

На правах рукописи



Парамзин Александр Олегович

**МОДЕРНИЗАЦИЯ МЕТОДА ОТНОСИТЕЛЬНОГО ЗАМЕРА
ВЫСШИХ ГАРМОНИК ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИСОЕДИНЕНИЯ
С ОДНОФАЗНЫМ ЗАМЫКАНИЕМ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ 6 (10) КВ**

Специальность 2.4.3. Электроэнергетика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ханты-Мансийск – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Югорский государственный университет».

Научный руководитель – **Осипов Дмитрий Сергеевич**
доктор технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Югорский государственный университет», профессор Политехнической школы.

Официальные оппоненты: – **Сычев Юрий Анатольевич**,
доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», кафедра электроэнергетики и электромеханики, профессор;
– **Шуин Владимир Александрович**,
доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кафедра автоматического управления электроэнергетическими системами, профессор.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения», г. Омск.

Защита диссертации состоится 21 февраля 2025 г. в 12:00 на заседании диссертационного совета 24.2.350.04, созданного на базе ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет», по адресу: 644050, г. Омск, проспект Мира, д. 11, Главный корпус, ауд. П-202.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет» и на сайте <http://omgtu.ru>.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2024 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
канд. техн. наук, доцент



Гиршин Станислав Сергеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Нормальное функционирование и развитие экономики любого современного государства подразумевает безаварийную работу энергосистемы, поскольку промышленное, социальное производство и национальная безопасность невозможны без качественного электроснабжения. В качестве наиболее распространенных причин отказов энергосистем принято считать возникновение неисправностей в линиях электропередачи (ЛЭП).

Ханты-Мансийский автономный округ – Югра (ХМАО) является крупным энергетическим субъектом РФ, занимающим лидирующие позиции в области генерации и потребления электрической энергии, где основным потребителем электроэнергии выступают нефтегазодобывающие компании, а электрические сети 6 (10) кВ расположены преимущественно в малозаселенных районах. На долю нефтедобывающих компаний приходится порядка 70% от общего потребления электроэнергии автономного округа. По объемам электропотребления лидируют три крупнейших нефтегазодобывающих предприятия региона: ООО «РН-Юганскнефтегаз», ООО «ЛУКОЙЛ – Западная Сибирь» и ПАО «Сургутнефтегаз». Вместе с этим, суммарная протяженность линий сетей 6 (10) кВ составляет порядка 16 тыс. км, что в процентном соотношении составляет более 80% от общей протяженности ЛЭП в регионе.

Развитие инфраструктуры России регламентируется следующими нормативными документами: Указ Президента РФ от 07.05.2024 г. № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года», где одним из приоритетных направлений выделено обеспечение значимого роста энергетической и ресурсной эффективности, в т. ч. в промышленном секторе. В связи с этим Стратегией развития электросетевого комплекса Российской Федерации, утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации от 3 апреля 2013 г. № 511-р, задаются целевые ориентиры в электроэнергетике, одним из которых является обеспечение потребителей надежным и качественным электроснабжением. Для достижения целевых ориентиров, заданных Правительством Российской Федерации, ПАО «Россети» была сформирована Концепция цифровизации сетей, выполнение которой к 2030 году приведет к цифровой электроэнергетической инфраструктуре с качественно новыми характеристиками надежности, эффективности, доступности и управляемости.

Для преодоления энергетических барьеров развития ХМАО 29 апреля 2022 г. утверждено Распоряжение Правительства ХМАО-Югры № 203-рп «Об одобрении схемