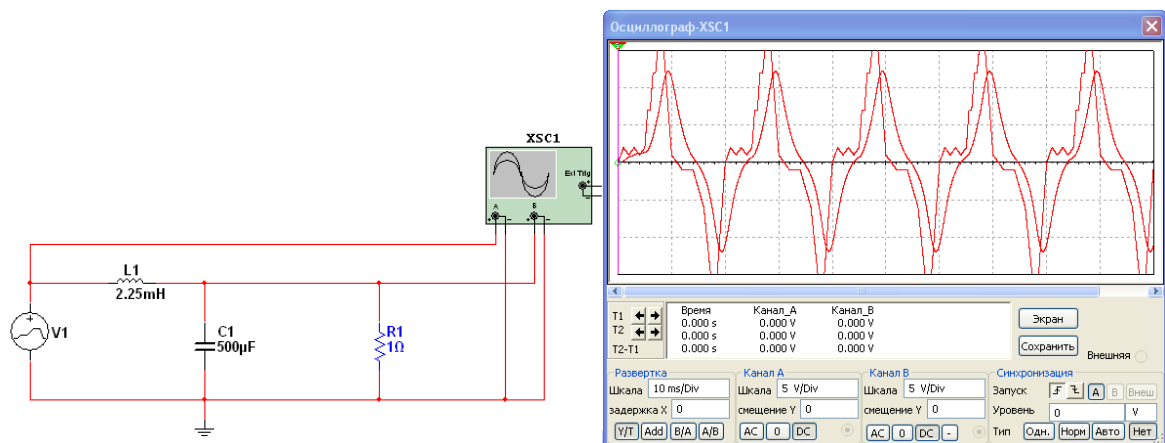


Рисунок 32 - Схема предвходного ФНЧ и осциллограммы на его входе и выходе

Подадим отфильтрованный сигнал на вход ФАПЧ. Осциллограммы входного и выходного сигнала при наличии предвходного фильтра представлены на рисунке 33.

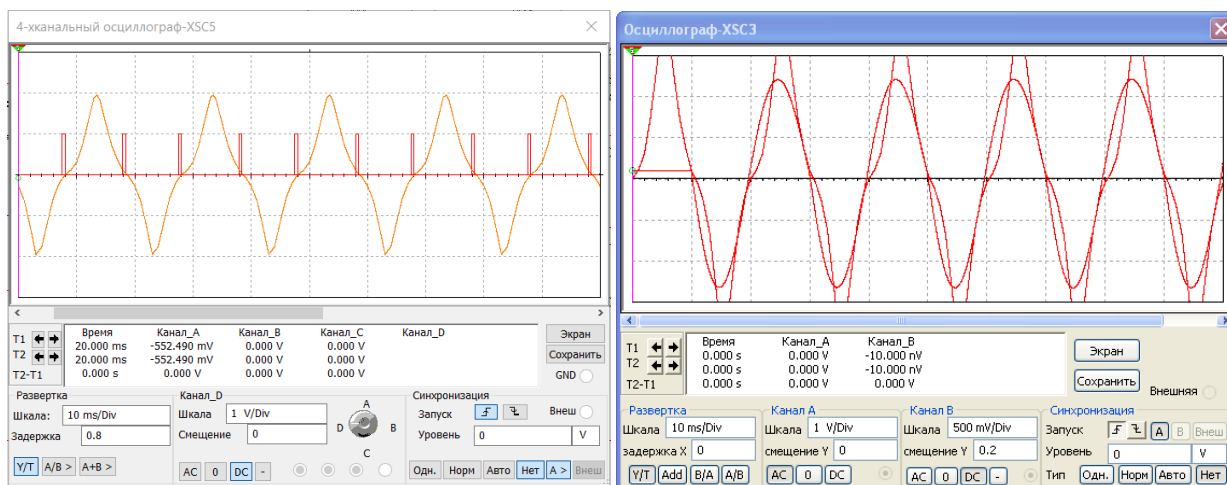


Рисунок 33 - Осциллограммы входного и выходного (первая гармоника) сигналов схемы ФАПЧ

Анализ осциллограмм показывает значительное снижение отклонения начальной фазы восстановленной первой гармоники на выходе ФАПЧ.

Следует отметить, что при восстановлении первой гармоники с помощью ФАПЧ немаловажное значение имеет не только ее начальная фаза, но и амплитуда.

С этой целью был предложен и апробирован ход восстановления гармоники основной частоты, смысл которого состоит в приложении питающего напряжения к транзисторным ключам (предварительно выпрямленного и сглаженного) сигнала, поступающего с выхода трансформатора тока или трансформатора напряжения в зависимости от величины данного контролируемого сигнала. Данный подход продемонстрирован на рисунке 29. Параллельно выходной обмотки измерительного трансформатора подключается диодный мост и сглаживающий конденсатор. Округленно напряжение на выходе фильтрующей емкости рассчитывается по формуле [73, 75]:

$$U_{вых} = 1.41 \cdot U - 2 \cdot U_{пр} \quad (13)$$

где U - действующее напряжение на вторичной обмотке ИТ;

U_{np} - прямое падение напряжение на одном диоде моста (берется из справочника [75], или округленно 1 В).

Итоговый вариант алгоритмов фильтрации и выделения первой гармоники тока и напряжения на основе фазовой автоподстройки частоты представлен соответственно на рисунке 34.

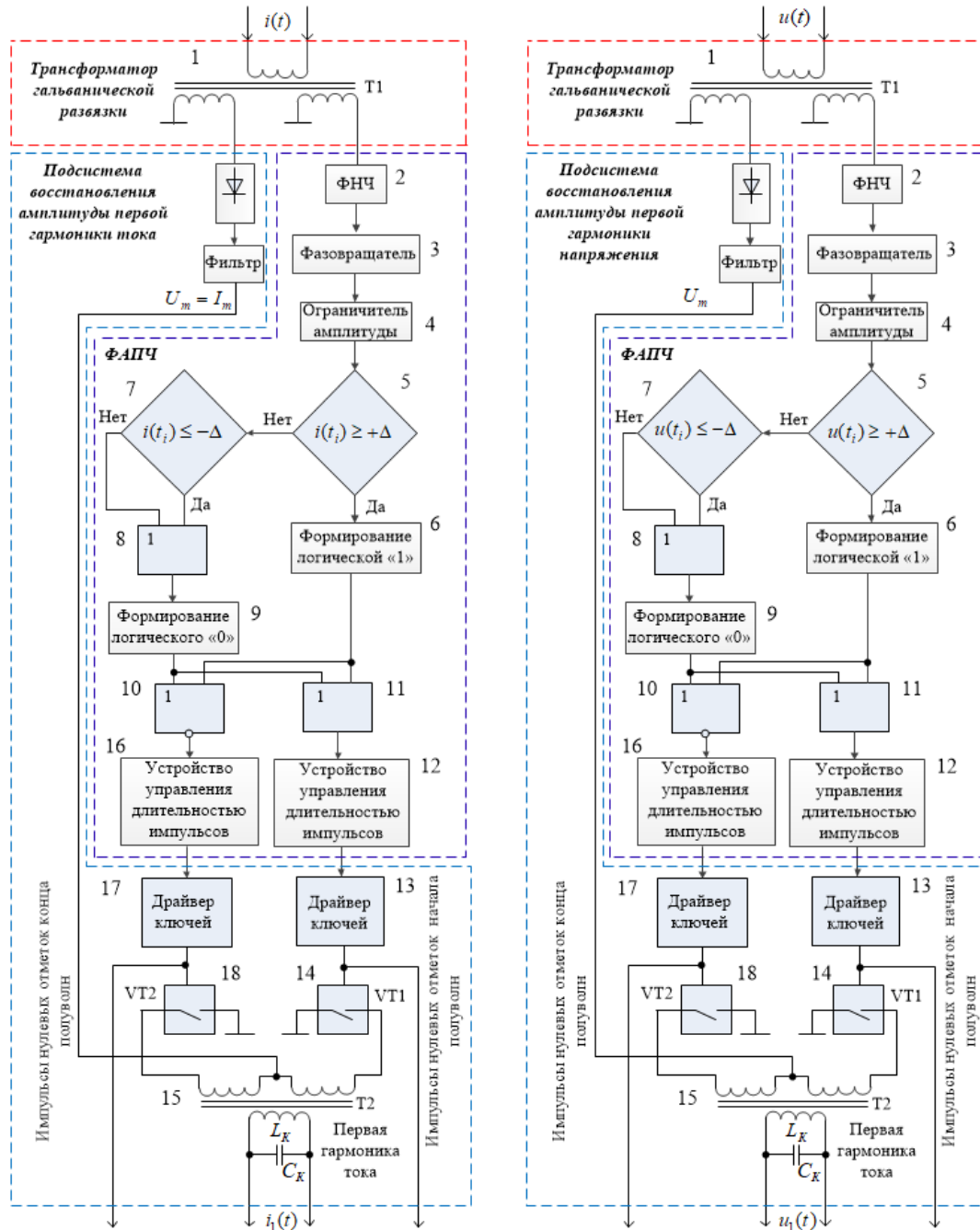


Рисунок 34 – Алгоритмы фильтрации и выделения первой гармоники тока и напряжения на основе фазовой автоподстройки частоты

Принцип фильтрации и выделения первой гармоники тока и напряжения на основе фазовой автоподстройки частоты по току и напряжению идентичен и заключается в следующем:

1. В блоке 1 осуществляется гальваническая развязка и предварительное масштабирование контролируемого сигнала тока (напряжения).

2. ФНЧ 2 с рабочей частотой 150 Гц, исключает составляющие высших гармоник и значительно повышает точность фазы восстановленной первой гармоники.

3. Фазовращатель 3 обеспечивает соответствующий сдвиг фазы сигнала при изменении частоты и неизменных параметрах схемы ФАПЧ.

4. Ограничение амплитуды контролируемого сигнала реализуется посредством блока 4.

5. При сдвиге сигнала с фазовращателя от нулевой отметки в область положительной полуволны контролируемого сигнала сигнал на выходе формирователя 6 скачком изменяется с логического уровня «0» на логическую «1».

6. При возвращении сигнала с фазовращателя из области положительных значений к нулевой отметке и далее переходе в отрицательную область отрицательных значений, сигнал на выходе формирователя 9 скачком изменяется с логического уровня «1» на «0».

На выходе повторителей 11 и 10 вместо исходной двухполярной по отношению к "земле" синусоиды входного сигнала с размахом амплитуд до 110 вольт получают однополярные меандры с шкалой амплитуд в диапазоне от 0,3 до 4,7 В.

7. Однополярные импульсы с выходов повторителя и инвертора поступают на входы устройств подстройки длительности 12 и 16. Данные устройства обладают свойством нечувствительности к искажению сигнала, фиксируемого на их входах в период действия полезного сигнала.

8. Управляющие импульсы с выходов устройств подстройки 12 и 16 подаются на драйверы управления силовыми ключами VT1 и VT2. Драйвера,

входящие в подсистему восстановления амплитуды первой гармоники тока (напряжения), усиливают управляющие сигналы и возникает программный момент времени между управляющими логическими сигналами «1», делая невозможным протекание сквозной величины тока через силовые транзисторы. Питание силовых ключей осуществляется посредством напряжения, выпрямленного диодным мостом 19 и сглаженного фильтром 20, снимаемого с выходной обмотки трансформатора гальванической развязки 1.

9. Восстановление первой гармоники контролируемого сигнала тока (напряжения) осуществляется посредством выходной обмотки трансформатора 15, включенной в состав параллельного колебательного контура.

Таким образом, представленные алгоритмы позволяют с высокой точностью определить фазные координаты контролируемых АП МРЗ сигналов тока и напряжения в виде коротких импульсов (фиксируемых в нулевых отметках сигналов) и выделить первую гармонику этих сигналов.

2.3 Имитационная модель процесса краткосрочного прогнозирования изменения контролируемых МРЗ электрических параметров

Превышение тока значения уставки зачастую является следствием кратковременных динамических всплесков, связанных с пусковыми токами электровозов, возникающих при трогании тяжеловесных поездов с места, при переключении режимов работы двигателей электровозов, движении поезда по переломному профилю пути, и т.д. Данные режимы не являются аварийными для системы тягового электроснабжения, однако приводят к аварийным срабатываниям устройств МРЗ, в том числе и к срабатываниям по неустановленным причинам.

Наличие непрерывных аналитических функций тока и напряжения позволяет в on-line режиме производить прогнозную оценку закона изменения тока, протекающего в контактной сети и осуществить надежную отстройку устройств МРЗ от пусковых и переходных процессов в контактной сети.

В настоящий момент известно большое число методов прогнозирования [76-81]. Распространенными методами прогнозирования являются параметрические методы регрессионной аппроксимации, динамические модели авторегрессии (скользящего среднего), методы импульсных функций, нелинейные модели Вольтерра, искусственные нейронные сети. Решение задач прогнозирования может осуществляться как для дискретных значений контролируемых функций, так и для контролируемых функций непрерывных во времени.

Параметрическое регрессионное прогнозирование предполагает нахождение функции регрессии по системе линейно-независимых функций. Функция регрессии находится методом наименьших квадратов по известным на текущем интервале данным. Однако, горизонт предсказания полученной таким методом оценки невелик и на практике используется редко. Помимо этого, найденная оценка очень чувствительна к степени функции.

Динамические методы прогнозирования сводятся к построению динамической модели, например, авторегрессии или авторегрессии–скользящего среднего. При этом линейные модели отличаются невысокой точностью, а нелинейные (функциональные ряды Вольтерра), хотя и обеспечивают большее соответствие прогнозируемых процессов, крайне сложны для применения в on-line режиме.

Нейросетевые методы прогнозирования зависят от точности представления динамики прогнозируемого процесса весовыми коэффициентами сети в отсутствие обратных связей. Отсутствие обратных связей зачастую компенсируются алгоритмами обучения на основе метода обратного распространения ошибки. При этом существенно возрастает число вычислительных операций. В целом, нейросетевые методы показывают хорошие результаты при прогнозировании тех или иных процессов, но, в силу их математической сложности, не используются в on-line режиме.

Особенности режимов работы устройств системы тягового электроснабжения и МРЗ требуют проведения отдельного исследования.

Для электроподвижного состава, получающего питание от ТП переменного тока посредством ФКС, присуще «плавание» уровня токопотребления при прохождении разных элементов пути (спусков, подъемов) и перегруппировке ТД. В каждый момент времени при этом возможно изменение схемы питания и секционирования контактной сети [82-84].

Известно, что при коротком замыкании электрическая дуга с током, превышающим 2000 А способна пережечь контактный провод через 0,15...0,17 с и в тоже время не более 0,15 - для тока величиной 3000 А [83]. Ориентируясь на эти временные диапазоны, ФКС ТП оснащаются устройствами РЗиА, работающими в паре с высоковольтными выключателями, что позволяет обеспечить аварийное отключение в диапазоне 0,12...0,14 с. [85-87].

Полное время отключения медленнодействующих масляных выключателей на ФКС не превышает 0,08 с. Таким образом, время на анализ текущей ситуации и выработку команды устройством релейной защиты на отключение выключателя не превышает 0,04 с., что составляет 2 периода тока промышленной частоты. Следует отметить, что найденное время для срабатывания устройств МРЗ определено для значения тока в 3000 А, протекающего в контактной сети с масляным выключателем, расположенным на ФКС. Период времени на оценку текущей ситуации может быть увеличен за счет уменьшения времени срабатывания при использовании вакуумных выключателей. Кроме того, время, предшествующее моменту аварийной ситуации (в зависимости от аварийной ситуации), может использоваться для прогноза вероятности возникновения идентичной ситуации. Аналитическое представление функций тока и напряжения позволяют производить прогнозную оценку на различных промежутках времени.

Точность прогноза независимо от применяемых методов зависит от исходных данных, найденных и проанализированных за предшествующий период времени. Анализ многочисленных аварийных осциллограмм, снятых на ФКС ТП ЗабЖД, показывает, что изменение тока и напряжения происходит достаточно быстро (в течение четверти периода), несмотря на предшествующий статичный характер изменения кривых (рисунок 16).

Исходя из этого, становится очевидным, что в устройствах МРЗ возможна только краткосрочная прогнозная оценка изменения электрических параметров на основе анализа одного или двух предшествующих периодов, и главным образом на основе анализа динамики крайних измеренных дискретных значений прогнозируемых функций.

В штатном режиме работы устройств МРЗ основные контролируемые электрические параметры изменяются по синусоидальному закону.

Поскольку краткосрочное прогнозирование изменения контролируемых МРЗ электрических параметров предполагается проводить в онлайн режиме, предлагается экстраполировать контролируемые сигналы 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 экспериментальным дискретным значениям, измеренным ранее. По сути, задача заключается в нахождении значений амплитуд I_m , U_m , частоты ω , начальных фаз φ_i , φ_u синусоидальных функций тока и напряжения в последующие временные интервалы по их дискретным значениям, измеренным в текущий момент времени.

Поскольку функция синуса не является линейной относительно своих параметров, то решение поставленной задачи методом наименьших квадратов невозможно [88-92]. В работах [88-89] предлагается альтернативный метод нахождения неизвестных параметров. Данный метод предполагает, что все точки находятся на искомой кривой:

$$y_i = a \cdot \sin(b \cdot x_i + c) \quad (14)$$

Анализ значений трех соседних точек y_{k-1}, y_k, y_{k+1} позволяет вывести выражение для величины b , определяющей период колебаний:

$$\begin{aligned} y_{k+1} + y_{k-1} &= a \cdot \sin(b \cdot x_{k+1} + c) + a \cdot \sin(b \cdot x_{k-1} + c) = 2 \cdot a \cdot \sin \frac{b \cdot (x_{k+1} + x_{k-1}) + 2 \cdot c}{2} \cdot \cos \frac{b \cdot (x_{k+1} - x_{k-1})}{2} = \\ &= 2 \cdot a \cdot \sin(b \cdot x_k + c) \cdot \cos \frac{b \cdot 2\delta}{2} = 2 \cdot y_k \cdot \cos(b \cdot \delta) \end{aligned}$$

Отсюда получаем, что

$$\cos b \cdot \delta = \frac{y_{k-1} + y_{k+1}}{2 \cdot y_k} \quad (15)$$

При усреднении выражения (14) по всем соседним тройкам точек, получим выражение:

$$b = \frac{1}{\delta} \cdot \arccos \left(\frac{1}{n-2} \cdot \sum_{k=2}^{n-1} \frac{y_{k-1} + y_{k+1}}{2 \cdot y_k + \Delta} \right) \quad (16)$$

Для исключения недопустимой операции деления на ноль в выражении (15) знаменатель записан в виде суммы $2 \cdot y_k + \Delta$. Небольшое по величине число Δ не окажет сколь значимого отклонения параметра b .

Для определения параметра c запишем выражение (14) для индексов $i = k$ и $i = k + 1$:

$$y_k = a \cdot \sin(b \cdot x_k + c), \quad y_{k+1} = a \cdot \sin(b \cdot x_{k+1} + c)$$

Исключив из полученной системы параметр a , получим соотношение:

$$a = \frac{y_k}{\sin(b \cdot x_k + c)}, \quad y_{k+1} = \frac{y_k}{\sin(b \cdot x_k + c)} \cdot \sin(b \cdot x_{k+1} + c)$$

$$y_{k+1} \cdot \sin(b \cdot x_k + c) = y_k \cdot \sin(b \cdot x_{k+1} + c)$$

При применении формулы для синуса суммы $\sin(\alpha + \beta) = \sin(\alpha) \cdot \cos(\beta) + \sin(\beta) \cdot \cos(\alpha)$, получаем равенство:

$$y_{k+1} \cdot \sin(b \cdot x_k) \cdot \cos(c) + y_{k+1} \cdot \sin(c) \cdot \cos(b \cdot x_k) = y_k \cdot \sin(b \cdot x_{k+1}) \cdot \cos(c) + y_k \cdot \sin(c) \cdot \cos(b \cdot x_{k+1}) = \\ = (y_{k+1} \cdot \sin(b \cdot x_k) - y_k \cdot \sin(b \cdot x_{k+1})) \cdot \cos(c) = (y_k \cdot \cos(b \cdot x_{k+1}) - y_{k+1} \cdot \cos(b \cdot x_k)) \cdot \sin(c)$$

Отсюда:

$$tg(c) = \frac{y_{k+1} \cdot \sin(b \cdot x_k) - y_k \cdot \sin(b \cdot x_{k+1})}{y_k \cdot \cos(b \cdot x_{k+1}) - y_{k+1} \cdot \cos(b \cdot x_k)} \quad (17)$$

Усредним этот результат по всем соседним парам точек. Получим выражение для параметра c :

$$c = arctg \left(\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{k=1}^{n-1} \frac{y_k \cdot \sin(b \cdot x_{k+1}) - y_{k+1} \cdot \sin(b \cdot x_k)}{y_{k+1} \cdot \cos(b \cdot x_k) - y_k \cdot \cos(b \cdot x_{k+1})} \right) \quad (18)$$

Для определения параметра a следует воспользоваться выражениями для функционала и частной производной, используемых при методе наименьших квадратов:

$$F(a, b, c) = \frac{1}{2} \cdot \sum_{k=1}^n (a \cdot \sin(b \cdot x_k + c) - y_k)^2 \quad (19)$$

$$\frac{\partial F}{\partial a} = \sum_{k=1}^n (a \cdot \sin(b \cdot x_k + c) - y_k) \cdot \sin(b \cdot x_k + c) = 0 \quad (20)$$

Решая выражение (20) относительно параметра a получаем:

$$a = \frac{\sum_{k=1}^n y_k \cdot \sin(b \cdot x_k + c)}{\sum_{k=1}^n \sin^2(b \cdot x_k + c)} \quad (21)$$

Недостатком выражения (21) применительно к решению поставленной задачи является необходимость предварительного вычисления параметров b и c .

В работе [89] получено еще одно выражение для определения параметра a на основе анализа значений трех соседних экспериментальных точек.

Разность ординат между первой и третьей точками определяется выражением:

$$\begin{aligned} y_{k+1} - y_{k-1} &= a \cdot \sin(b \cdot x_{k+1} + c) - a \cdot \sin(b \cdot x_{k-1} + c) = \\ &= 2 \cdot a \cdot \sin\left[\frac{(b \cdot x_{k+1} + c) - (b \cdot x_{k-1} + c)}{2}\right] \cdot \cos\left[\frac{(b \cdot x_{k+1} + c) + (b \cdot x_{k-1} + c)}{2}\right] = \\ &= 2 \cdot a \cdot \sin\left[b \cdot \frac{x_{k+1} - x_{k-1}}{2}\right] \cdot \cos\left[\frac{b \cdot (x_{k+1} + x_{k-1}) + 2 \cdot c}{2}\right] = 2 \cdot a \cdot \sin(b \cdot \delta) \cdot \cos(b \cdot x_k + c) \end{aligned} \quad (22)$$

Используем операцию «возведение в квадрат» для выражения (22):

$$(y_{k+1} - y_{k-1})^2 = 4 \cdot a^2 \cdot \sin^2(b \cdot \delta) \cdot \cos^2(b \cdot x_k + c) = 4 \cdot a^2 \cdot (1 - \cos^2(b \cdot \delta)) \cdot (1 - \sin^2(b \cdot x_k + c))$$

В полученное выражение подставим формулы (14) и (15):

$$(y_{k+1} - y_{k-1})^2 = 4 \cdot a^2 \cdot \left(1 - \frac{(y_{k+1} + y_{k-1})^2}{4 \cdot y_k^2}\right) \cdot (1 - \sin^2(b \cdot x_k + c)) = 4 \cdot \left(1 - \frac{(y_{k+1} + y_{k-1})^2}{4 \cdot y_k^2}\right) \cdot (a^2 - y_k^2)$$

Отсюда выразим значение параметра a :

$$a = \sqrt{\frac{(y_{k+1} - y_{k-1})^2}{4 - \frac{(y_{k+1} + y_{k-1})^2}{y_k^2}} + y_k^2} = \sqrt{\frac{(y_{k+1} - y_{k-1})^2}{4 \cdot y_k^2 - (y_{k+1} + y_{k-1})^2} + y_k^2} = \sqrt{\frac{y_k^2 \cdot (y_{k+1} - y_{k-1})^2}{4 \cdot y_k^2 - (y_{k+1} + y_{k-1})^2} + y_k^2} \quad (23)$$

Выражение (23) можно использовать и при усреднении по всем соседним тройкам точек:

$$a = \sqrt{\frac{1}{n-2} \cdot \sum_{k=2}^{n-1} \left(\frac{y_k^2 \cdot (y_{k+1} - y_{k-1})^2}{4 \cdot y_k^2 - (y_{k+1} + y_{k-1})^2} + y_k^2 \right)} \quad (24)$$

Выражение (24) позволяет определить амплитуду сигнала с большей точностью, однако выражение (23) оригинально тем, что позволяет всего по трем измеренным соседним значениям функции тока или напряжения (без предварительного нахождения параметров b и c) определить их амплитудные значения, являющиеся самыми значимыми параметрами при распознавании аварийной ситуации и защиты устройств тягового электроснабжения. Простота выражения (23) позволяет использовать его в on-line режиме в ходе обработки информации.

Несмотря на простоту выражения (23), значение подкоренного выражения всегда должно лежать в положительной области. Параметр a должен иметь вещественное значение.

Определим условия, при которых подкоренное выражение всегда будет принимать положительное значение:

$$\frac{y_k^2 \cdot (y_{k+1} - y_{k-1})^2}{4 \cdot y_k^2 - (y_{k+1} + y_{k-1})^2} + y_k^2 = \frac{y_k^2 \cdot (y_{k+1} - y_{k-1})^2 + 4 \cdot y_k^4 - y_k^2 \cdot (y_{k+1} + y_{k-1})^2}{4 \cdot y_k^2 - (y_{k+1} + y_{k-1})^2} = \frac{4 \cdot y_k^4}{4 \cdot y_k^2 - (y_{k+1} + y_{k-1})^2} \geq 0$$

Числитель в полученном выражении всегда принимает положительное значение. Осуществим проверку знаменателя:

$$4 \cdot y_k^2 - (y_{k+1} + y_{k-1})^2 \geq 0 \Rightarrow 4 \cdot y_k^2 \geq (y_{k+1} + y_{k-1})^2 \Rightarrow 2 \cdot y_k \geq (y_{k+1} + y_{k-1}) \quad (25)$$

Выражение (25) необходимо записать с учетом абсолютной погрешности Δy_k измерения значения y_k относительно значений y_{k-1}, y_{k+1} .

$$2 \cdot (y_k \pm \Delta y_k) \geq (y_{k+1} + y_{k-1}) \quad (26)$$

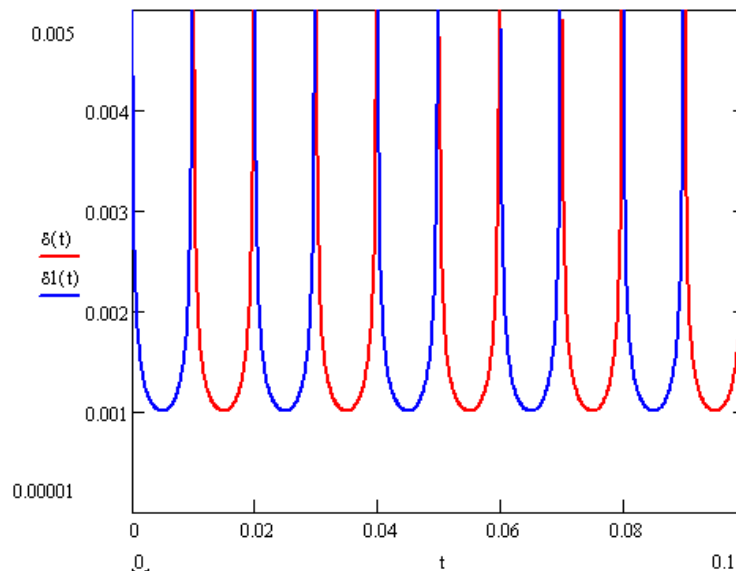
Проведем ряд преобразований:

$$\begin{aligned}
2 \cdot (y_k \pm \Delta y_k) &\geq (y_{k-1} + y_{k+1}) \Rightarrow (2y_k \pm 2\Delta y_k) \geq (y_{k-1} + y_{k+1}) \\
(2a \cdot \sin(x_k b + c) \pm 2\Delta y_k) &\geq (a \cdot \sin(x_{k-1} b + c) + a \cdot \sin(x_{k+1} b + c)) \\
(2a \cdot \sin(x_k b + c) \pm 2\Delta y_k) &\geq 2a \cdot \sin\left(\frac{x_{k-1} b + c + x_{k+1} b + c}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{x_{k-1} b + c - x_{k+1} b - c}{2}\right) \\
(2a \cdot \sin(x_k b + c) \pm 2\Delta y_k) &\geq 2a \cdot \sin\left(\frac{b(x_{k-1} + x_{k+1}) + 2c}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{b(x_{k-1} - x_{k+1})}{2}\right) \\
(2a \cdot \sin(x_k b + c) \pm 2\Delta y_k) &\geq 2a \cdot \sin(bx_k + c) \cdot \cos\left(\frac{b(x_{k+1} - x_{k-1})}{2}\right) \\
(2a \cdot \sin(x_k b + c) \pm 2\Delta y_k) &\geq 2a \cdot \sin(bx_k + c) \cdot \cos(b \cdot \delta) \\
\frac{2a \cdot \sin(x_k b + c) \pm 2\Delta y_k}{2a \cdot \sin(bx_k + c)} &\geq \cos(b \cdot \delta) \\
\cos(b \cdot \delta) &\leq \left(1 \pm \frac{\Delta y_k}{a \cdot \sin(bx_k + c)}\right)
\end{aligned}$$

Из полученного выражения получаем важное условие, определяющее вещественный вид амплитуды прогнозируемого сигнала, а также величину шага экспериментальных отчетов функции тока и напряжения при использовании методики прогнозирования:

$$\delta \leq \frac{1}{b} \arccos\left(1 \pm \frac{\Delta y_k}{a \cdot \sin(b \cdot x_k + c)}\right) \quad (27)$$

Произведем приблизительную оценку максимального значения шага измерения тока, при котором условие (27) будет выполняться. Примем значение циклической частоты $b = 314.159 \text{ рад/с}$, значение амплитуды тока $a = 1000 \text{ А}$, величину начальной фазы $c = 0$ градусов, значение абсолютной погрешности в пределах 5 % [93] от измеряемой величины $\Delta y_k = \pm 50 \text{ А}$. Графики зависимости шага измерения тока от времени представлены на рисунке 35.



--- максимальное значение шага измерения тока при положительных значениях прогнозируемой функции, --- максимальное значение шага измерения тока при положительных значениях прогнозируемой функции

Рисунок 35 - Графики зависимости шага измерения тока от времени

Анализ представленных графиков показывает, что при токе в 1000 А шаг дискретизации измерений для выполнения условия (27), должен быть менее 1 мс (более 20 точек на период), что хорошо коррелирует с нижеприведенными данными.

С целью экспериментальной проверки методики краткосрочного прогнозирования изменения контролируемых АП МРЗ электрических параметров, проанализируем несколько фрагментов аварийных осциллограмм, снятых устройствами МРЗ ФКС на Забайкальской железной дороге.

На рисунке 36 представлен фрагмент осциллограммы тока (кривая выделена красным цветом), снятой в период действия переходного процесса с элементами нелинейных искажений. На интервале - 250 мс до 180 мс по снятым экспериментальным точкам с шагом 1,25 мс определим параметры функции синуса с помощью вышеописанной методики.

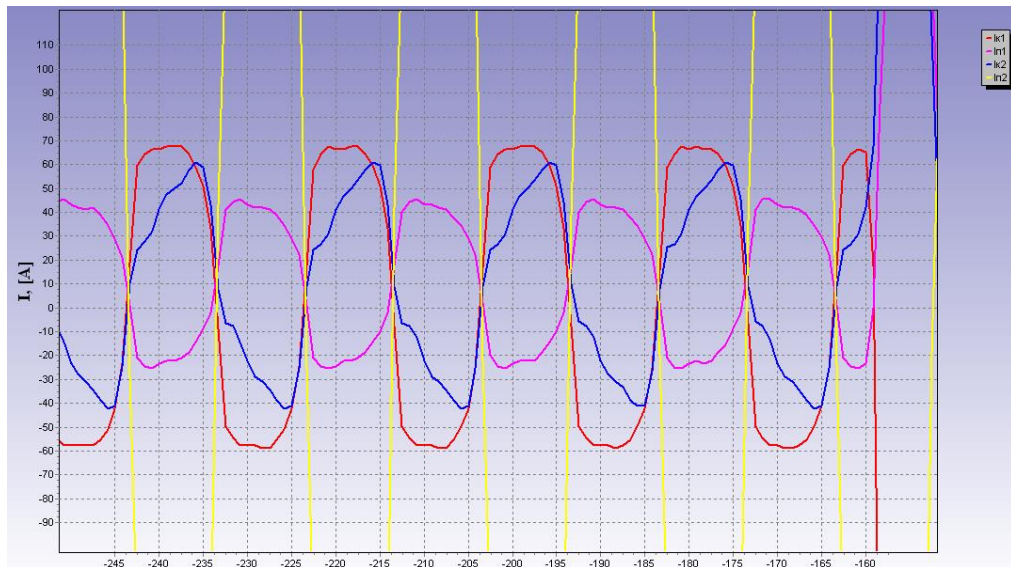
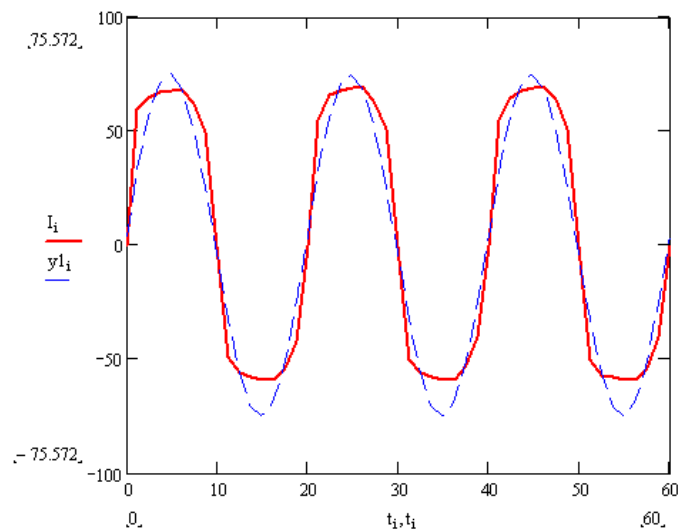


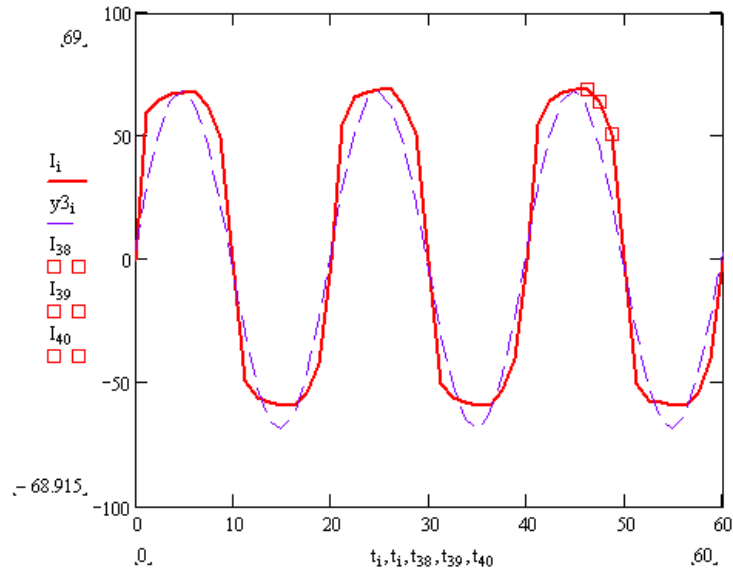
Рисунок 36 - Фрагмент анализируемой аварийной осциллограммы

На рисунках 37-39 представлены соответственно фрагмент анализируемой осциллограммы и графики прогнозных функций синуса, построенные по найденным параметрам. Амплитудные значения найдены тремя способами, с помощью соответственно выражений (21), (23) и (24).



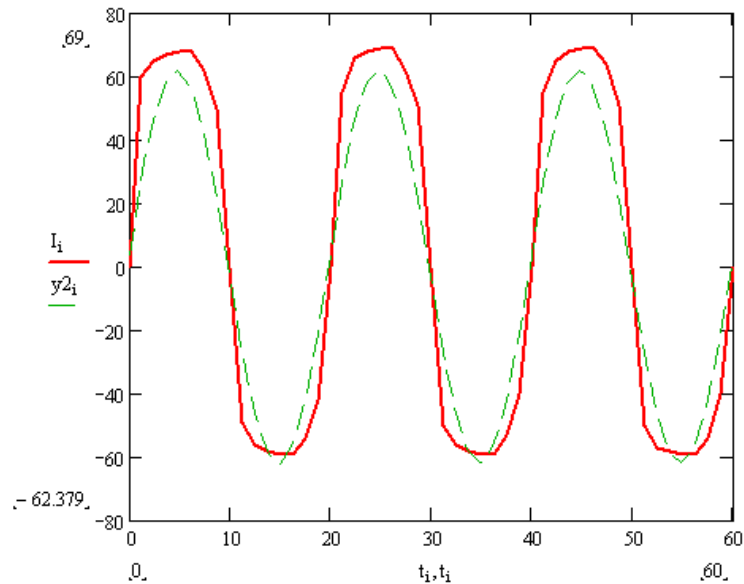
--- $I_1(t)$ - прогнозная функция с определением амплитуды по нескольким экспериментальным точкам; --- $I(t)$ - исходная, контролируемая МРЗ функция тока

Рисунок 37 - Фрагмент анализируемой осциллограммы и график прогнозной функции синуса (амплитудное значение найдено с помощью выражения (21))



--- $I_3(t)$ - прогнозная функция с определением амплитуды по трем экспериментальным точкам; --- $I(t)$ - исходная, контролируемая МРЗ функция тока

Рисунок 38 - Фрагмент анализируемой осциллограммы и график прогнозной функции синуса (амплитудное значение найдено с помощью выражения (23))

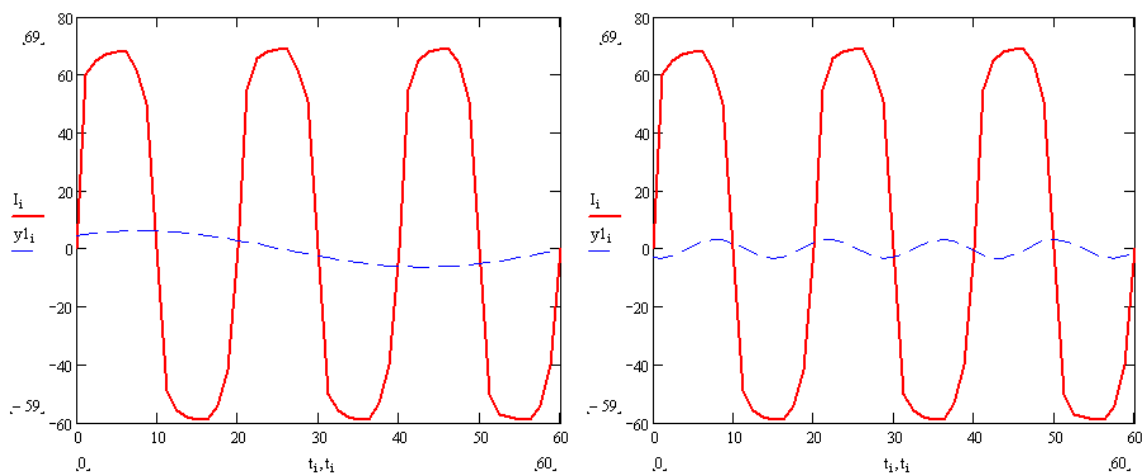


--- $I_2(t)$ - прогнозная функция с определением амплитуды по усреднению соседних троек экспериментальных точек; --- $I(t)$ - исходная, контролируемая МРЗ функция тока

Рисунок 39 - Фрагмент анализируемой осциллограммы и график прогнозной функции синуса (амплитудное значение найдено с помощью выражения (24))

Анализ представленных графиков показывает хорошую сходимость предложенной методики. Графики также подтверждают применимость всех трех выражений для определения амплитуды сигнала. Наибольший интерес представляет выражение (23) поскольку позволяет всего по трем экспериментальным значениям с высокой точностью определить амплитуду прогнозируемого сигнала.

Следует отметить, что в ходе исследований были выявлены некоторые сложности с определением частоты сигнала и начальной фазы. Ранее было сказано, что выражение (16) имеет ограничения, связанные с делением на 0 в случае малых значений экспериментальных значений y_k . Суммирование y_k в знаменателе с малым положительным числом Δ позволяет снять данное ограничение. Однако, проведенные исследования показали, что от величины Δ в значительной степени зависит точность определения амплитуды и начальной фазы сигнала. На рисунке 40 представлены прогнозные функции синуса при произвольных значениях Δ , равных соответственно 3 и 10.

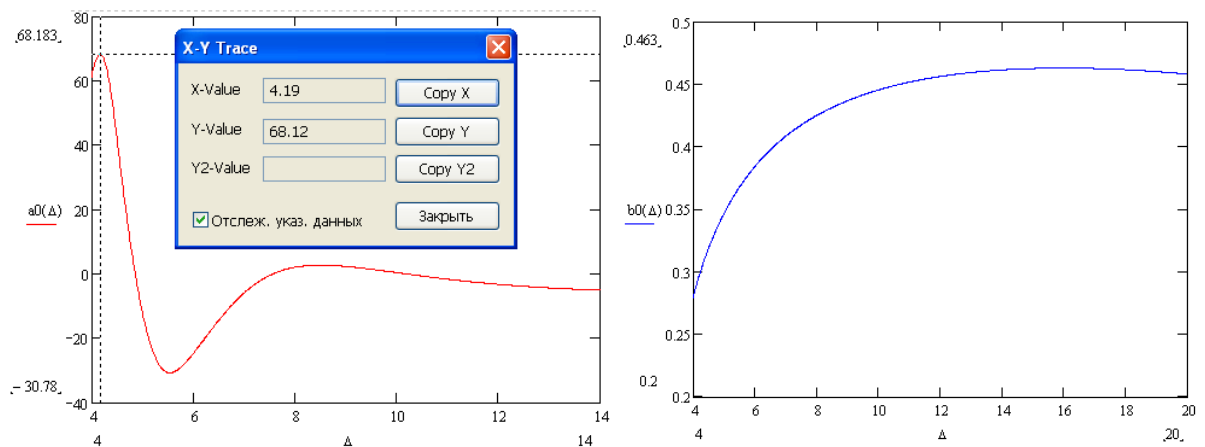


--- $I_I(t)$ - прогнозная функция с определением амплитуды по трем экспериментальным точкам; --- $I(t)$ - исходная, контролируемая МРЗ функция тока

Рисунок 40 - Фрагмент анализируемой осциллограммы и график прогнозной функции синуса, полученные при произвольных значениях Δ , равных соответственно 3 и 10

Анализ графиков показывает сильную зависимость параметров функции синуса от величины Δ . Проведенные исследования позволили установить зависимость точности определения параметров прогнозной синусоиды от величины Δ .

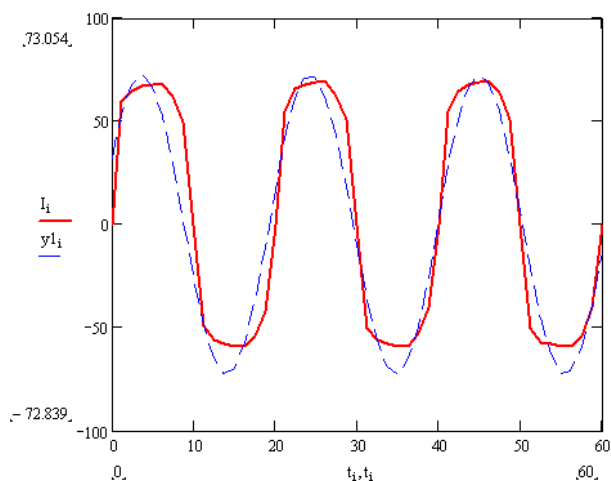
На рисунке 41 представлены графики зависимости амплитуды и циклической частоты прогнозной функции от величины Δ .



--- амплитуда прогнозной функции, --- частота прогнозной функция

Рисунок 41 - Графики зависимости амплитуды и частоты прогнозной функции от величины Δ

Графический анализ функции $a(\Delta)$ позволяет по максимальному значению амплитуды определить значение Δ , при котором найденные параметры дают наилучшую сходимость прогнозной функции. В данном случае, при $\Delta = 4.19$ прогнозная функция синуса примет вид (рисунок 42).



--- $I_i(t)$ - прогнозная функция с определением амплитуды по трем экспериментальным точкам; --- $I(t)$ - исходная, контролируемая МРЗ функция тока

Рисунок 42 - Фрагмент анализируемой осциллограммы и график прогнозной функции синуса, полученный при $\Delta = 4.19$

Исследование выражений для определения параметров синусоиды на экстремум представляет ряд трудностей. Графический метод, ввиду своей повышенной трудоемкости, не пригоден для использования в устройствах МРЗ. Поэтому для решения задачи с определением частоты, начальной фаз и разности фаз прогнозных функций предлагается использовать следующий подход.

В составе измерительной части микропроцессорной релейной защиты предлагается использовать специальное устройство, суть работы которого заключается в фиксации моментов времени прохождения контролируемых сигналов через нулевые отметки. При этом определение значений угловой частоты, начальных фаз и разности фаз прогнозных функций тока и напряжения будет осуществляться на основе анализа значений времени двух или трех смежных нулевых отметок (рисунок 43), зафиксированных измерительным устройством:

$$\omega_i = \frac{2 \cdot \pi}{2 \cdot (t_{i0(k)} - t_{i0(k-1)})}, \omega_i = \frac{2 \cdot \pi}{t_{i0(k+1)} - t_{i0(k-1)}}, \omega_u = \frac{2 \cdot \pi}{2 \cdot (t_{u0(k)} - t_{u0(k-1)})}, \omega_u = \frac{2 \cdot \pi}{t_{u0(k+1)} - t_{u0(k-1)}} \quad (28)$$

$$\varphi_i = 360^0 \cdot \frac{t_{i0(k-1)} - 0}{2 \cdot (t_{i0(k)} - t_{i0(k-1)})}, \quad \varphi_i = 360^0 \cdot \frac{t_{i0(k-1)} - 0}{t_{i0(k+1)} - t_{i0(k-1)}} \quad (29)$$

$$\varphi_u = 360^0 \cdot \frac{t_{u0(k-1)} - 0}{2 \cdot (t_{u0(k)} - t_{u0(k-1)})}, \quad \varphi_u = 360^0 \cdot \frac{t_{u0(k-1)} - 0}{t_{u0(k+1)} - t_{u0(k-1)}} \quad (30)$$

$$\psi = \varphi_u - \varphi_i \quad (31)$$

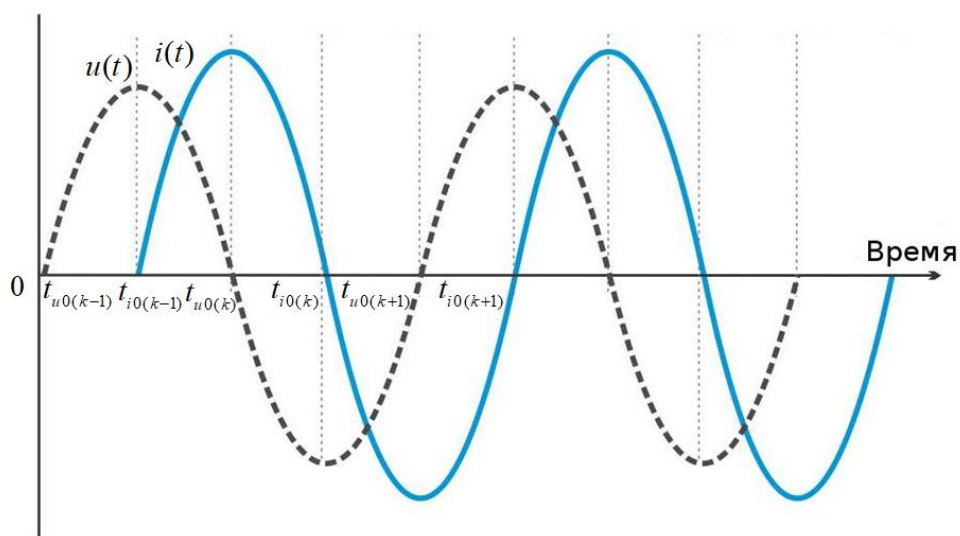


Рисунок 43 - Пример определения значений угловой частоты, начальных фаз и разности фаз прогнозных функций тока и напряжения по двум или трем экспериментальным точкам

В качестве измерителя нулевых отметок времени контролируемых сигналов предлагается использовать ранее рассмотренный метод на основе фазовой автоподстройки частоты [70, 72]. Применение ФАПЧ для определения частоты и начальной фазы измеряемого сигнала позволит значительно сократить объем вычислений и обеспечить on-line режим работы алгоритма краткосрочного прогнозирования.

При использовании предложенного варианта прогнозирования возникает вопрос определения параметров функции синуса при скачкообразном характере

изменения амплитуды измеряемого сигнала в случае аварийной ситуации или действия переходных процессов.

На рисунке 44 представлен фрагмент аварийной осциллограммы тока (кривая выделена красным цветом), зафиксированной на одной из ТП ЗабЖД.

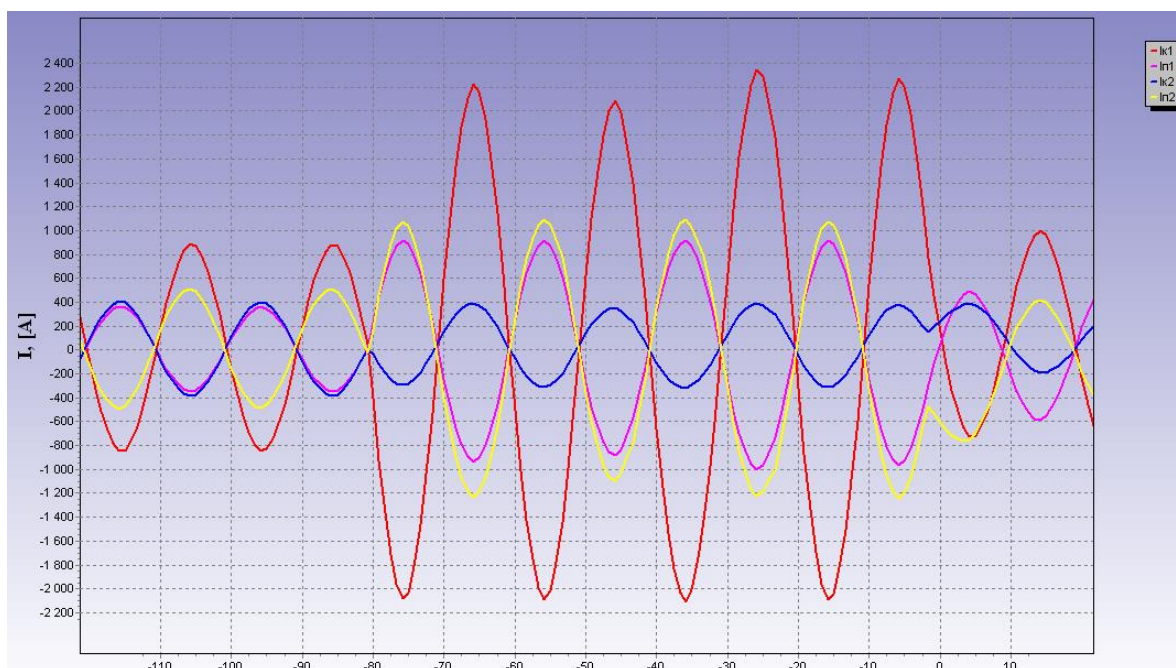
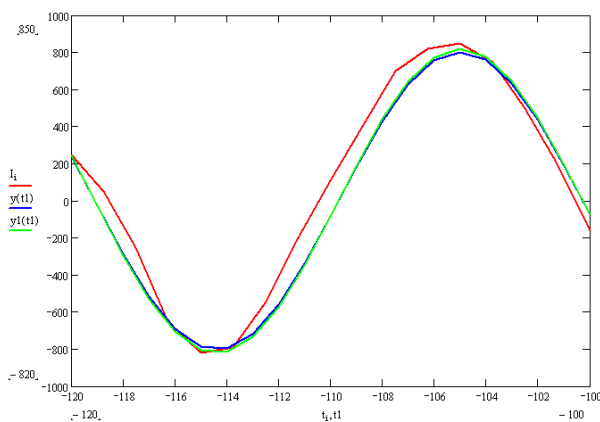


Рисунок 44 - Фрагмент анализируемой осциллограммы тока

Анализ представленной осциллограммы тока показывает, что на интервале времени от минус 85 до 0 мс. амплитудное значение тока резко возрастает с 900 А до 2300 А, а затем интенсивно снижается до допустимого значения 1000 А. В случае применения предлагаемой методики прогнозирования на основе определения параметров синусоидального сигнала большое значение имеет предшествующий интервал времени, на котором производится анализ экспериментальных данных.

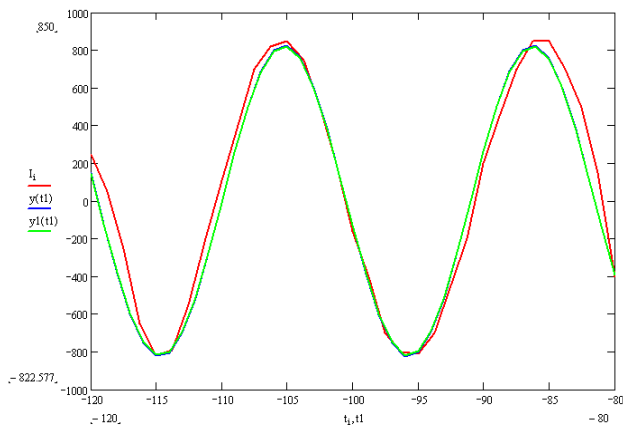
С целью выбора оптимального подхода проведем анализ осциллограммы тока, представленной на рисунке 44, с постепенным изменением числа предшествующих анализируемых периодов. На анализируемых интервалах от -120 до -100 мс, от -120 до -80 мс, от -120 до -60 мс форма прогнозируемой и

прогнозных функций принимает вид, представленный соответственно на рисунках 45-47.



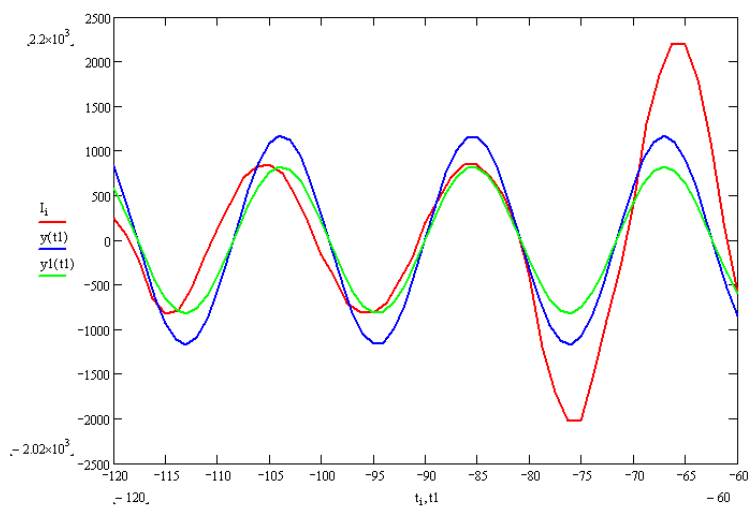
--- I_i – прогнозируемая функция, --- $y(t1)$ – прогнозная функция с определением амплитуды по совокупности экспериментальных точек; --- $y_1(t1)$ – прогнозная функция с определением амплитуды по трем крайним соседним экспериментальным точкам

Рисунок 45 - Фрагмент прогнозируемой и прогнозных функций на интервале от - 120 до - 100 мс



--- I_i – прогнозируемая функция; --- $y(t1)$ – прогнозная функция с определением амплитуды по совокупности экспериментальных точек; --- $y_1(t1)$ – прогнозная функция с определением амплитуды по трем крайним соседним экспериментальным точкам

Рисунок 46 - Фрагмент прогнозируемой и прогнозных функций на интервале от - 120 до - 80 мс



--- I_i – прогнозируемая функция; --- $y(t1)$ – прогнозная функция с определением амплитуды по совокупности экспериментальных точек; --- $y_1(t1)$ – прогнозная функция с определением амплитуды по трем крайним соседним экспериментальным точкам

Рисунок 47 - Фрагмент прогнозируемой и прогнозных функций на интервале от - 120 до - 60 мс

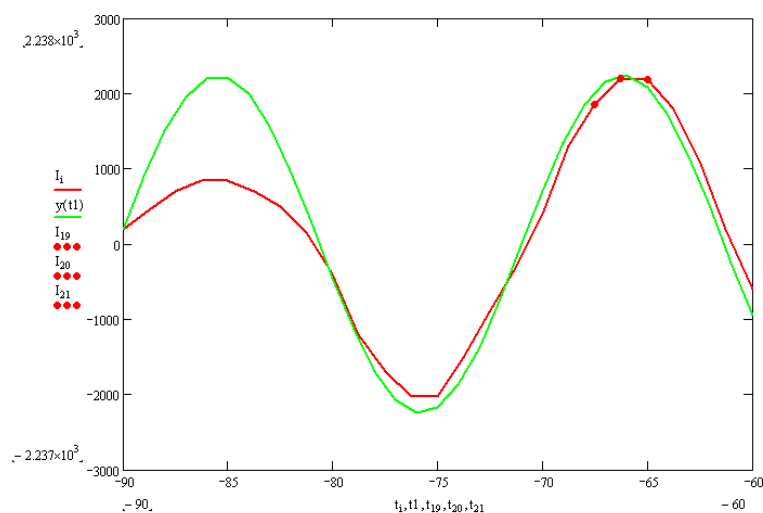
Анализ графиков, представленных на рисунке 46 показывает, что, хоть амплитуда прогнозируемой функции тока на третьем периоде и выросла до значений, превышающих 2000 А, прогнозное значение осталось на прежнем уровне, не превышающем 1000 А. Это связано с резким изменением амплитуды анализируемой функции тока на интервале от - 80 до - 60 мс и тем, что определение параметров прогнозируемой функции ведется по совокупности предыдущих экспериментальных точек.

В связи с этим представляется целесообразным определение частоты, начальных фаз и разности фаз прогнозируемых функций тока и напряжения проводить на основе экспериментальных значений, снятых в нулевых отметках времени на крайнем временном интервале равном $3/2$ периода, а определение параметра a (амплитуды сигнала) по трем вновь снятым с последней полуволны экспериментальным точкам.

Выбор временного интервала равного $3/2$ периода связан с одной стороны с минимизацией числа экспериментальных точек, по которым находится

прогнозное значение частоты и фазы. С другой стороны, на интервале $3/2$ периода укладывается две положительные или две отрицательные полуволны, которые несут информацию о постепенном изменении амплитуды сигнала.

На рисунке 48 представлен фрагмент анализируемой осциллограммы тока (рисунок 44) и график найденной прогнозной функции синуса на интервале от -90 до -60 мс. Анализ графиков подтверждает правильность разработанной методики прогнозирования и выбор выражения (23) для определения значения амплитуды прогнозируемого сигнала.



--- I_i – прогнозируемая функция; --- $y(t1)$ – прогнозная функция с определением амплитуды по трем крайним соседним экспериментальным точкам

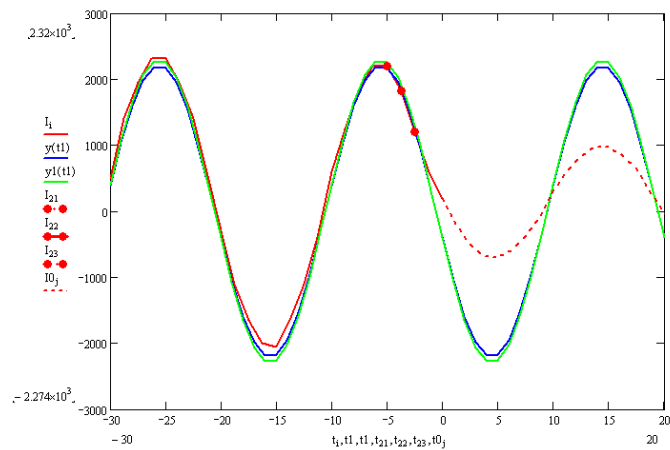
Рисунок 48 - Фрагмент анализируемой осциллограммы тока и график прогнозной функции синуса на интервале от -90 до -60 мс

Определение амплитуды прогнозируемой функции по трем вновь снятым с последней полуволны экспериментальным точкам, связано с тем, что крайняя полуволна дает максимальную информативность об интенсивности изменения амплитуды сигнала вследствие возникшей аварийной ситуации или переходного процесса в контактной сети.

Поскольку измерения дискретных значений тока и напряжения производятся непрерывно, встает вопрос, определения оптимального положения трех смежных точек для определения амплитуды прогнозируемого сигнала, при

которых будет достигнута наибольшая точность прогнозирования. На рисунке 46 анализируемые точки были взяты на пике крайней полуволны.

Проанализируем осциллограмму тока, представленную красным цветом на рисунке 43 на временном интервале, от - 30 мс до 0, постепенно перемещаясь до значения 20 мс (рисунок 49).

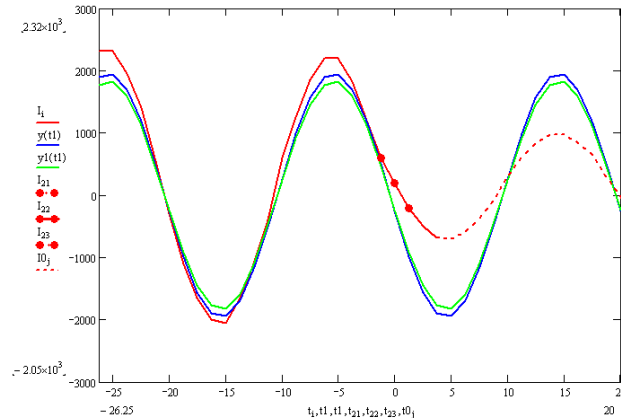


--- I_i – прогнозируемая функция; --- $y(t1)$ – прогнозная функция с определением амплитуды по совокупности экспериментальных точек; --- $y_1(t1)$ – прогнозная функция с определением амплитуды по трем крайним соседним экспериментальным точкам

Рисунок 49 - Фрагмент анализируемой осциллограммы тока на интервале от - 30 до 0 мс и графики прогнозных функций на интервале от 0 до 20 мс

Анализ осциллограмм, представленных на рисунок 49, доказывает следующую логическую закономерность: несмотря на то, что фактическое значение амплитуды тока (красная линия) уменьшается, начиная с нулевой отметки, прогнозные функции, определенные двумя способами (по совокупности экспериментальных точек на анализируемом интервале (синяя линия) и по трем крайним точкам (зеленая линия)), имеют амплитудное значение, соответствующее амплитуде крайних анализируемых полуволн. При этом экспериментальные точки пока еще лежат на интервале, предшествующем началу переходного процесса.

Перемещение анализируемого интервала на три экспериментальные точки вперед по полуволне (интервал от - 26.25 мс до 3.75 мс) приводит к уменьшению значений амплитуды прогнозных функций (рисунок 50).

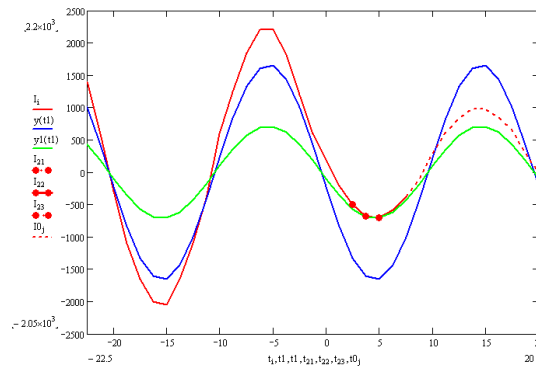


--- I_i – прогнозируемая функция; --- $y(t1)$ – прогнозная функция с определением амплитуды по совокупности экспериментальных точек; --- $y_1(t1)$ – прогнозная функция с определением амплитуды по трем крайним соседним экспериментальным точкам

Рисунок 50 - Фрагмент анализируемой осциллограммы тока на интервале от - 26.25 мс до 3.75 мс и графики прогнозных функций на интервале от 3.75 до 20 мс

Незначительное уменьшение амплитудных значений в сравнении с предшествующим анализируемым интервалом (рисунок 49), связано с тем, что на значения прогнозируемых параметров оказывают влияние предшествующие экспериментальные значения (синяя осциллограмма), три экспериментальные точки лежат на вертикальной части кривой (зеленая осциллограмма).

Перемещение анализируемого интервала еще на три экспериментальные точки вперед по полуволне (интервал от - 22.5 мс до 7.5 мс) приводит к уменьшению амплитуды обеих прогнозных функций (рисунок 51), но уже не в равной степени.

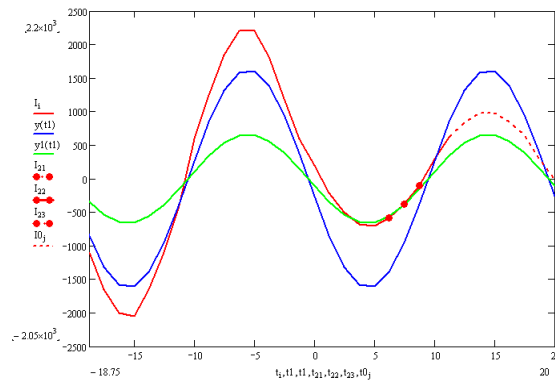


--- I_i – прогнозируемая функция; --- $y(t1)$ – прогнозная функция с определением амплитуды по совокупности экспериментальных точек; --- $y_1(t1)$ – прогнозная функция с определением амплитуды по трем крайним соседним экспериментальным точкам

Рисунок 51 - Фрагмент анализируемой осциллограммы тока на интервале от - 22.5 мс до 7.5 мс и графики прогнозных функций на интервале от 7.5 до 20 мс

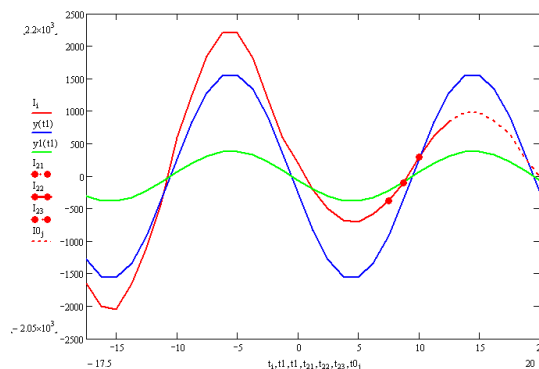
В прогнозной функции синего цвета, построенной с усреднением амплитудных значений на всем анализируемом интервале, произошло незначительное уменьшение значение амплитуды. Прогнозная функция, найденная с определением амплитуды по трем экспериментальным точкам (кривая зеленого цвета) наиболее близка к фактической кривой тока (кривая красного цвета).

Дальнейшее перемещение анализируемого интервала на три измерения (интервал от - 18.75 мс до 11.25 мс) (рисунок 52) и далее еще на три (рисунок 53) в область пересечения анализируемого отрезка кривой тока с нулевыми отметками отрицательно сказывается на точности амплитудных значений прогнозных функций по отношению к фактической форме кривой тока. Это связано с низкой информативностью данного участка синусоиды по отношению к ее амплитуде.



--- I_i – прогнозируемая функция; --- $y(t_1)$ – прогнозная функция с определением амплитуды по совокупности экспериментальных точек; --- $y_1(t_1)$ – прогнозная функция с определением амплитуды по трем крайним соседним экспериментальным точкам

Рисунок 52 - Фрагмент анализируемой осциллограммы тока на интервале от -18.75 до 11.25 мс и графики прогнозных функций на интервале от 11.25 до 20 мс

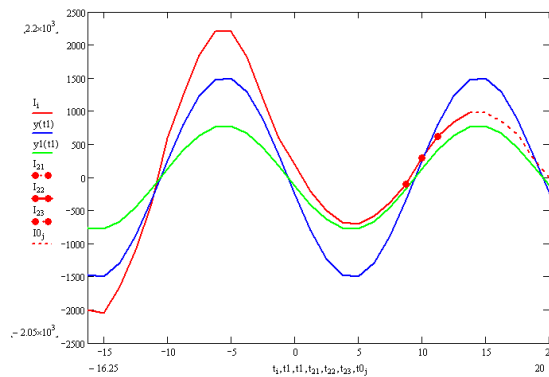


--- I_i – прогнозируемая функция; --- $y(t_1)$ – прогнозная функция с определением амплитуды по совокупности экспериментальных точек; --- $y_1(t_1)$ – прогнозная функция с определением амплитуды по трем крайним соседним экспериментальным точкам

Рисунок 53 - Фрагмент анализируемой осциллограммы тока на интервале от -17.5 до 12.5 мс и графики прогнозных функций на интервале от 12.5 до 20 мс

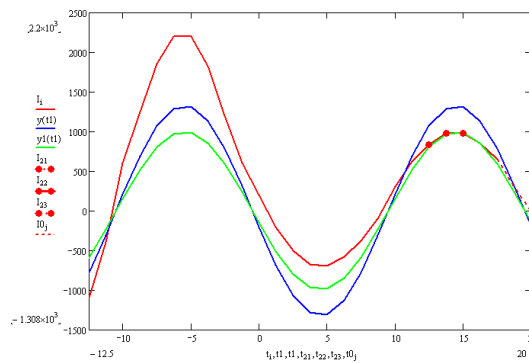
По мере удаления вновь измеренных экспериментальных точек от нулевой отметки (рисунок 54, 55) точность определения амплитуды прогнозных функций

(график зеленого цвета) возрастает, достигая наилучшего значения в области вершины полуволны.



--- I_i – прогнозируемая функция; --- $y(t1)$ – прогнозная функция с определением амплитуды по совокупности экспериментальных точек; --- $y_1(t1)$ – прогнозная функция с определением амплитуды по трем крайним соседним экспериментальным точкам

Рисунок 54 - Фрагмент анализируемой осциллограммы тока на интервале от - 16.25 до 13.75 мс и графики прогнозных функций на интервале от 13.75 до 20 мс



--- I_i – прогнозируемая функция; --- $y(t1)$ – прогнозная функция с определением амплитуды по совокупности экспериментальных точек; --- $y_1(t1)$ – прогнозная функция с определением амплитуды по трем крайним соседним экспериментальным точкам

Рисунок 55 - Фрагмент анализируемой осциллограммы тока на интервале от - 12.5 до 17.5 мс и графики прогнозных функций на интервале от 17.5 до 20 мс

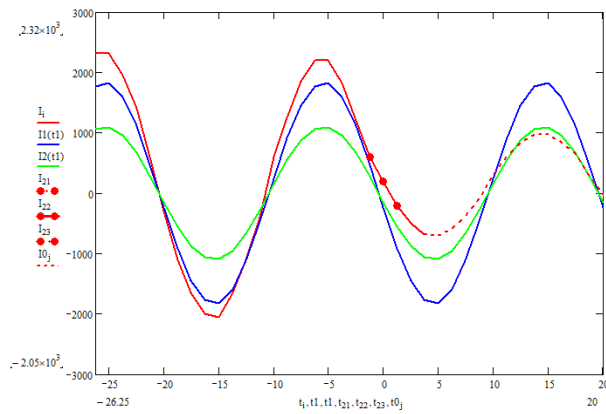
Прогнозная функция, определенная по усредненным значениям за анализируемый интервал, показывает недостаточную сходимость с фактической осциллограммой тока, в связи с влиянием экспериментальных данных, снятых на предшествующем переходному процессу интервале времени.

Таким образом, метод определения амплитуды прогнозной функции по усредненным экспериментальным значениям является очень статичным и дает низкую сходимость при прогнозировании резко переменных сигналов. Метод определения амплитуды прогнозной функции, основанный на трех соседних экспериментальных значениях дает хорошую сходимость при расположении эти точек вблизи экстремумов прогнозируемой функции и дает низкую сходимость при нахождении точек вблизи нулевых отметок.

С целью повышения точности и эффективности процесса прогнозирования амплитудных значений контролируемых сигналов целесообразно использовать комбинированный подход. Нахождение амплитуды прогнозной функции по трем соседним экспериментальным точкам целесообразно применять при нахождении этих точек в области экстремумов прогнозируемых функций. Вблизи нулевых отметок, предлагается использовать метод определения амплитуд прогнозных функций через первую производную, найденную по двум соседним экспериментальным значениям:

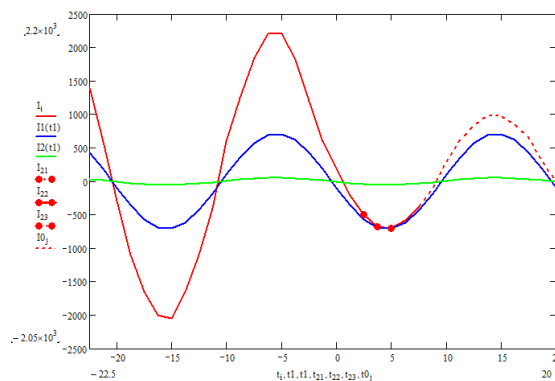
$$\frac{dy}{dx} = a \cdot b \cdot \cos(b \cdot x + c) \Rightarrow a = \frac{\frac{y_{k+1} - y_k}{x_{k+1} - x_k}}{b \cdot \cos\left(b \cdot \frac{x_{k+1} - x_k}{2} + c\right)} \quad (32)$$

Таким образом, два предложенных метода определения амплитуды прогнозной функции, дополняют друг друга на разных временных интервалах, что подтверждается представленными на рисунках 56 - 57 графиками.



--- I_i – прогнозируемая функция; --- $I_1(t1)$ – прогнозная функция с определением амплитуды по трем смежным экспериментальным точкам; --- $I_2(t1)$ – прогнозная функция с определением амплитуды через производную, найденную по двум соседним экспериментальным точкам

Рисунок 56 - Анализируемая осциллограмма тока и графики прогнозных функций



--- I_i – прогнозируемая функция; --- $I_1(t1)$ – прогнозная функция с определением амплитуды по трем смежным экспериментальным точкам; --- $I_2(t1)$ – прогнозная функция с определением амплитуды через производную, найденную по двум соседним экспериментальным точкам

Рисунок 57 - Анализируемая осциллограмма тока и графики прогнозных функций

Таким образом, работа имитационной модели процесса краткосрочного прогнозирования изменения контролируемых АП МРЗ электрических параметров по току и напряжению заключается в следующем:

1. Осуществляется измерение текущего дискретного значения тока I_i либо

напряжения U_i . Производится проверка величины I_i либо U_i и если она имеет ненулевое значение с учетом допуска Δ , то осуществляется измерение и фиксация последующих дискретных значений I_i либо (U_i) с шагом 10 мкс. Цикл по первой контрольной точке осуществляется до момента фиксации первого нулевого значения тока (напряжения), служащего отправной точкой. Выбранное значение шага дискретизации в алгоритме прогнозирования может при необходимости быть изменено программным путем.

2. При фиксации первого нулевого значения тока $I_{0(k)} = I_i$ (напряжения $U_{0(k)} = U_i$) осуществляется его запись в регистр с индексом $k = 0$ синхронно с соответствующим моментом времени $t_{i0(k)}$. С учетом двух нулевых фиксированных значений тока (напряжения), снятых на полупериоде, осуществляется вычисление циклической частоты и начальной фазы прогнозной функции (28-30):

$$\omega_I = \frac{\pi}{t_{0(k)} - t_{0(k-1)}} \quad \varphi_I = 360^\circ \cdot \frac{t_{0(k-1)}}{2 \cdot (t_{0(k)} - t_{0(k-1)})}$$

$$\omega_U = \frac{\pi}{t_{i0(k)} - t_{i0(k-1)}} \quad \varphi_U = 360^\circ \cdot \frac{t_{i0(k-1)}}{2 \cdot (t_{i0(k)} - t_{i0(k-1)})}$$

На этом же шаге также осуществляется вычисление значение разности фаз прогнозных функций напряжения и тока $\psi = \varphi_u - \varphi_i$ (31). После вычисления значений циклической частоты и начальной фазы при фиксации нулевого значения тока происходит обнуление индекса i с целью изменения начальной точки отсчета, задержка в 10 мкс и фиксация следующего значения тока.

3. Поскольку предыдущее значение тока (напряжения) являлось нулевой отметкой, то вычисление амплитуды прогнозной функции тока (напряжения) производится через производную по двум дискретным точкам (32):

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

4. Далее осуществляется анализ амплитудного значения прогнозной функции тока (напряжения). Если амплитудное значение тока меньше увеличенного на 20 % значения уставки (амплитудное значение напряжения больше уменьшенного на 20 % значения уставки), то это указывает на отсутствие аварийной ситуации, следовательно осуществляется переход по метке 4, задержка в 10 мкс, измерение и запись следующего дискретного значения тока (напряжения).

5. Последующая проверка выполнения условия на не превышении числа измеренных дискретных значений тока (напряжения) более четырех (может быть изменено программным путем) позволяет осуществить определение амплитуд прогнозной функции тока (напряжения) при помощи производной вблизи нулевого значения. При превышении числа измеренных дискретных точек более четырех (может быть изменено программным путем) и удалении от нулевой отметки тока (напряжения) вычисление амплитуды прогнозной функции тока (напряжения) осуществляется по трем измеренным значениям (23):

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

Следует отметить, что каждое последующее измеренное дискретное значение тока (напряжения) проверяется на равенство нулю с целью поиска окончания полупериода функции и возврата алгоритма по метке 2 для уточнения значений циклической частоты, начальной фазы прогнозируемой функции и определения амплитудного значения тока посредством производной.

6. В случае неравенства нулю очередного измеренного дискретного значения тока (напряжения) осуществляется проверка найденного значения амплитуды

прогнозной функции тока (напряжения). Если амплитудное значение тока меньше увеличенного на 20 % значения уставки (амплитудное значение напряжения больше уменьшенного на 20 % значения уставки), то это указывает на отсутствие аварийной ситуации, осуществляется переход по метке 4, задержка в 10 мкс, измерение и запись следующего дискретного значения тока (напряжения).

7. Если найденное прогнозное амплитудное значение тока превышает увеличенное на 20 % значения уставки, но менее максимально допустимого значения в 3000 А (амплитудное значение напряжения меньше уменьшенного на 20 % значения уставки, но, при этом, более 15 кВ), то независимо от способа его определения (посредством производной или по трем дискретным точкам) происходит срабатывание таймера длительностью два периода частоты – 0,04 с. Осуществляется запись полученного значения амплитуды прогнозной функции с привязкой ко времени с момента начала работы таймера и возврат по метке 4, но в случае, если время не превысило значения 0,04 с.

8. В случае окончания времени работы таймера производится оценка всех значений амплитуды прогнозной функции тока, превысивших отметку $1,2 \cdot I_{my}$ (всех значений амплитуды прогнозной функции напряжения, не достигших отметки $0,8 \cdot U_{my}$) на интервале времени $0,04 \geq t \geq 0,02$.

Если такие значения присутствуют в регистре, то принимается решение об немедленном отключении выключателя фидера контактной сети, т.е. ситуация приравнивается к аварийной. Если нет, то это означает, что измерительные органы зафиксировали кратковременные всплески тока (напряжения), вызванные, в том числе пусковыми и переходными процессами. В этом случае таймер обнуляется и осуществляется переход по метке 4 алгоритма.

9. В случае превышении прогнозного амплитудного значения тока предельно допустимой величины в 3000 А (амплитудного значения напряжения ниже предельно допустимой величины 15 кВ) независимо от способа его определения принимается решение об отключении выключателя фидера контактной сети без дополнительного анализа аварийной ситуации и выдержки времени.

Итоговая блочная схема имитационной модели процесса краткосрочного прогнозирования изменения контролируемых МРЗ электрических параметров приведена на рисунке 58.

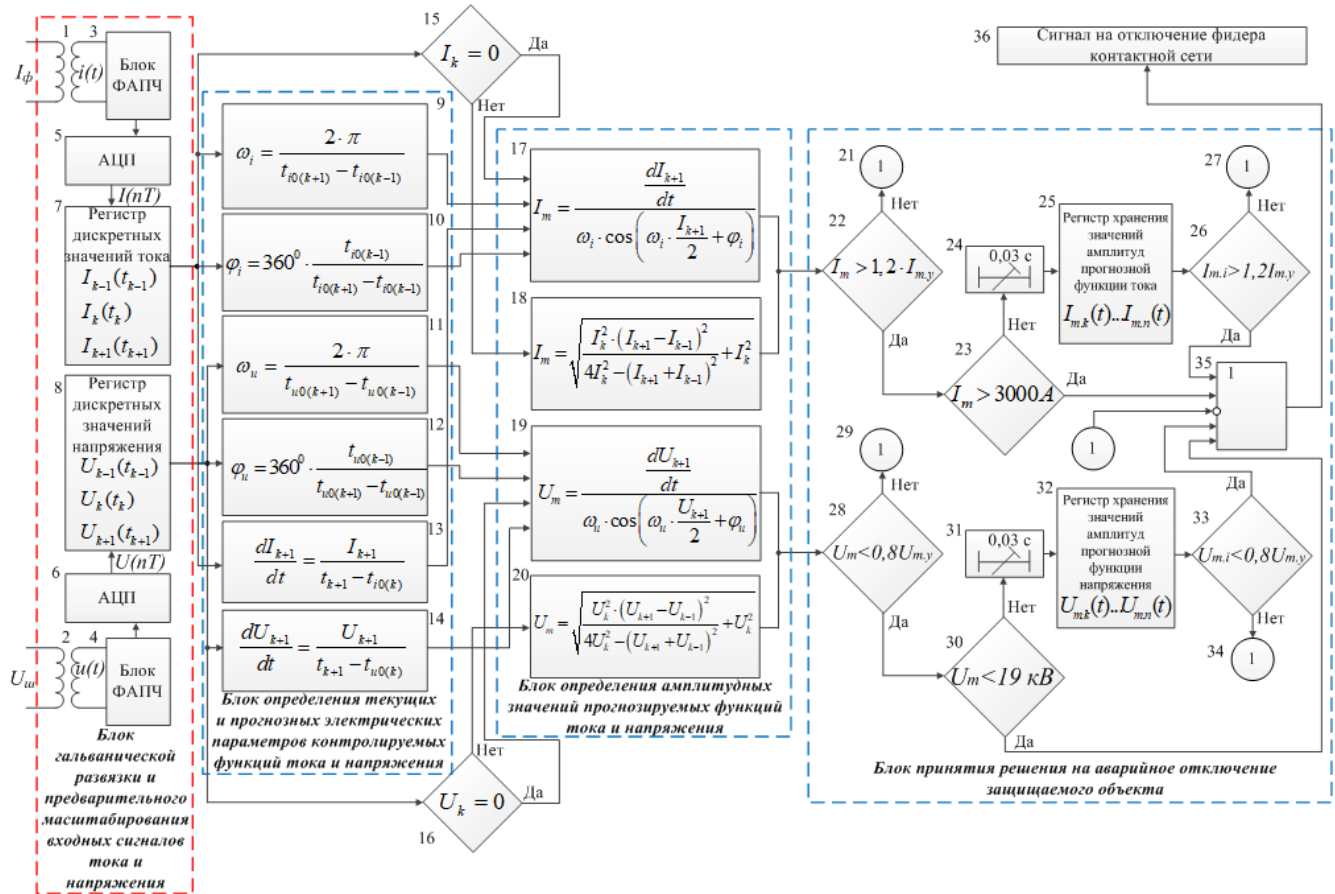


Рисунок 58 - Блочная схема имитационной модели процесса краткосрочного прогнозирования изменения контролируемых МРЗ электрических параметров

Итоговый вариант алгоритмов краткосрочного прогнозирования по току и напряжению представлен соответственно на рисунках 59, 60.

С целью подтверждения эффективности предложенной имитационной модели процесса краткосрочного прогнозирования изменения контролируемых АП МРЗ электрических параметров был произведен вычислительный эксперимент на основе анализа выборки, состоящей из ста аварийных осциллограмм отключений МРЗ по неустановленным причинам (срабатывание ступеней НДЗ-1, НДЗ-2, НДЗ-3). Результаты вычислительного эксперимента представлены в таблице 1.

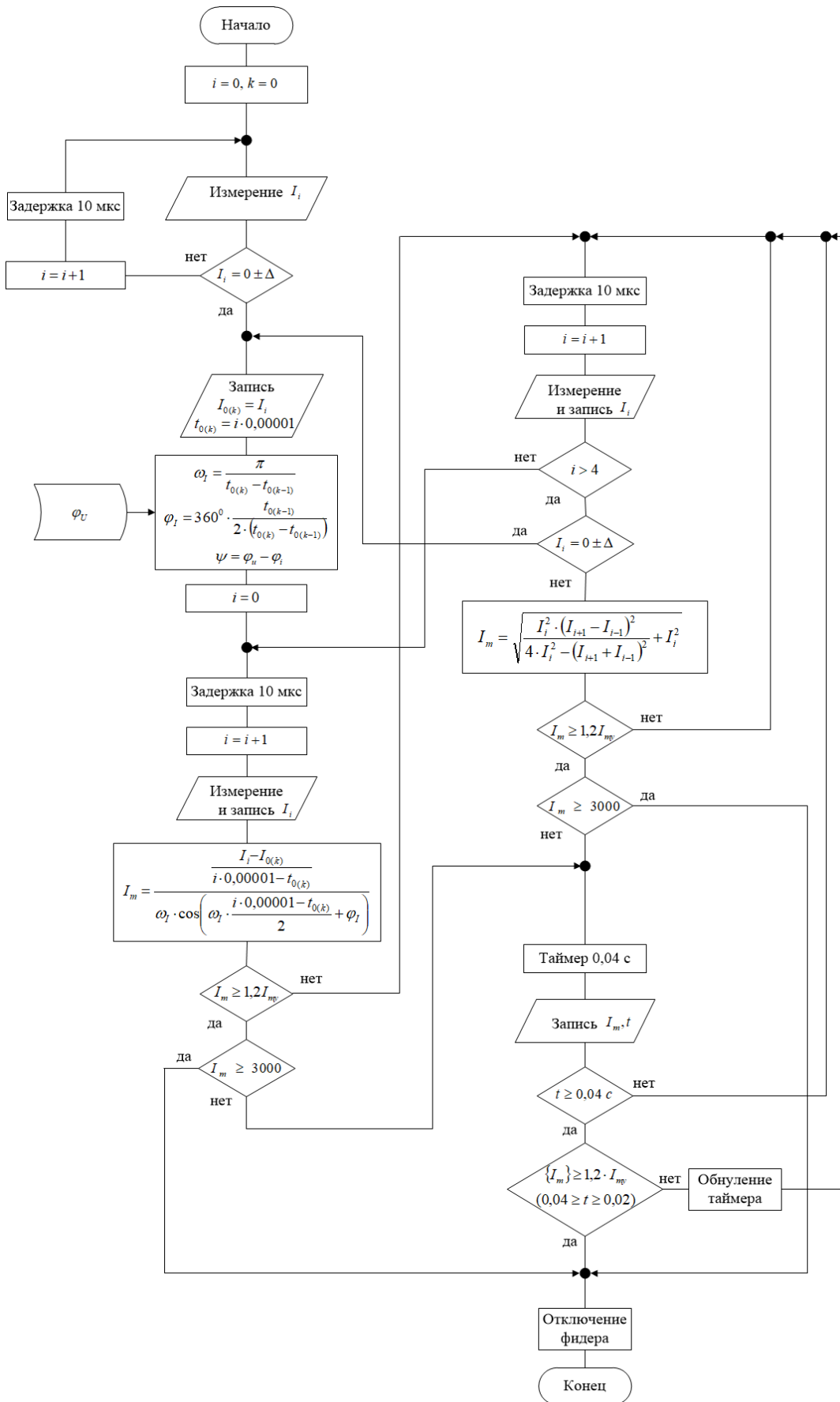


Рисунок 59 - Алгоритм краткосрочного прогнозирования контролируемого АП МР3 сигнала тока

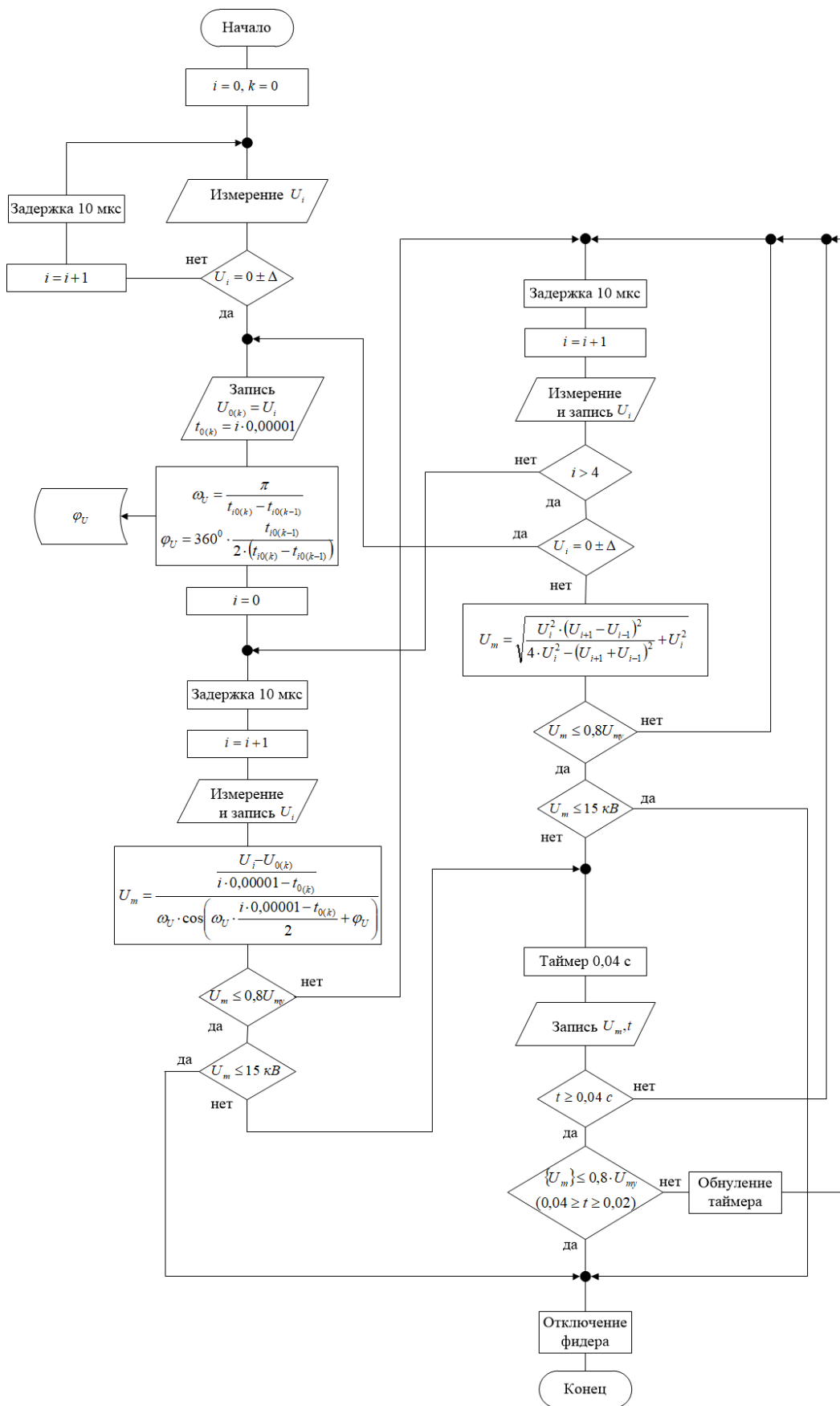


Рисунок 60 - Алгоритм краткосрочного прогнозирования контролируемого АП МРЗ сигнала напряжения

Таблица 1 - Результаты вычислительного эксперимента

№	Отработавшая ступень МРЗ	Кол-во аварийных осциллограмм в выборке (отключения по неустановленным причинам)	Диапазон изменения электрических величин контролируемых параметров	Работа АПВ успешно / неуспешно	Прогноз на срабатывание МРЗ да / нет
1	ТО, ТО2	-	I=1200÷3000 А U=0÷27,5 кВ	-	-
2	ННДЗ	-	I=150÷1000 А U=0,5÷15 кВ	-	-
3	НДЗ-1	48	I=1000÷3000 А U=15÷19 кВ	39 / 9	9 / 35 4*
4	НДЗ-2	18	I=1000÷3000 А U=19÷21 кВ	15 / 3	3 / 13 2*
5	НДЗ-3	34	I=1000÷3000 А U=21÷27,5 кВ	27 / 7	7 / 20 7*
6	ЗМН	-	U=0,5÷25 кВ	-	-
7	ИТОГО	100	-	81 / 19	19 / 68 13*
8	Экспериментальная потенциальная эффективность прогнозного метода				68 %

* - отключения МРЗ, отнесенные к разряду аварийных в процессе проведения вычислительного эксперимента

Из ста зафиксированных отключений МРЗ девятнадцать действительно было отнесено в разряд аварийных, а в оставшемся восьмидесяти одном случае МРЗ восстановила нормальный режим работы после автоматического повторного включения (АПВ), о чем свидетельствует соответствующая информация в журнале «Аварии» АСУ МРЗ (АСУ ЦЗА-ФТС). Применив к оставшемуся восьмидесяти одному отключению методику краткосрочного прогнозирования удалось доказать тот факт, что шестьдесят восемь отключений МРЗ можно было избежать, а тринадцать срабатываний МРЗ в дальнейшем были отнесены к разряду аварийных, поскольку длительность действия критических

значений тока и (или) напряжения превысила допустимый временной интервал, отводимый на прогнозирование (два полупериода). Таким образом, потенциальная эффективность разработанной имитационной модели составляет 68 %.

2.4 Выводы:

1. Разработана методика непрерывного мониторинга со сжатием сплайн-интерполяцией контролируемых МРЗ электрических параметров, позволяющая осуществлять независимую непрерывную фиксацию и запись осциллограмм тока и напряжения с выводом информации на ПЭВМ дежурного ТП.

2. Разработана методика фильтрации и выделения первой гармоники тока и напряжения на основе фазовой автоподстройки частоты для фиксации нулевых отметок сигналов тока и напряжения и более точного определения их текущих электрических параметров.

3. Разработана имитационная модель процесса краткосрочного прогнозирования изменения контролируемых АП МРЗ электрических параметров с учетом фильтрации и выделения первой гармоники тока и напряжения на основе фазовой автоподстройки частоты, позволяющая повысить селективность устройств релейной защиты при действии пусковых и переходных токов, протекающих в контактной сети.

4. Проведенный вычислительный эксперимент на основе анализа выборки аварийных осциллограмм отключений МРЗ по неустановленным причинам (при доверительном интервале 0,95) показал высокую эффективность (68 %) предложенной в п. 3 имитационной модели.

3. Автоматизированная подсистема микропроцессорной релейной защиты фидеров контактной сети переменного тока

3.1 Разработка технических решений для повышения селективности

АП МРЗ ФКС переменного тока

В первой главе было показано, что действие пусковых и переходных токов, протекающих в контактной сети, приводит к значительному числу аварийных срабатываний устройств микропроцессорной релейной защиты, которые ранее классифицировались как «неустановленные причины».

Основными конструктивно-техническими недостатками всех эксплуатируемых на ЗабЖД устройств МРЗ являются:

- 1) реализация алгоритмов работы предшествующих электромеханических релейных защит на базе микропроцессорных терминалов релейных защит;
- 2) наличие погрешности квантования определения начальных фаз контролируемых сигналов и разности фаз между током и напряжением;
- 3) фиксация небольшого конечного числа аварийных осциллограмм с ограниченной длительностью процесса регистрации 1,2 с.;
- 4) отсутствие возможности on-line визуализации и просмотра на дисплее блока управления осциллограмм контролируемых электрических параметров;
- 5) «жесткая» фиксация значений уставок контролируемых электрических параметров;
- 6) отсутствие возможности получения, использования и обработки дополнительной информации, включая данные о текущей поездной ситуации.

Как было сказано ранее, указанные недостатки приводят к неустойчивой работе терминалов МРЗ при изменении параметров рабочих режимов СТЭ.

Проанализируем известные на сегодняшний момент технические решения, направленные на повышение селективности устройств МРЗ, в том числе, в

условиях граничных режимов работы СТЭ, а также связанных с протеканием в контактной сети пусковых и переходных токов.

Известно устройство для мониторинга состояния высоковольтных вводов [94], в котором осуществлена оцифровка входных сигналов тока и напряжения в N равностоящих точках относительно периода сигналов с последующим определением ортогональных составляющих первых гармоник ряда Фурье. Отличительной особенностью устройства является программное измерение периода анализируемых сигналов тока и напряжения и равномерное задание интервалов квантования. При этом фиксация начала и конца периода измеряемого сигнала осуществляется микропроцессором путем анализа кодовых посылок, соответствующих нулевым значениям, поступающих с аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Интервалы квантования задаются с помощью встроенного в АЦП таймера. Нецелое число дискретизаций за период измеряемого сигнала приводит к погрешности измерения его временных параметров [94].

В плане защиты электрооборудования от пусковых и переходных токов в современных МРЗ реализована программная отстройка второй и третьей ступеней, осуществляемая «загрублением» на 20% значений уставок по току и напряжению при превышении значения коэффициента гармоник K_g нормированного значения [95].

Также в применяемых МРЗ предусмотрена возможность программной установки дополнительных («зеркальных») зон срабатывания второй и третьей ступеней для устройств, используемых на постах секционирования и пунктах параллельного соединения, где существует вероятность протекания тягового тока в обоих направлениях [21].

Основным конструктивно-техническим недостатком программного «загрубления» уставок является имеющаяся вероятность перекрытия зон срабатывания нормального и аварийного режимов работы релейной дистанционной защиты, связанная с кратковременными бросками тягового тока и динамическим изменением угла сдвига фаз между током и напряжением в

нормальном режиме работы: при трогании тяжеловесных поездов с места; переключении режимов работы двигателей электровозов; включении режимов рекуперации; вступлении поездов в зону действия защиты и выхода из неё при пакетном графике движения; пропуске тяжеловесных и сдвоенных составов.

В области прогнозирования динамики изменения контролируемых электрических параметров известно интеллектуальное устройство релейной защиты промышленных систем электроснабжения, основанное на введении в состав программного уровня искусственной нейронной сети [96]. Нейронная сеть способна решать задачи прогнозирования будущей реакции системы по ее предшествующему поведению. Накапливая статистические данные, включающие в себя различную информацию о работе системы электроснабжения, нейронная сеть вырабатывает решение на основе наиболее вероятного состояния системы электроснабжения. Сравнивая после этого прогноз и реальное состояние системы, нейронная определяет погрешность прогнозирования и использует это значение для дальнейшей адаптации весовых коэффициентов, т.е. изменения силы синоптических связей между нейронами.

Недостатком нейронной сети в составе устройства релейной защиты является длительное время, требуемое для пошаговой корректировки синоптических весов нейронов и достижения устойчивого состояния сети в процессе обучения в случае возникновения в системе электроснабжения аварийных и близких к аварийным ситуаций. Данный способ показывает наилучшие ситуации в работе устройства релейной защиты при плавных изменениях контролируемых параметров. Между тем, процесс появления аварийных и близких к аварийным ситуациям в СТЭ носит случайный характер и сопровождается резкими изменениями контролируемых электрических параметров.

Также известен способ защиты объектов промышленного электроснабжения на основе анализа первой производной тока короткого замыкания. Способ заключается в фиксации мгновенных значений первой производной тока и их сравнении с заранее заданной уставкой [97].

Недостаток данного способа кроется в зависимости значений первой производной контролируемого сигнала тока от его текущей фазы. Максимум производной тока достигает вблизи нулевых отметок, минимум при действии амплитудных значений контролируемых сигналов.

В работе [98] предложен аналогичный способ аварийной защиты устройств электроснабжения на основе фиксации мгновенных значений первой производной тока защищаемого объекта и сравнении их с уставкой. Отличительной особенностью данного способа от рассмотренного ранее состоит в фиксации значений производных в моментах перехода тока через нулевые отметки. От фиксируемых нулевых отметок производится отсчет текущей фазы контролируемого сигнала. На основании первой производной и найденной фазы определяется прогнозируемое значение амплитуды периодической составляющей тока защищаемого объекта, которая затем сравнивается с уставкой.

К недостаткам рассмотренного способа следует отнести ограниченность временных интервалов (области нулевых отметок), в которых производится определение первой производной контролируемого сигнала и прогнозирование его текущих амплитудных значений. В остальные моменты времени полупериода контролируемого сигнала прогнозирование его амплитуды не производится.

Проведённый анализ показал, что проблема разработки и внедрения МРЗ ФКС, обеспечивающих эффективную селективность аварийного и близкого к аварийному режимов работы СТЭ, указанными техническими устройствами, решена не полностью, а именно:

- 1) алгоритмы релейных устройств без значительного применения возможностей микропроцессорной техники реализованы во всех современных терминалах релейной защиты ФКС;
- 2) определение начальных фаз контролируемых сигналов и разности фаз между током и напряжением производится программным путем после операции оцифровывания и цифровой фильтрации;

- 3) осциллограммы тока и напряжения в действующих устройствах МРЗ фиксируются только в моменты аварийного срабатывания устройств релейной защиты;
- 4) защита от пусковых и переходных токов обеспечивается только путем «загрубления» уставок;
- 5) взаимодействие действующих терминалов МРЗ с дополнительными информационными каналами, включая данные о текущей поездной ситуации, отсутствует.

Целью настоящего раздела диссертационной работы является выработка методов повышения селективности АП МРЗ ФКС переменного тока, эксплуатируемых на участках железных дорог переменного тока.

Достижение указанной цели обеспечивается за счет:

- более точного определения начальных фаз и разности фаз контролируемых сигналов на основе аппаратной фильтрации и фиксации их нулевых отметок;
- непрерывного снятия и автоматической фиксации осциллограмм тока и напряжения, включая моменты аварийного срабатывания устройств МРЗ для визуализации и привязки информации к параметрам текущей поездной ситуации, снятым посредством ПО «ГИД»;
- шаблонов, верифицирующих каждую аварийную ситуацию, (включающих в себя зафиксированные осциллограммы тока и напряжения с привязкой к данным о текущей поездной ситуации (ПО «ГИД») и результаты имитационного моделирования данной поездной ситуации в ПК «КОРТЭС» с воспроизведением всех рабочих параметров) необходимых для идентификации, выделения и анализа причин, приведших к аварийному отключению устройств МРЗ;
- краткосрочного прогнозирования изменения контролируемых МРЗ электрических параметров, применяемого для защиты от пусковых и переходных токов, протекающих в контактной сети, и, тем самым, снижения числа аварийных срабатываний.

Во второй главе были представлены и апробированы методики и имитационная модель, необходимые для реализации предлагаемых технических

решений, направленных на повышение селективности АП МРЗ ФКС переменного тока.

3.2 Разработка устройства фильтрации и выделения первой гармоники тока и напряжения на основе фазовой автоподстройки частоты

В современных устройствах МРЗ выделение первой и последующих гармоник осуществляется посредством цифровых фильтров на основе дискретизации сигнала и быстрого преобразования Фурье.

Этот метод и реализующие его алгоритмы обладают серьезным недостатком, связанным с погрешностью определения начальных фаз измеряемых сигналов тока и напряжения при девиации частоты, которая сопровождается изменением числа дискретизаций на периоде, как в пределах целого, так и нецелого чисел. Между тем, соотношения между фазами тока и напряжения являются определяющими при распознавании аварийных режимов системы тягового электроснабжения. Предлагаемое техническое решение и устройство на его основе [70] приведено на рисунке 61.

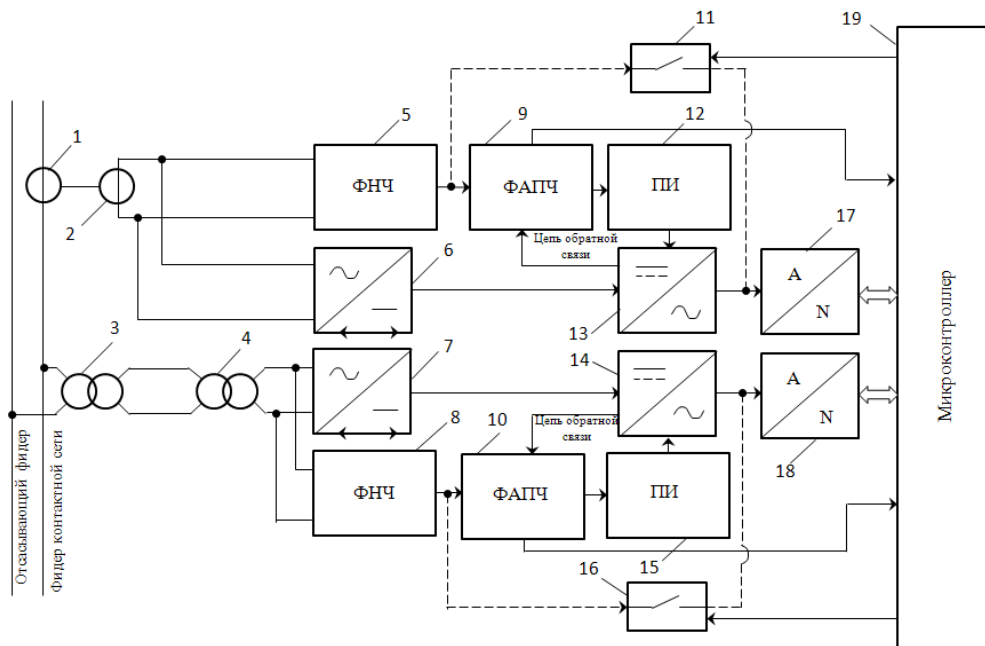


Рисунок 61 - Структурная схема устройства фильтрации и выделения первой гармоники тока и напряжения на основе фазовой автоподстройки частоты

Целью предлагаемого технического решения является повышение точности определения начальных фаз измеряемых сигналов. В предложенной схеме сигналы с выхода приборных измерительных трансформаторов напряжения и тока поступают на фильтры низких частот 5 и 8 для исключения высших гармоник и уменьшения погрешности выделения первой гармоники. Параллельно сигналы с измерительных трансформаторов выпрямляются с помощью двухполупериодных выпрямителей 6 и 7. С выхода фильтров измеряемые сигналы тока и напряжения подаются на входы схем фазовой автоподстройки частоты 9 и 10, на выходе которых, при совместной работе с преобразователями импульсов 12 и 15, образуются управляющие сигналы, передние и задние фронты которых совпадают по фазе с измеряемыми сигналами при их переходе через нулевые значения. Управляющие сигналы задают работу транзисторных ключей квазирезонансных инверторов 13 и 14. Питающие напряжения, пропорциональные амплитудным значениям тока и напряжения на выходе измерительных трансформаторов 2 и 4, подаются на транзисторные ключи инверторов 13 и 14 с целью формирования первых гармоник измеряемых сигналов. При наличии двухполупериодных выпрямителей и сглаживающих емкостей в выпрямителях 6 и 7, выпрямленное постоянное выходное напряжение близко к амплитудному переменному входному напряжению в режиме холостого хода [73]:

$$U_{\text{вых}} = 1.41 \cdot U_2, \quad (32)$$

где U_2 - действующее напряжение на вторичной обмотке измерительного трансформатора тока или напряжения.

В схеме анализируемого устройства с целью повышения надежности ее работы предусмотрены резервные цепи в обход ФАПЧ. В случае неисправности схемы ФАПЧ, преобразователя импульсов или инвертора, происходит подача

управляющих сигналов с микроконтроллера на электронные ключи 11 и 16, реализующие обходные цепи.

С выходов инверторов 13 и 14 выделенные первые гармоники тока и напряжения подаются на входы АЦП 17 и 18 и далее с выходов АЦП измерительные входы терминала МРЗ.

Поскольку описанное устройство фильтрации и выделения первой гармоники планируется интегрировать в работу типовой МРЗ ЦЗА – 27,5 – ФТС, его показатели надежности и безопасности должны соответствовать требуемым, предъявляемым к терминалам релейных защит железных дорог переменного тока.

3.3 Оценка надежности и безопасности устройства фильтрации и выделения первой гармоники тока и напряжения на основе фазовой автоподстройки частоты

На рисунке 62 представлена принципиальная схема устройства фильтрации и выделения первой гармоники тока и напряжения на основе фазовой автоподстройки частоты, реализованная на логических микросхемах.

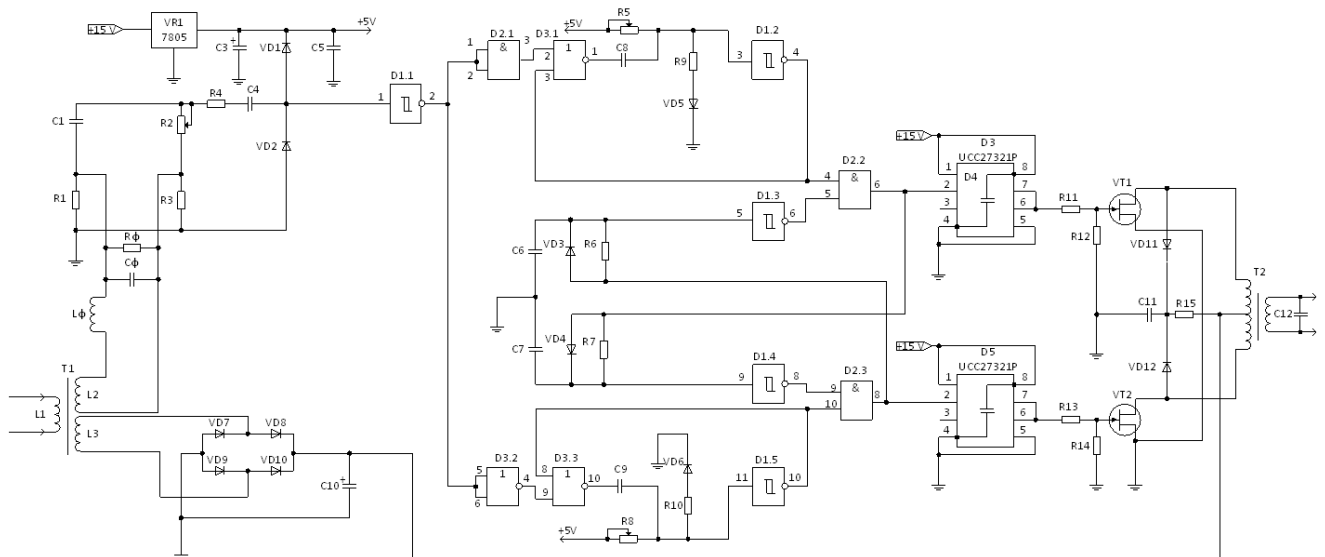


Рисунок 62 - Схема устройства фильтрации и выделения первой гармоники тока и напряжения на основе фазовой автоподстройки частоты, реализованная на логических микросхемах

Порядок работы схемы основан на предварительной фильтрации сигнала, фиксации нулевых отметок времени, формировании управляющих импульсов, выпрямлении сигнала и последующем инвертировании с получением чистого выходного синусоидального сигнала по частоте, фазе и амплитуде совпадающего с измеренным сигналом, представляющим, по сути, его первую гармонику.

Вторичная обмотка L 2 трансформатора T 1 гальванической развязки и предварительного масштабирования входных сигналов тока или напряжения подключается к фильтру нижних частот Lф, Сф, настроенному на третью гармонику (частота 150 Гц), который позволяет исключить составляющие высших гармоник и значительно повысить точность фазы восстановленной первой гармоники на выходе устройства. Сигнал с вторичной обмотки L3 трансформатора T 1 выпрямляется на диодном мосте VD 7-VD 10 и сглаживается конденсатором С 10. Выпрямленный сигнал соответствующей амплитуды подается в качестве питающего напряжения на среднюю точку трансформатора T 2 и попеременно пропускается через его полуобмотки при поочередном открытии транзисторных ключей VT 1 и VT 2, образуя в выходном колебательном контуре синусоидальный сигнал первой гармоники.

В рассматриваемой схеме напряжение с выхода фильтра нижних частот приложено к двум параллельно соединенным токовым цепям: цепь R 1, R 2 и цепь R 3, С 1, образующим фазовращатель сигнала. Фазовращатель сохраняет неизменной по величине амплитуду измеряемого сигнала при возможном изменении его частоты и фазы.

Далее измеряемый сигнал подается на вход триггера Шмитта D 1.1 - чувствительного элемента системы подстройки фазы. Ограничение величины входного напряжения от +5,5 до - 0,5 В осуществляется диодами VD 1, VD 2.

При увеличении сигнала с фазовращателя от нуля в сторону положительного значения триггер Шмитта на своем выходе скачком изменяет сигнал с логического «0» на «1». При уменьшении сигнала от положительных значений к нулю и далее в отрицательную область, триггер Шмитта снова скачком изменяет сигнал на своем выходе с логической «1» на «0».

Таким образом, на выходе 2 элемента D 1.1 вместо синусоидального сигнала амплитудой 110 В получается однополярный меандр с размахом амплитуды от 0,3 до 4,7 В.

Импульсы с выхода D 1.1 поступают через повторитель D 2.1 и инвертор D 3.2 на два одинаковых, но работающих в противофазе канала управления длительностью импульсов управляющих входов транзисторов VT 1 и VT 2. Длительность импульсов зависит от изменения частоты измеряемого сигнала на входе схемы и может регулироваться резисторами R 5 и R 8 в диапазоне от 5% до 90%.

Каналы преобразования положительной и отрицательной полуволны схемы ФАПЧ полностью аналогичны. Каждый канал выполнен на одновибраторе, состоящим из двух логических элементов, триггере Шмитта и двух конденсаторах. Данная схема обеспечивает помехозащищенность ФАПЧ от кратковременных всплесков напряжения. Таким образом, в схеме устройства фильтрации и выделения первой гармоники реализована первая ступень защиты от помех.

Вторая ступень защиты устройства по возможному действию сквозных токов обеспечивается драйверами транзисторов D 3 и D 5 и реализована путем создания гарантированной задержки между открытием второго транзистора и закрытием первого.

Практическое применение методики определения фазных координат контролируемых МРЗ электрических параметров СТЭ подтверждено результатами имитационного моделирования, представленными во второй главе.

В настоящее время появилась целая линейка недорогих и удобных схем фазовой автоподстройки частоты в интегральном исполнении. В связи с этим, в дальнейшем предлагается перейти к принципиальной схеме устройства фильтрации и выделения первой гармоники на основе схем ФАПЧ, используя при этом интегральную микросхему марки 74НС4046 (рисунок 63) [43, 99-101].

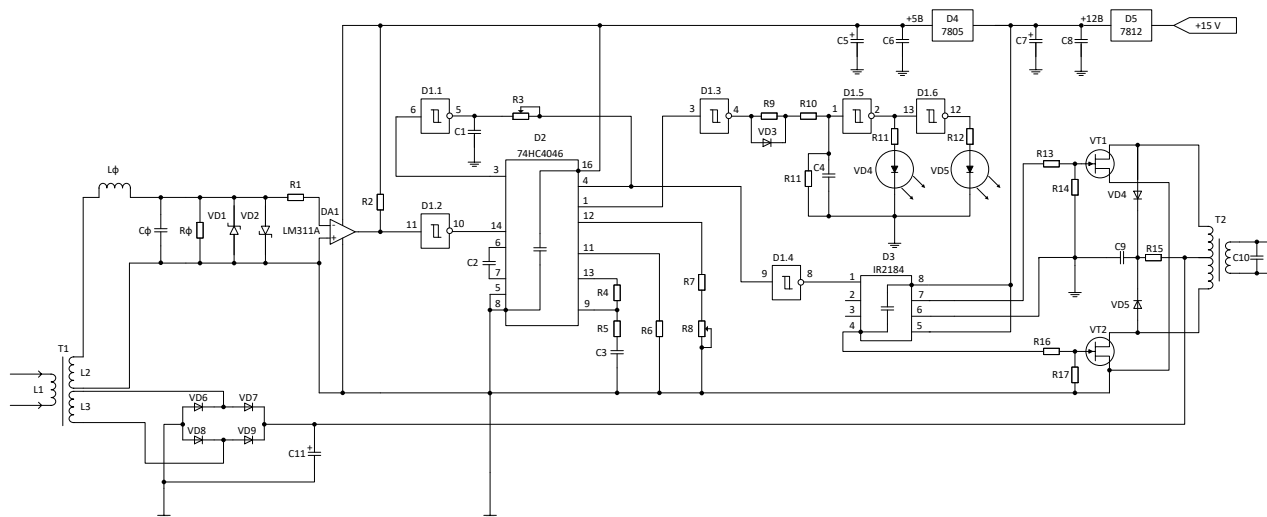


Рисунок 63 - Схема устройства фильтрации и выделения первой гармонике тока и напряжения на основе фазовой автоподстройки частоты (на специализированной интегральной микросхеме ФАПЧ (74НС4046))

Расчет показателей надежности устройства фильтрации и выделения первой гармонике тока и напряжения на основе фазовой автоподстройки частоты производился в соответствии с [102-106].

В работе [107] представлены результаты расчета показателей надежности устройства фильтрации и выделения первой гармонике тока и напряжения на основе фазовой автоподстройки частоты. Фактическое значение вероятности безотказной работы предложенного устройства (за период эксплуатации 20 лет) составило $P(t) = 0,930$.

С целью сравнительной оценки полученных значений надежности работы устройства фильтрации и выделения первой гармонике тока и напряжения на основе фазовой автоподстройки частоты проанализируем показатели надежности наиболее распространенных на сети российских железных дорог МРЗ ФКС переменного тока (БМРЗ – 27,5 – ФКС и ЦЗА – 27,5 – ФТС). Средняя наработка на отказ терминалов БМРЗ (согласно заводским характеристикам) составляет 18000, а терминалов ЦЗА - 50000 часов соответственно. Фактические значения вероятности безотказной работы терминалов БМРЗ и ЦЗА, приведенные в работах [28, 29, 108], за 5 лет эксплуатации составили 0,90625 и 0,92307 соответственно. Таким образом, принимая во внимание значение вероятности

безотказной работы устройства фильтрации и выделения первой гармоники тока и напряжения на основе фазовой автоподстройки частоты $P(t) = 0,930$, определенное за гораздо больший период эксплуатации (20 лет), предлагаемое устройство отвечает требованиям надежности, предъявляемым к микропроцессорным устройствам релейной защиты железных дорог переменного тока.

В случае интеграции устройства фильтрации и выделения первой гармоники тока и напряжения на основе фазовой автоподстройки частоты в типовой терминал МРЗ, необходимо обеспечить требуемый уровень безопасности работы в случае возможного отказа одного или нескольких его элементов (рисунок 64).

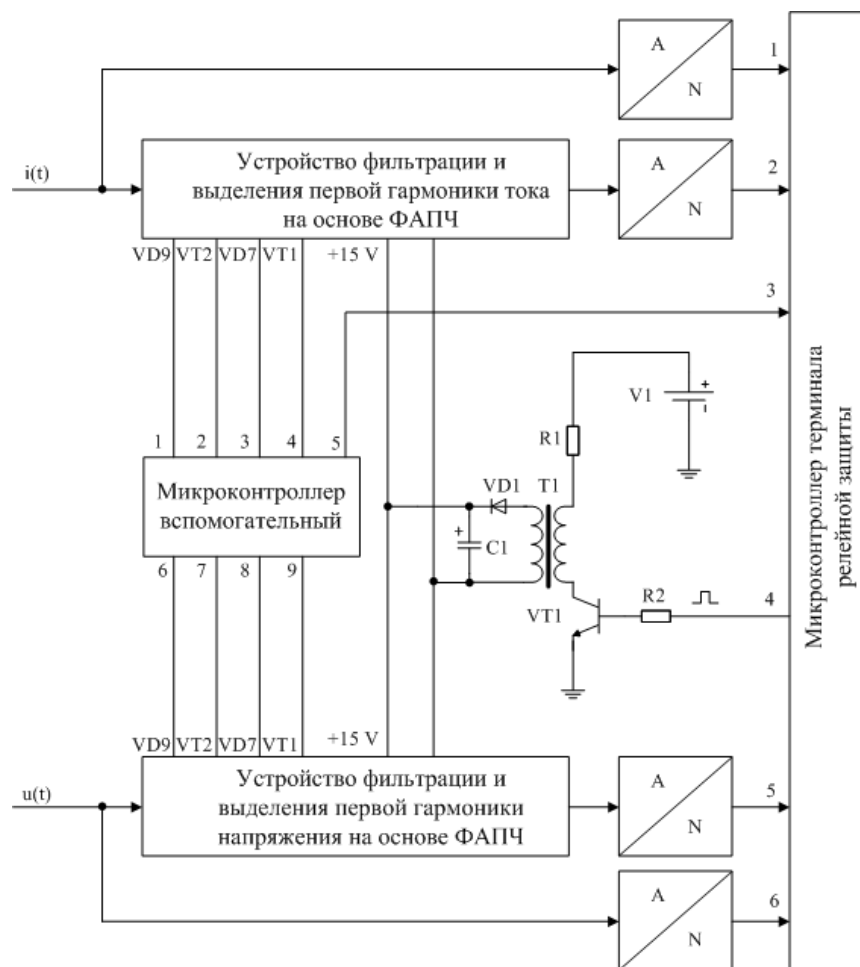


Рисунок 64 - Структурная схема интеграции устройства фильтрации и выделения первой гармоники тока и напряжения на основе фазовой автоподстройки частоты в АП МРЗ ФКС

Данное техническое решение подразумевает введение дополнительного схемного контроля положительных и отрицательных полуволн напряжения на шунтовых измерительных резисторах, включенных последовательно с выпрямительными диодами VD 7 и VD 9 (шунтовые резисторы на рисунке 61 не показаны) с сигналами напряжения на шунтовых резисторах, включенных в цепи стоков транзисторов VT 1, VT 2 (шунтовые резисторы на рисунке 61 не показаны). Сравнимые сигналы путем подачи на аналоговые входы (1-4, 6-9) вспомогательного микроконтроллера (рисунок 63) анализируются им с определенной заданной периодичностью. При нарушении нормального режима работы одного или двух каналов управления одновременно, вспомогательный микроконтроллер изменяет сигнал на дискретном выходе 5 с логической «1» на логический «0». Данный сигнал поступает на дискретный вход 3 микроконтроллера терминала релейной защиты, который в свою очередь обрывает генерацию управляющих импульсов на своем дискретном выходе 4, что приводит к уменьшению напряжения на конденсаторе С 1 до нулевого значения. Соответственно, напряжение в цепи питания устройств фильтрации и выделения первой гармоники по току и напряжению также будет иметь нулевое значение. При непрерывном действии логического «0» на входах 2 и 5 микроконтроллера терминала релейной защиты анализ дискретных отчетов измеряемых сигналов тока $i(t)$ и напряжения $u(t)$ осуществляется напрямую через дискретные входы 1 и 6 микроконтроллера, минуя устройства фильтрации и выделения первой гармоники тока и напряжения.

Цепь выключения электропитания устройств фильтрации и выделения первой гармоники по току и напряжению основана на работе схемы безопасного декодера (источник постоянного напряжения V 1, импульсный трансформатор Т 1, резисторы R 1 и R 2, транзистор VT 1, диод VD 1, конденсатор С 1) (рисунок 64).

Безопасность схемы декодера, при пробое (на короткое замыкание) транзистора VT 1 обеспечивается в результате двойного преобразования входных импульсных сигналов с выхода 4 МКИЗ терминала МРЗ. Дифференцирование

сигнала осуществляется импульсным трансформатором Т1. Интегрирование с помощью диода VD1 и конденсатора С1 [71]. При нарушении любого из этих двух преобразований сигналов на выходе схемы декодера будет отсутствовать напряжение. Трансформатор, работая в соответствии с законом электромагнитной индукции обладает исключительным свойством – не трансформировать постоянный сигнал на выходную обмотку:

$$u_L = -L \frac{di}{dt}, \quad (39)$$

Таким образом, любой отказ в цепи выключения электропитания устройств фильтрации и выделения первой гармоники по току и напряжению приводит к их обесточиванию. А при непрерывном действии логического «0» на входах 2 и 5 микроконтроллера терминала релейной защиты анализ дискретных отчетов измеряемых сигналов тока $i(t)$ и напряжения $u(t)$ осуществляется напрямую через дискретные входы 1 и 6 микроконтроллера, минуя устройства фильтрации и выделения первой гармоники тока и напряжения на основе схем ФАПЧ.

Проведенные исследования показали, что надежность разработанного устройства фильтрации и выделения первой гармоники на основе схемы ФАПЧ соответствует требованиям, предъявляемым к железнодорожным устройствам МРЗ, а безопасность работы устройства в составе терминала релейной защиты обеспечена соответствующими схемотехническими решениями. Любые отказы устройств фильтрации и выделения первой гармоники на основе схемы ФАПЧ, включая цепь выключения электропитания, приводят к переходу в штатный режим работы терминала релейной защиты [107].

3.4 Разработка автоматизированной подсистемы шаблонов аварийных ситуаций

Ранее в работе указывалось, что штатные терминалы МРЗ имеют функцию записи осциллограмм электрических параметров только в пределах коротких

интервалов времени их аварийного срабатывания. Предложенная во второй главе методика непрерывного мониторинга со сжатием сплайн-интерполяцией контролируемых МРЗ электрических параметров позволяет осуществлять постоянную, непрерывную запись осциллограмм работы терминалов релейной защиты. Техническая реализация методики on-line визуализации требует независимой системы измерений электрических параметров СТЭ, ввиду отсутствия доступа в схемные решения штатных терминалов МРЗ. Саму запись осциллограмм контролируемых электрических сигналов целесообразно осуществлять синхронно со сложившимися параметрами текущей поездной ситуации ("Урал-ВНИИЖТ" (ГИД)) в привязке к схеме питания и секционирования контактной сети и режимам работы объектов СТЭ участка железной дороги. Первую задачу предлагается решить путем применения независимой автоматизированной подсистемы измерения электрических параметров на основе электронного двадцатирядного USB осциллографа и вспомогательного микроконтроллера (рисунок 65) [108, 109, 110, 111, 112].

Информация с выхода измерительных трансформаторов тока и напряжения или после предварительной обработки устройствами фильтрации и выделения первой гармоники тока и напряжения поступает на измерительные входы цифрового USB осциллографа [111]. Далее, через вспомогательный микроконтроллер, она поступает на ПЭВМ дежурного по тяговой подстанции и фиксируется в виде интерполяционных сплайнов Акимы.

Система ГИД обеспечивает контроль перевозочного процесса на всех уровнях управления эксплуатационной работой. К информационным ресурсам системы ГИД, в том числе, имеется доступ и со стороны дежурного персонала каждой тяговой подстанции, позволяющим работникам оценивать текущую поездную ситуацию [113-117]. В состав системы ГИД, помимо информации о количественных показателях движущихся поездов, неизменно входит подсистема получения информации с устройств сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) о состоянии занятости или свободности изолированных блок-участков и секций на станциях и перегонах, о показаниях светофоров, установке маршрутов

движения, положении стрелок и т.д. В системе ГИД также имеются немаловажные функции расчета среднего веса, длины и скорости движения поездов за определенный или заданный период времени [113-117].

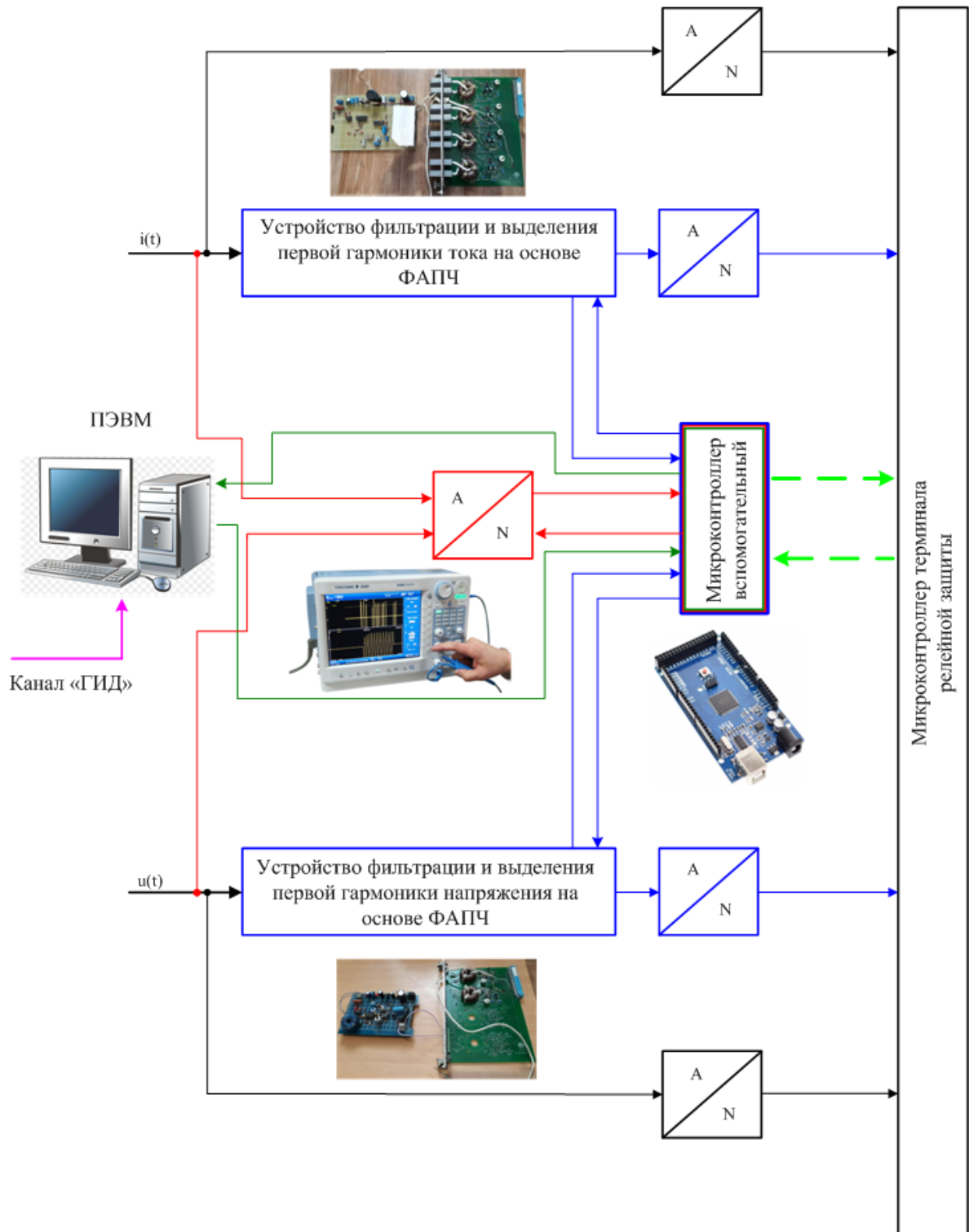


Рисунок 65 – Структурная схема системы непрерывного мониторинга со сжатием сплайн-интерполяцией контролируемых МРЗ электрических параметров

Поскольку у дежурного персонала тяговых подстанций уже имеется доступ к автоматизированной системе ГИД, то для решения второй поставленной задачи не потребуются дополнительных финансовых и организационных затрат, а необходимо будет лишь открыть и предоставить соответствующий доступ к необходимым информационным ресурсам.

Для повышения качества анализа аварийных осциллограмм, а также для идентификации, выделения и структурирования к этому приведших причин предлагается дополнительно использовать результаты имитационного моделирования данной поездной ситуации в ПК «КОРТЭС» (с воспроизведением всех рабочих параметров СТЭ) [36-38, 118-120].

Результатом имитационного моделирования будут являться следующие параметры, характеризующие текущий режим работы СТЭ участка:

- уровни напряжения на шинах ТП и на токоприемнике электровоза;
- расход активной и реактивной электроэнергии на тягу поездов;
- потери электроэнергии в контактной сети и в тяговых трансформаторах подстанций;
- температуры нагрева проводов ФКС подстанций участка;
- температуры нагрева обмоток и масла в тяговых трансформаторах подстанций;
- параметры, ограничивающие пропускную способность, и т.д. [121-123].

Полученные таким образом данные будут сопоставляться с данными, снятыми с автоматизированной системы ГИД [8] и с системы непрерывного мониторинга со сжатием сплайн-интерполяцией контролируемых МРЗ электрических параметров [43] и являться основополагающими параметрами (исходными данными) для формирования шаблона, верифицирующего каждую аварийную ситуацию.

Таким образом, для каждого аварийного отключения АП МРЗ ФКС будет создан свой (уникальной) шаблон аварийной ситуации. База таких шаблонов будет постоянно пополняться и храниться на ПЭВМ дежурного персонала ТП.

Итоговая структурная схема независимой автоматизированной подсистемы шаблонов аварийных ситуаций приведена на рисунке 66.

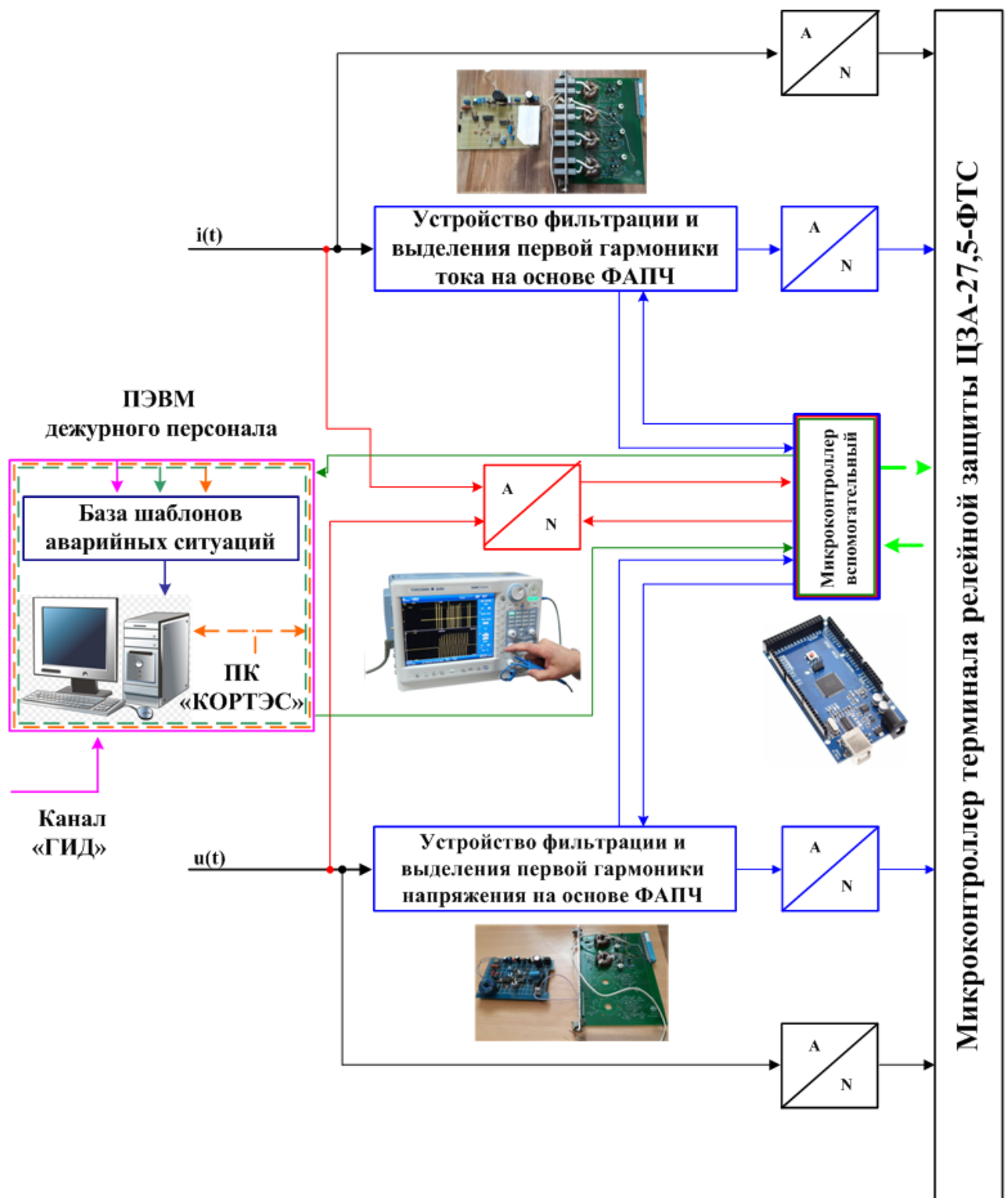


Рисунок 66 - Итоговая структурная схема независимой автоматизированной подсистемы шаблонов аварийных ситуаций

Предлагаемые автоматизированные подсистемы (обозначены розовыми, зелеными и оранжевыми линиями) будут отвечать за on-line визуализацию, обработку (вспомогательный микроконтроллер) и хранение осциллограмм тока и напряжения, протекающих в контактной сети (первая часть исходной информации для формирования базы шаблонов аварийных ситуаций); программные средства «ГИД» и «КОРТЭС» - участвуют в формировании базы шаблонов аварийных ситуаций в качестве второй составляющей.

Отдельно следует отметить, что в предложенном схемотехническом решении (рисунок бб) в виде зеленых штрихпунктирных линий показана возможная взаимосвязь (передача и обмен данными), которая позволит завести все информационные связи со вспомогательного микроконтроллера на основной микроконтроллер МКИЗ БЗА (допустим в случае полноценной интеграции предлагаемых автоматизированных систем непосредственно в сам терминал при их выпуске в объемах промышленного производства на заводе-изготовителе).

3.5 Разработка автоматизированной подсистемы микропроцессорной релейной защиты в составе нижнего и среднего уровней АСУ ТП переменного тока

Ранее неоднократно отмечалось, что в настоящее время на Забайкальской железной дороге среди устройств МРЗ фидеров контактной и тяговой сети нашли применение устройства нескольких фирм-производителей, среди которых следует отметить ЦЗА-27,5-ФТС и ИнТер. Алгоритмы работы указанных микропроцессорных устройств релейной защиты во многом схожи и имеют условное разделение на ступени, которые получили развитие еще в период применения устройств на релейной основе.

МРЗ ЦЗА-27,5-ФТС обеспечивает следующие уровни защиты [28, 29]:

1. Токовая отсечка (ТО) – ступень защиты с мгновенным действием на отключение по действующему значению основной гармоники тока.
2. Токовая отсечка (ТО 2) – ступень защиты по мгновенному значению тока мгновенного действия на отключение.

3. Ненаправленная дистанционная защита (ННДЗ) - степень защиты на отключение по значению модуля полного сопротивления.
4. Направленная дистанционная защита (НДЗ) - степень защиты от аварийных режимов.

В штатном алгоритме НДЗ предусмотрена отстройка от пусковых токов электровозов путем физического «загрубления» значения тока уставки на 20 % в большую сторону.

В рамках разработки АП МРЗ ФКС с целью предотвращения аварийных отключений от кратковременных переходных процессов и пусковых токов, протекающих в контактной сети, предлагается дополнить штатный алгоритм работы НДЗ терминала ЦЗА-27,5-ФТС параллельной ветвью с алгоритмом, разработанным на основе имитационной модели процесса краткосрочного прогнозирования изменения контролируемых МРЗ электрических параметров [81]. Дополнительная ветвь с элементами прогнозирования может быть включена / отключена программным ключом, а в случае включения процесс срабатывания / несрабатывания предлагаемого алгоритма будет подтверждаться фиксацией соответствующих цифровых сигналов, дополнительно встраиваемых в тело стандартной аварийной осциллограммы. При этом стандартный ход работы штатного алгоритма МРЗ не будет нарушен. Блочная схема имитационной модели процесса краткосрочного прогнозирования изменения контролируемых МРЗ электрических параметров представлена во второй главе (рис. 58).

Работа АП МРЗ ФКС в части устройства краткосрочного прогнозирования состоит в снятии входных контролируемых сигналов тока и напряжения с измерительных трансформаторов 1 и 2, выходы которых подключены к модулям задания управляющих опорных сигналов по току 3 и напряжению 4 на основе ФАПЧ, с которых сигналы далее поступают в модули цифровых фильтров тока (5) и напряжения (6) и, далее, в дискретном виде сохраняются в модулях регистров дискретных значений тока и напряжения 7 и 8 соответственно, на основе которых в блоке определения текущих и прогнозных электрических параметров контролируемых сигналов тока и напряжения происходит определение частоты,

начальной фазы и первой производной прогнозируемых функций тока и напряжения, на основе которых в зависимости от численных значений соответствующих дискретных отсчетов тока и напряжения находятся значения амплитуд прогнозируемых функций в одноименных модулях 17 - 20 одним из двух способов: либо по значениям первой производной, определенной вблизи нулевых отметок контролируемых функций, либо по трем ненулевым смежным дискретным измеренным значениям тока или напряжения, снятым вблизи локальных экстремумов. На основе найденных в модулях 17 - 20 параметров прогнозируемых функций тока и напряжения осуществляется проверка условий для принятия соответствующего решения в блоке принятия решения на аварийное отключение защищаемого объекта. При проверке в модуле сравнения 22 и превышении амплитуды прогнозной функции тока увеличенного на 20 % (по условиям пусковых токов локомотивов) значения уставки, осуществляется проверка по критическому значению тока в модуле 23. Если значение амплитуды прогнозной функции тока меньше максимально допустимого значения (3000 А), начинается отчет времени длительностью 0,02 с (2 полупериода тока промышленной частоты) в модуле 24 и последующая запись в модуль регистра 25 значений амплитуд прогнозируемой функции тока за три прогнозных полупериода частоты сигнала. В случае достижения значений амплитуды прогнозной функции тока на двух крайних полупериодах менее увеличенного на 20 % значения уставки, в модуле 26 принимается решение о сохранении текущего режима работы защищаемого объекта, в случае же превышения значений амплитуды прогнозной функции тока на двух крайних полупериодах величины уставки, увеличенной на 20 %, принимается решение об аварийном отключении защищаемого объекта. В случае превышения значения амплитуды прогнозируемой функции тока максимально допустимого значения (3000 А), даже, в пределах одного полупериода принимается решение об аварийном отключении защищаемого объекта. Аналогичным образом действует алгоритм отключения защищаемого объекта по результатам оценки значений амплитуд прогнозной функции напряжения. При проверке в модуле сравнения 28 и

уменьшении значения амплитуды прогнозируемой функции напряжения, уменьшенного на 20 % (по условиям пусковых токов локомотивов) значения уставки, в модуле 30 осуществляется проверка на превышение минимального допустимого уровня напряжения в контактной сети. Если значение амплитуды прогнозируемой функции напряжения больше 19 кВ, начинается отчет времени длительностью 0,02 с (два полупериода тока промышленной частоты) в модуле 31 и дальнейшая запись в модуле регистра 32 значений амплитуд прогнозируемой функции напряжения за три прогнозных полупериода частоты сигнала. В случае действия значений амплитуды прогнозной функции напряжения на двух крайних полупериодах более уменьшенного на 20 % значения уставки, в модуле 33 принимается решение о сохранении текущего режима работы защищаемого объекта, в случае же уменьшения значений амплитуды прогнозной функции напряжения на двух крайних полупериодах величины уставки, уменьшенной на 20 %, принимается решение об аварийном отключении защищаемого объекта. В случае уменьшения значения амплитуды прогнозируемой функции напряжения ниже минимального допустимого уровня напряжения в контактной сети (19 кВ), даже, в пределах одного полупериода принимается решение об аварийном отключении защищаемого объекта. Модуль логической операции ИЛИ (35), выполняет функцию выдачи сигнала высокого уровня в модуль 36 на отключение выключателя фидера контактной сети в любом из четырех указанных случаев.

Аналитика функционирования предлагаемых алгоритмов краткосрочного прогнозирования представлена во второй главе данной работы.

Определение значений угловой частоты, начальных фаз и разности фаз прогнозных функций тока и напряжения осуществляется на основе значений времени двух или трех соседних нулевых отметок, фиксированных модулями задания управляющих опорных сигналов по току 3 и напряжению 4 на основе ФАПЧ и их последующего анализа.

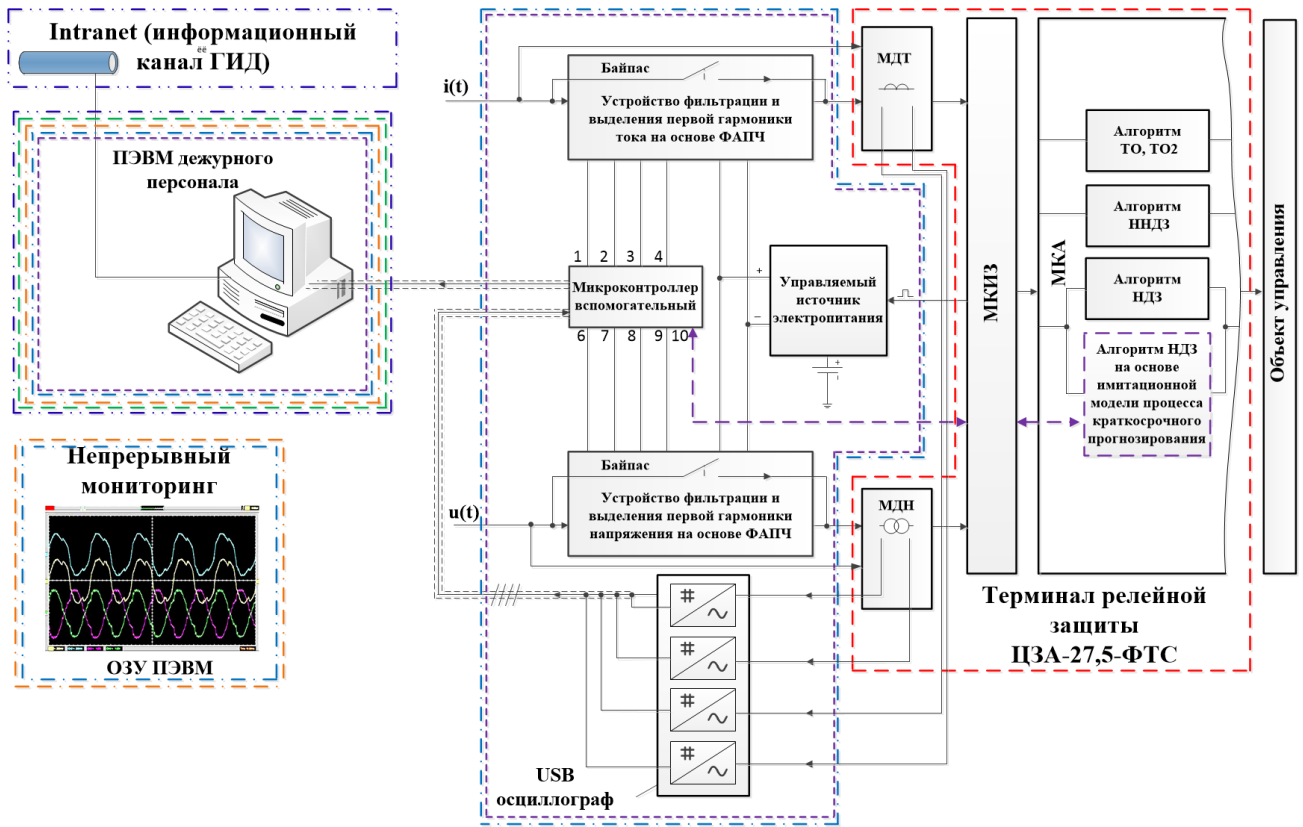
Определение значений первых производных контролируемых сигналов тока и напряжения посредством подпрограмм 13 и 14 производится по двум соседним измеренным дискретным значениям вблизи соответствующих нулевых

отметок, зафиксированных модулями задания управляющих опорных сигналов по току 3 и напряжению 4 на основе ФАПЧ.

Расчет значений амплитуд прогнозных функций тока и напряжения осуществляется либо посредством подпрограмм 17 и 19 по значениям первых производных контролируемых сигналов, определенных вблизи соответствующих нулевых отметок, либо подпрограммами 18 и 20 по трем текущим измеренным значениям тока (напряжения), снятым до или после перехода контролируемых сигналов через нулевые отметки.

Активность подпрограмм 17, 19 или 18, 20 в каждый текущий момент времени зависит от фазы контролируемого сигнала тока или напряжения.

На рисунке 67 представлена обобщенная структурная схема АП МРЗ ФКС переменного тока [124-126].



- 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 67 - Обобщенная структурная схема АП МРЗ ФКС переменного тока

Предлагаемые аппаратные средства в рамках АП МРЗ в виде устройства фильтрации и выделения первой гармоники тока и напряжения на основе фазовой автоподстройки частоты, вспомогательного микроконтроллера, цифрового USB-осциллографа и цифрового канала ГИД обеспечат работоспособность предлагаемых программных средств и необходимое сопряжение штатных терминалов МРЗ и ПЭВМ дежурного персонала ТП.

3.6 Выводы:

1. На базе разработанной ранее методики фильтрации и выделения первой гармоники тока и напряжения на основе фазовой автоподстройки частоты предложено техническое решение, которое обеспечивает снижение абсолютной погрешности определения начальных фаз контролируемых сигналов на 4 % по сравнению со штатными средствами ЦЗА-27,5-ФТС.

2. Подтверждена надежность и безопасность предложенного устройства фильтрации и выделения первой гармоники тока и напряжения на основе фазовой автоподстройки частоты. При этом показано, что значение вероятности безотказной работы данного устройства соответствует фактическому значению вероятности безотказной работы терминалов ЦЗА-27,5-ФТС.

3. Предложена техническая реализация автоматизированной подсистемы шаблонов аварийных ситуаций на основе методики непрерывного мониторинга со сжатием сплайн-интерполяцией контролируемых МРЗ электрических параметров (включая электронный двадцатиразрядный USB-осциллограф и вспомогательный микроконтроллер) с их одномоментной привязкой к графику исполненного движения поездов.

4. Разработана структурная схема автоматизированной подсистемы микропроцессорной релейной защиты фидеров контактной сети в составе нижнего и среднего уровней АСУ ТП переменного тока на основе предложенных ранее методик, имитационной модели и устройств.

Заключение

Основные результаты диссертационной работы состоят в следующем:

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 сокращений и условных обозначений

- МРЗ – микропроцессорная релейная защита
- ФКС – фидер контактной сети
- ФТС – фидер тяговой сети
- АСУ – автоматизированная система управления
- ТП – тяговая подстанция
- ГДП – график движения поездов
- РЗиА – релейная защита и автоматика
- УЭЗФ – устройство электронной защиты фидеров
- АЗм – автоматизированная защита модернизированная
- БМРЗ – блок микропроцессорный релейной защиты
- ИнТер – интеллектуальный терминал
- ЦЗА – цифровая защита и автоматика
- МДТ – модуль датчика тока
- МДН – модуль датчика напряжения
- МКИЗ – модуль контроллера измерений и защит
- МКА – модуль контроллера автоматки
- АЦП – аналого-цифровой преобразователь
- ПЭВМ – персональная электронно-вычислительная машина
- АРМ – автоматизированное рабочее место
- АП – автоматизированная подсистема
- ПК – программный комплекс
- КОРТЭС – комплекс расчетов тягового электроснабжения
- ПС – поста секционирования
- СТЭ – система тягового электроснабжения
- ЦФ – цифровой фильтр
- ФАПЧ – фазовая автоподстройка частоты
- АПВ – автоматическое повторное включение
- БЗА – блок защит и автоматки

ИТ – измерительный трансформатор

ФНЧ – фильтр низких частот

ЗабЖД – Забайкальская железная дорога

ТД – тяговый двигатель

Список литературы

1. Распоряжение ОАО «РЖД» от «15» декабря 2011 г. № 2718р «ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СТРАТЕГИЯ ХОЛДИНГА «РОССИЙСКИЕ ЖЕЛЕЗНЫЕ ДОРОГИ» НА ПЕРИОД ДО 2015 ГОДА И НА ПЕРСПЕКТИВУ ДО 2030 ГОДА». – М. 2011. – 97 с.: ил.
2. Фигурнов Е. П. Релейная защита: учебник для студентов вузов железнодорожного транспорта: в 2 ч. Ч. 1: Основы релейной защиты // Изд. 3-е перераб. и доп. М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте: Транспортная книга, 2009. 414 с.
3. Пинчуков П.С., Макашева С.И., Костин А.П. Комплексная оценка работы релейной защиты тяговой сети переменного тока // Вестник Брянского государственного технического университета. 2020. № 7 (92). С. 27-38.
4. ГОСТ Р 55105-2019. ОПЕРАТИВНО-ДИСПЕТЧЕРСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Противоаварийная автоматика энергосистем. Нормы и требования. М. - Стандартинформ, 2020. – 24 с.
5. Приказ Министерства транспорта РФ от 18 июля 2018 г. N 266 "Об утверждении Методики определения пропускной и провозной способностей инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования"
6. ГОСТ 34530 – 2019. ТРАНСПОРТ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ. Основные понятия. Термины и определения. М. - Стандартинформ, 2019. – 55 с.
7. 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.
8. <http://gidural.ru/doku.php> - ГИД "Урал-ВНИИЖТ" [ГИД УРАЛ-ВНИИЖТ: Справочная система] (gidural.ru)

9. 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. – EDN MNVMOU.
10. Агафонов, А.И. Современная релейная защита и автоматика электроэнергетических систем: учебное пособие / А. И. Агафонов, Т. Ю. Бростилова, Н. Б. Джазовский. – 2 изд., перераб. и доп. – Москва; Вологда: Инфа-Инженерия, 2020. – 300 с.: ил., табл.
11. Андреев В. А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: Учеб. для вузов по спец. Электроснабжение. 3 -е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1991. 496 с.
12. Тельманова Е.Д. Электрические и электронные аппараты: учеб. пособие. / Е. Д. Тельманова, - 2-е изд., перераб. и доп. Екатеринбург: Изд-во ГОУ ВПО «Рос. гос. проф.-пед. ун-т», 2010. 131 с.: ил.
13. Макаров, Е.Ф. Справочник по электрическим сетям 0,4 - 35 кВ и 110 - 1150 кВ: в 16 т.: учеб.-произв. изд. / Е.Ф. Макаров; под ред. И.Т. Горюнов, А.А. Любимов, Н.В. Чернобровов. – М.: Папирус Про: Энергия: Альвис, 1999-2013. 640 с.: ил.
14. Елфимов, В. М. Реле направления мощности / В. М. Елфимов; ред. Н. В. Виноградов. – Москва; Ленинград: Энергия, 1966. - 57 с. - (Библиотека электромонтера. Выпуск 189). – Режим доступа: по подписке. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=118079> (дата обращения: 16.07.2022). – Текст: электронный.
15. Белоус, А. И. Основы схемотехники микроэлектронных устройств / А. И. Белоус, В. А. Емельянов, А. С. Турцевич. – Москва: РИЦ Техносфера, 2012. - 472 с. - Режим доступа: по подписке. - URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=214288> (дата обращения: 16.07.2022). – ISBN 978-5-94836-307-3. - Текст: электронный.
16. Евминов, Л. И. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: учеб.-метод. пособие/ Л. И. Евминов, Г. И. Селиверстов; М-во образования

- Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2016. – 531 с.
17. Приказ Минэнерго России от 13.01.2003 N 6 (ред. от 13.09.2018) "Об утверждении Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей". – М. 2021. – 208 с.
 18. СО 153-34.20.501-2003. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. – М.: Энергосервис, 2003. – 213 с.
 19. Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов: Сборник трудов IX Международной научно-технической конференции. - Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2019. – 576 с.
 20. Релейная защита и автоматика в электрических сетях. - М.: Альвис, 2012. - 640 с.
 21. Защита секционированных тяговых сетей переменного тока: монография / П.С. Пинчуков. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2010. – 95 с.: ил.
 22. Реле сопротивления типов КРС 131, КРС 132, КРС 121. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. ОБК 469036. Издание 16. – 15 с.
 23. В.Г. Гловацкий, И.В. Пономарев. Современные средства релейной защиты и автоматике электросетей. – М.: АНО «Сотрудничество», 2006. – 612 с.: ил.
 24. Инструкция по оперативному обслуживанию устройств РЗА АЗм на ЗабЖД. Чита: ЗабНТЭ, 2020. - 12 с.
 25. ДИВГ.648228.070-12 РЭ. Блок микропроцессорный релейной защиты БМРЗ-ФКС. Руководство по эксплуатации. НТЦ «Механотроника» 01.02.2016 г. – 64 с.
 26. Терминалы интеллектуальные присоединений. Каталог – 155. ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО» 01.2013 г. – 36 с.
 27. АВ093-00-000-00_01 РЭ. Терминал интеллектуальный присоединений 27,5 кВ ИнТер-27,5-ФКС. Руководство по эксплуатации. - 83 с.
 28. 1СР.251. 249-02РЭ. Устройство цифровой защиты и автоматике фидера контактной сети ЦЗА-27,5-ФКС. Руководство по эксплуатации. – 71 с.

29. АВ036-00-000-00РЭ. Устройство цифровой защиты и автоматики фидера тяговой сети 2 x 25 кВ ЦЗА-27,5-ФТС. Руководство по эксплуатации. – 61 с.
30. Дьяков А.Ф., Овчаренко И.И. Микропроцессорная релейная защита и автоматика электроэнергетических систем: Учебное пособие - М.: Издательство МЭИ, 2000. - 199 с.: ил.
31. 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.
32. Захаров, Олег Георгиевич. Аппаратная надежность устройств релейной защиты [Текст] / О. Г. Захаров. - Москва: Энергопрогресс: Энергетик, 2016. - 87 с.: ил., табл.
33. АСУ ФКС-2. ЗВР v 125-0572. Инструкция по работе с программой АСУ-ФКС2. ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО» 21.03.2014 г., С. Петербург. – 14 с.
34. Приказ Минтранса России N 330 от 02.12.2014 г. СВОД ПРАВИЛ «Тяговое электроснабжение железной дороги». - ОАО «РЖД». – 86 с.
35. ГОСТ Р 57670-2017. СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ. Методика выбора основных параметров. – М.: Стандартиформ, 2017. – 52 с.
36. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации.-М.: ООО «Техинформ», 2019. – 634 с.: цв. ил.
37. Комплекс программ для расчётов систем тягового электроснабжения. Общее руководство пользователя. Управляющий программный модуль комплекса «KtMain». М.: АО «ВНИИЖТ», 2018. – 60 с.: цв. ил.
38. Комплекс программ для расчётов систем тягового электроснабжения. Тяговые расчеты. Trek. Руководство пользователя. М.: АО «ВНИИЖТ», 2018. – 18 с.: цв. ил.
39. Режимные карты пропускной способности участков Забайкальской железной дороги. Чита: ЗабНТЭ, 2021. - 16 с.

40. 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.
41. 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.
42. Цифровые технологии в релейной защите и автоматизации / Сборник статей. Выпуск I. – Чебоксары: РИЦ «СРЗАУ». – 2018. – 72 с.
43. 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.
44. Колганова, Е. О. Адаптивное сплайновое многомасштабное преобразование в задачах сжатия графических данных / Е. О. Колганова, А. В. Савченко, И. Е. Ковтонюк // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. – 2013. – № 7-8. – С. 11-15.
45. Кулаков, С. М. Применение сплайнов для адаптивного сжатия сигналов измерительной информации в системах автоматизации технологических процессов / С. М. Кулаков, И. В. Чичерин, В. А. Полетаев // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2005. – № 2(46). – С. 67-70.

46. Афонский А.А., Суханов Е.В. Интерполяция в цифровой осциллографии // Контрольно- измерительные приборы и системы. 2010. № 5. С. 13–46.
47. Болотский, А. В. Интерполяция функций / А. В. Болотский // Университетское образование (МКУО-2016): сборник статей XX Международной научно-методической конференции, Пенза, 07–08 апреля 2016 года / Министерство образования и науки РФ; Пензенский государственный университет. – Пенза: Пензенский государственный университет, 2016. – С. 65-67.
48. Ломакин, Д. В. Интерполяция траектории движения при контурном управлении с использованием полинома Лагранжа / Д. В. Ломакин, А. В. Федотов // Автоматизация, мехатроника, информационные технологии Automation, Mechatronics, Information Technologies : материалы IV Международной научно-технической интернет-конференции молодых ученых, Омск, 14–15 мая 2014 года. – Омск: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Омский государственный технический университет", 2014. – С. 175-179.
49. Мирземагомедова, М. М. Использование интерполяции в цифровой технике / М. М. Мирземагомедова, А. Е. Кельина // Фундаментальные и прикладные проблемы математики, информатики в современной науке: теория и практика актуальных исследований : сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 80-летию Магомедову М-К.М., Махачкала, 19–21 октября 2016 года / Дагестанский государственный технический университет. – Махачкала: Дагестанский государственный технический университет, 2016. – С. 78-81.
50. Афонский, А. А. Измерительные приборы и массовые электронные измерения. Учебное пособие / А. А. Афонский, В. П. Дьяконов. – Москва: СОЛОН-ПРЕСС, 2009. – 541 с. – ISBN 5-98003-290-8.
51. Петров, М. С. Обработка данных моделирования интерполяцией кубическими сплайнами / М. С. Петров, А. В. Зотов // Прикладная

- математика и информатика: современные исследования в области естественных и технических наук : Материалы III научно-практической всероссийской конференции (школы-семинара) молодых ученых, Тольятти, 24–25 апреля 2017 года. – Тольятти: Издатель Качалин Александр Васильевич, 2017. – С. 462-465.
52. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016615787 Российская Федерация. Интерполяция кубическим сплайном и полиномом Фурье: № 2016613679: заявл. 13.04.2016: опубл. 30.05.2016 / В. Д. Кадырова.
53. Квасов, Б. И. Монотонная и выпуклая интерполяция весовыми кубическими сплайнами / Б. И. Квасов // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2013. – Т. 53. – № 10. – С. 1610. – DOI 10.7868/S0044466913100116.
54. Батрак, А. А. Применение методов сплайн-функций при интерполировании / А. А. Батрак // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2002. – № 7. – С. 128-129.
55. Дашян, А. А. Численный метод интерполирования функции сплайнами и вычислительный эксперимент / А. А. Дашян, В. И. Наац // Естественные науки - основа настоящего и фундамент для будущего: Материалы VI-й ежегодной научно-практической конференции Северо-Кавказского федерального университета «Университетская наука - региону», Ставрополь, 02–27 апреля 2018 года. – Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2018. – С. 74-77.
56. Мясников, В. В. Сплайны как средство построения эффективных алгоритмов локального линейного преобразования / В. В. Мясников // Компьютерная оптика. – 2007. – Т. 31. – № 2. – С. 52-68.
57. Халилов, С. П. Повышение эффективности цифровой обработки сигналов на основе сплайн-функций / С. П. Халилов, А. Э. Мирзаев // Big Data and Advanced Analytics. – 2020. – № 6-2. – С. 156-164.

58. Галенин, Д. В. Решение систем линейных алгебраических уравнений матричными методами / Д. В. Галенин, С. С. Бобенко // Развитие науки в современном мире : Материалы Международной (заочной) научно-практической конференции, Душанбе, Таджикистан, 06 июня 2017 года / Под общей редакцией А.И. Вострецова. – Душанбе, Таджикистан: Научно-издательский центр "Мир науки" (ИП Вострецов Александр Ильич), 2017. – С. 43-46.
59. Никонов, О. А. Матричный метод решения систем линейных алгебраических уравнений в инженерных задачах / О. А. Никонов, Е. С. Воробейчикова // Наука - производству: Материалы международной научно-практической конференции, Мурманск, 24–27 марта 2015 года / Мурманский государственный технический университет. – Мурманск: Мурманский государственный технический университет, 2015. – С. 170-173.
60. Монаков, А. А. Основы цифровой обработки сигналов: дискретные сигналы и цифровые фильтры: учебное пособие / А. А. Монаков; А. А. Монаков; Федеральное агентство по образованию, Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования Санкт-Петербургский гос. ун-т аэрокосмического приборостроения. – Санкт-Петербург: ГУАП, 2008. – 111 с. – ISBN 978-5-8088-0387-9.
61. Яковлев, А. Н. Цифровая фильтрация и синтез цифровых фильтров: Учебное пособие / А. Н. Яковлев, Д. О. Соколова. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2012. – 64 с. – ISBN 978-5-7782-1964-9.
62. Ожиганов, А. А. Сравнение цифровых и аналоговых фильтров / А. А. Ожиганов // Вестник магистратуры. – 2017. – № 12-1(75). – С. 28-30.
63. 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.

64. 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.
65. К вопросу о проектировании и эксплуатации микропроцессорных устройств релейной защиты / А. В. Сычев, Л.И. Евминов, В. В. Курганов, А. Н. Гуминский // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. - 2009. - № 4. - С. 73-79.
66. Асланов, А. А. Организация разложения функции в ряд Фурье в системе Mathcad / А. А. Асланов, Н. Г. Мамедова // Актуальные проблемы обучения физико-математическим и естественнонаучным дисциплинам в школе и вузе : VI Межрегиональная научно-практическая конференция учителей, посвященная 75-летию Педагогического института имени В. Г. Белинского, Пенза, 30–31 января 2015 года / под общей редакцией М. А. Родионова. – Пенза: Пензенский государственный университет, 2015. – С. 147-148.
67. Чернышов, А. Д. Быстрые разложения заданной функции на отрезке при использовании полного ряда Фурье / А. Д. Чернышов // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики : сборник трудов Международной научной конференции, Воронеж, 11–13 ноября 2019 года / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет». – Воронеж: Научно-исследовательские публикации, 2020. – С. 1567-1575.
68. Молодид, А. К. Повышение точности разложения функции в ряд Фурье / А. К. Молодид // Вестник научных конференций. – 2020. – № 2-3(54). – С. 57-58.
69. Шагурина, Е. С. Повышение эффективности функционирования в переходных режимах устройств релейной защиты на основе высших гармоник: специальность 05.14.02 "Электрические станции и электроэнергетические системы»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Шагурина Елена Сергеевна. – Иваново, 2012. – 215 с.
70. 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: опублик. 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).

71. Комков, А. Н. Чувствительность цифровых фильтров симметричных составляющих к гармоническому составу напряжения / А. Н. Комков // Газовая промышленность. – 2016. – № 2(734). – С. 49-52.
72. 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.
73. Цокур, Е. И. Методика расчета источника вторичного электропитания с линейным интегральным стабилизатором напряжения: учебное пособие / Е. И. Цокур; Е. И. Цокур; М-во образования и науки Российской Федерации, Федеральное агентство по образованию, Казанский гос. технический ун-т им. А. Н. Туполева. – Казань: Изд-во Казанского гос. технического ун-та, 2006. – 57 с. – ISBN 5-7579-0937-4.
74. Бабенко, В. П. Линейные стабилизаторы напряжения и тока / В. П. Бабенко, В. К. Битюков. – Москва: МИРЭА - Российский технологический университет, 2018. – 148 с. – ISBN 978-5-7339-1478-7.
75. Ежов, В. Б. Отечественные и полупроводниковые приборы и зарубежные аналоги: справочник / В. Б. Ежов, Б. Л. Перельман; Ежов В. Б., Перельман Б. Л. – [Изд. 3-е, перераб. и доп.]. – Москва: НТЦ Микротех, 2005. – 180 с. – ISBN 5-85823-010-5.
76. Ермакова, А. Ю. Об оценке точности прогнозирования состояний динамической системы методом построения аппроксимирующих функций /

- А. Ю. Ермакова // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2018. – № 5. – С. 36-42.
77. Рыбалкин, А. Д. Применение прогнозирования приведенного первичного тока для предотвращения неселективного действия защит в схемах с суммированием токов двух выключателей / А. Д. Рыбалкин, И. А. Ермолкин // Релейная защита и автоматизация. – 2021. – № 2(43). – С. 10-15.
78. Рыбалкин А.Д., Шурупов А.А., Ермолкин И.А. Прогнозирование тока короткого замыкания при насыщении магнитопровода трансформатора тока. Цифровая электротехника: проблемы и достижения. Сборник научных трудов ООО НПП "ЭКРА". Выпуск V. - Чебоксары: РИЦ "СРЗАУ", 2016 г. - 153 с.
79. Патент № 2564041 С2 Российская Федерация, МПК G01R 15/18. Способ прогнозирования и обнаружения насыщения трансформатора тока при симпатическом броске тока: № 2013156178/28; заявл. 17.12.2013; опубл. 27.09.2015 / Ц. Сун; заявитель ШНЕЙДЕР ЭЛЕКТРИК ЭНДЮСТРИ САС.
80. Ганчукова, Д. В. Поиск закономерностей динамики артериального давления на основе аппроксимации экспериментальных данных по критерию гладкости / Д. В. Ганчукова, В. Н. Подладчиков // Системные исследования и информационные технологии. – 2016. – № 1. – С. 63-72. – DOI 10.20535/SRIT.2308-8893.2016.1.07.
81. 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.
82. Бондаренко, В. Е. Анализ энергоэффективности режимов работы электрических систем с тяговыми нагрузками / В. Е. Бондаренко, И. В. Доманский, Г. Н. Костин // Электротехника и электромеханика. – 2017. – № 1. – С. 54-62. – DOI 10.20998/2074-272X.2017.1.09.

83. Марквард К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. - М.: Транспорт, 1982. - 528 с.
84. Луковенко, А. С. Повышение надежности и качества электроснабжения потребителей тяговых подстанций переменного тока: специальность 05.14.02 "Электрические станции и электроэнергетические системы»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Луковенко Антон Сергеевич. – Красноярск, 2016. – 22 с.
85. Герман, Л. А. Совершенствование работы интеллектуальных терминалов для автоматизации электроснабжения тяговой сети переменного тока / Л. А. Герман, Е. В. Новиков // Наука и техника транспорта. – 2015. – № 4. – С. 16-21.
86. Интеллектуальные терминалы для автоматизации электроснабжения / Л. А. Герман, А. В. Саморуков, Д. В. Ишкин, Д. В. Якунин // Локомотив. – 2013. – № 12(684). – С. 39-40.
87. Герман, Л. А. Автоматическое повторное включение фидера 27,5 кВ с контролем короткого замыкания в контактной сети / Л. А. Герман, Д. С. Попов, Д. В. Якунин // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2010. – № 4. – С. 8-12.
88. Величко Е.В. Определение параметров синусоиды по ее значениям в системе точек [Электр. ресурс] // Наукові вісті Далівського університету. 2014. № 11. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvdu_2014_11_9 (дата обращения: 20.02.2018).
89. Попов, А. А. Исследование способа расчета частоты, фазы и амплитуды по точкам путем усреднения / А. А. Попов // Ученые записки Новгородского государственного университета. – 2018. – № 5(17). – С. 21. – EDN SLXDUT.
90. Лоусон Ч. Численное решение задач методом наименьших квадратов / Ч. Лоусон, Р. Хенсон. – М.: Наука, 1986. – 232 с.
91. Бердышев В.И. Аппроксимация функций, сжатие численной информации, приложения / В.И. Бердышев, Л.В., Петрак. – Екатеринбург: Изд-во Уро РАН, 1999. – 296 с.

92. Бахвалов Н.С. Численные методы / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 632 с.
93. Усачев, А. Е. Систематические погрешности измерительных трансформаторов тока: зависимость от величины первичного тока / А. Е. Усачев, Ф. Ф. Муллин // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2004. – № 7-8. – С. 35-40.
94. Патент № 2401434 С1 Российская Федерация, МПК G01R 31/14. Устройство для мониторинга состояния высоковольтных вводов: № 2009115845/28: заявл. 28.04.2009: опубл. 10.10.2010 / Г. М. Цфасман.
95. Патент № 2414720 С2 Российская Федерация, МПК G01R 31/08, H02H 7/26. Устройство управления и защиты присоединений переменного тока системы тягового электроснабжения и система управления тяговой подстанцией с использованием устройств управления и защиты присоединений переменного тока: № 2009108751/07: заявл. 10.03.2009: опубл. 20.03.2011 / А. Д. Кондаков, В. Ф. Грачев, А. В. Саморуков, А. В. Мизинцев.
96. Кирюхина, Е. И. Интеллектуальная релейная защита в электрических сетях / Е. И. Кирюхина // Введение в энергетику: сборник материалов II Всероссийской (с международным участием) молодежной научно-практической конференции, Кемерово, 23–25 ноября 2016 года. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, 2016. – С. 187.
97. Микропроцессорные гибкие системы релейной защиты / В. В. Михайлов, Е. В. Кириевский, Е. М. Ульяницкий [и др.]. – Москва: Энергоатомиздат, 1988. – 240 с. – ISBN 5-283-01065-1.
98. Патент № 2400899 С1 Российская Федерация, МПК H02H 7/26, H02H 3/08. Способ сверхбыстродействующей аварийной защиты элементов электроэнергетических систем переменного тока и устройство для его осуществления: № 2009123086/09: заявл. 16.06.2009: опубл. 27.09.2010 / С. Л. Кужеков, А. А. Пекарский; заявитель Государственное образовательное

учреждение высшего профессионального образования "Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт)".

99. Михалев, П. Микросхемы ФАПЧ и синтезаторы на их основе производства фирмы Analog Devices / П. Михалев // Компоненты и технологии. – 2006. – № 4(57). – С. 48-53.
100. Curtin M., O'Brien P. Phase-Locked Loops for High-Frequency Receivers and Transmitters — Part 1. Analog Dialogue, vol. 33, N3, 1999.
101. Curtin M., O'Brien P. Phase-Locked Loops for High-Frequency Receivers and Transmitters — Part 2. Analog Dialogue, vol. 33, N5, 1999.
102. Боровиков С. М. Расчет показателей надежности радиоэлектронных средств: учеб.-метод. пособие / С.М. Боровиков, И.Н. Цырельчук, Ф.Д. Троян; под ред. С.М. Боровикова. – Минск: БГУИР, 2010. – 68 с.
103. Анищенко, В.А. Основы надежности систем электроснабжения: учеб. пособие для студентов / В.А. Анищенко, И.В. Колосова. – Минск: БНТУ, 2007. – 151 с.
104. Царев, Н. В. Особенности расчета показателей надежности цифровых устройств релейной защиты и автоматики / Н. В. Царев, П. С. Пинчуков // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2019. – № 4(21). – С. 83-87.
105. Пинчуков, П.С. Надежность электроустановок: учеб. пособие / П.С. Пинчуков, М.В. Наконечный. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2015. – 101 с.
106. Количественные требования и средства контроля обеспечения безопасности систем и устройств СЦБ: Организация сотрудничества железных дорог, 2000. – 8 с.
107. 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.

108. 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.
109. 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.
110. 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.
111. 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. Фаренук, 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.

112. 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.
113. Малунова, Д. А. Система взаимодействия и поддержки баз данных пользователей системы ГИД "Урал-ВНИИЖТ" / Д. А. Малунова, А. В. Забродин // Интеллектуальные технологии на транспорте. – 2019. – № 4(20). – С. 5-13.
114. Мусиенко, Н. Н. Анализ участковой скорости в системе гид "Урал - ВНИИЖТ" / Н. Н. Мусиенко, Е. Г. Гусакова // Труды международной научно-практической конференции "транспорт-2015", Ростов-на-Дону, 21–24 апреля 2015 года / ФГБОУ ВПО «РОСТОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ». – Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2015. – С. 176-177.
115. Система ГИД "Урал-ВНИИЖТ": внедрение, модернизация, перспективы развития / Г. А. Кузнецов, С. В. Крашенинников, В. П. Крайсвитный [и др.] // Железнодорожный транспорт. – 2008. – № 2. – С. 15-21. – EDN IJOBMZ.
116. Модернизация системы ГИД "Урал-ВНИИЖТ" / Г. А. Кузнецов, С. В. Крашенинников, В. П. Крайсвитный, Д. А. Матвеев // Автоматика, связь, информатика. – 2016. – № 11. – С. 15-19.
117. ГИД "Урал-ВНИИЖТ": аналитические функции и автоматизация труда диспетчеров / Г. А. Кузнецов, С. В. Крашенинников, В. П. Крайсвитный [и др.] // Железнодорожный транспорт. – 2012. – № 3. – С. 21-25.

118. Комплекс программ для расчётов систем тягового электроснабжения. Расчёты режимов нагрузки системы 27,5 кВ. КА_CN. Руководство пользователя. М.: АО «ВНИИЖТ», 2018. – 17 с.: цв. ил.
119. Комплекс программ для расчётов систем тягового электроснабжения. Расчёты режимов нагрузки и пропускной способности системы 27,5 кВ. КА_PN. Руководство пользователя. М.: АО «ВНИИЖТ», 2018. – 22 с.: цв. ил.
120. Комплекс программ для расчётов систем тягового электроснабжения. Расчёты режимов нагрузки и пропускной способности системы 2x25 кВ. К2_PN. Руководство пользователя. М.: АО «ВНИИЖТ», 2018. – 19 с.: цв. ил.
121. Раджибаев, Д. О. Анализ тяговых показателей электровоза "Ермак" (ЗЭС5к) / Д. О. Раджибаев, Ш. Н. у. Кахрамонов // Молодой ученый. – 2021. – № 8(350). – С. 16-19.
122. Баева, И. А. Дополнение к методике электрического расчета программы КОРТЭС / И. А. Баева // Инновационный транспорт - 2016: специализация железных дорог : Материалы Международной научно-технической конференции, посвященная 60-летию основания Уральского государственного университета путей сообщения, Екатеринбург, 17 ноября 2016 года / Ответственный за выпуск С.В. Бушуев. – Екатеринбург: Уральский государственный университет путей сообщения, 2017. – С. 27-32.
123. Мельк, В. О. Повышение точности тяговых расчетов с применением программы "комплекс расчетов тягового электроснабжения (КОРТЭС)" / В. О. Мельк, А. С. Вильгельм, Д. И. Бондаревский // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава : Материалы третьей всероссийской научно-технической конференции с международным участием в трех частях, Омск, 10–11 декабря 2015 года / И. И. Галиев (отв. редактор). –

Омск: Омский государственный университет путей сообщения, 2015. – С. 180-190.

124. 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.
125. 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
126. 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.

Приложение 1

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Иркутский государственный университет путей сообщения»
(ФГБОУ ВО ИрГУПС)

Забайкальский институт железнодорожного транспорта

- филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения»
(ЗабИЖТ ИрГУПС)

Магистральная ул., д. 11, Чита, 672040

Тел.: (3022) 24-06-90, факс (3022) 24-06-90. E-mail: sekretar@zab.megalink.ru, <http://www.irgups.ru>
ОКПО 01115780; ОГРН 1023801748761; ИНН/КПП 3812010086/753602001



А К Т

об использовании результатов диссертационного исследования
«Автоматизированная подсистема микропроцессорной релейной защиты фидеров контактной сети переменного тока», представленного Востриковым Максимом Викторовичем на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности:
2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки)

Настоящим Актом удостоверяется, что результаты диссертационной работы «Автоматизированная подсистема микропроцессорной релейной защиты фидеров контактной сети переменного тока», представленной Востриковым Максимом Викторовичем на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки) используются в учебном процессе специальности 23.05.05 «Системы обеспечения движения поездов» всех специализаций.

Предложенная в диссертации методика непрерывного сбора, обработки и хранения контролируемых АП МРЗ электрических параметров с одномоментной привязкой к графику исполненного движения поездов используются в разделе «Цифровые реле. Микропроцессорные защиты» дисциплины «Релейная защита».

Предложенные в диссертации научно-технические разработки АП МРЗ в составе среднего и верхнего уровней АСУ ТП используются в разделе «Тенденции повышения безопасности движения путем оптимизации параметров системы электроснабжения железных дорог» дисциплины «Эксплуатация систем обеспечения движения поездов».

Заведующий кафедрой
«Электроснабжение»,
к.т.н., доцент
11 октября 2022 г.


С.А. Филиппов

Приложение 2



ФИЛИАЛ ОАО «РЖД»
ТРАНСЭНЕРГО
ЗАБАЙКАЛЬСКАЯ ДИРЕКЦИЯ
ПО ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЮ

Ленинградская ул., 34,
 г. Чита, 672000,
 Тел.: (3022) 22-47-53, факс: (3022) 22-44-97

« 18 » октября 2022 г. № 1157

На № _____ от _____

АКТ

об эффективности внедрения результатов диссертационной работы «Автоматизированная подсистема микропроцессорной релейной защиты фидеров контактной сети переменного тока», представленной Востриковым Максимом Викторовичем на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки).

В рамках выполнения инициативной научно-исследовательской работы творческим коллективом кафедры «Электроснабжение» Забайкальского института железнодорожного транспорта – филиала федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения (ЗабИЖТ ИрГУПС) в период с 06.09.2021 г. по 30.09.2022 г. проведен следующий комплекс научно-технических мероприятий:

- сбор и анализ аварийных осциллограмм срабатывания микропроцессорных устройств релейной защиты на участке Карымская – Борзя Забайкальской железной дороги;
- изучение основных факторов и причин, приводящих к аварийным срабатываниям микропроцессорных релейных защит по неустановленным причинам;
- разработка устройства фильтрации и выделения первой гармоники контролируемых сигналов тока и напряжения в микропроцессорных устройствах релейной защиты фидеров контактной сети на основе схем ФАПЧ.

Внедрение указанного устройства обеспечит возможность фиксации нулевых отметок контролируемых сигналов тока и напряжения и снижение абсолютной погрешности определения их начальных фаз до 4 %.

Предлагаемое научно-техническое решение позволит повысить селективность действующих устройств микропроцессорных релейных защит в границах Забайкальской дирекции по энергообеспечению – структурного подразделения Трансэнерго – филиала ОАО "РЖД" и потенциально уменьшить число их отключений по неустановленным причинам.

Начальник Забайкальской
 дирекции по энергообеспечению



А.Г. Морозов

Приложение 3



ФИЛИАЛ ОАО «РЖД»
**ДИРЕКЦИЯ КАПИТАЛЬНОГО РЕМОНТА
 И РЕКОНСТРУКЦИИ ОБЪЕКТОВ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ И
 ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ
 ЗАБАЙКАЛЬСКАЯ**
**ДИРЕКЦИЯ КАПИТАЛЬНОГО РЕМОНТА
 И РЕКОНСТРУКЦИИ ОБЪЕКТОВ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ И
 ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

г. Чита, 672000,
 Ул. Горбунова д. 14 а
 Тел.: +79140426232
 E-mail: KizimalV@mail.zabtrans.ru

21.10.2022 г. № ИСХ-40/ЗАБ ДКРЭ

АКТ

об эффективности внедрения результатов диссертационной работы «Автоматизированная подсистема микропроцессорной релейной защиты фидеров контактной сети переменного тока», представленной Востриковым Максимом Викторовичем на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки).

В рамках выполнения инициативной научно-исследовательской работы творческим коллективом кафедры «Электроснабжение» Забайкальского института железнодорожного транспорта – филиала федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения (ЗабИЖТ ИрГУПС) в период с 10.03.2021 г. по 27.08.2021 г. проведен следующий комплекс научно-технических мероприятий:

- сбор и анализ аварийных осциллограмм, зафиксированных микропроцессорной защитой фидеров контактной сети тяговых подстанций ЦЗА-27,5-ФТС на участке Карымская – Борзя Забайкальской железной дороги за три года (2019 – 2021 гг.);

- разработка и экспериментальная апробация на ТП Бурятская методики непрерывного сбора, обработки и хранения контролируемых ЦЗА-27,5-ФТС электрических параметров с одномоментной привязкой к графику исполненного движения поездов и варианта формирования шаблона аварийной ситуации.

Предлагаемые научно-технические решения позволят повысить селективность действующих устройств микропроцессорных релейных защит в зоне ответственности Забайкальской дирекции капитального ремонта и реконструкции объектов электрификации и электроснабжения – структурного подразделения Центральной дирекции капитального ремонта и реконструкции объектов электрификации и электроснабжения железных дорог – филиала ОАО «РЖД» и потенциально уменьшить объемы ремонта электрооборудования из-за снижения числа их аварийных отключений.

Главный инженер ЗабДКРЭ –
 СП ЦДКРЭ – филиала ОАО «РЖД»



И.В. Кизима

Приложение 4

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2708684

Устройство фильтрации и выделения первой гармоники в микропроцессорных устройствах релейной защиты фидеров контактной сети на основе схем ФАПЧ

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Иркутский государственный университет путей сообщения (ФГБОУ ВО ИРГУПС) (RU)*

Авторы: *Менакер Константин Владимирович (RU), Востриков Максим Викторович (RU), Яковлев Дмитрий Александрович (RU), Ярилов Евгений Витальевич (RU)*

Заявка № 2018134810

Приоритет изобретения 01 октября 2018 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 11 декабря 2019 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 01 октября 2038 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

Приложение 5

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2784890

Способ аварийной защиты элементов систем тягового электроснабжения железных дорог переменного тока и устройство для его осуществления

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Иркутский государственный университет путей сообщения (ФГБОУ ВО ИрГУПС) (RU)*

Авторы: *Востриков Максим Викторович (RU), Менакер Константин Владимирович (RU), Пультяков Андрей Владимирович (RU), Сизых Виктор Николаевич (RU)*

Заявка № 2021129643

Приоритет изобретения 11 октября 2021 г.

Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 30 ноября 2022 г.

Срок действия исключительного права на изобретение истекает 11 октября 2041 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

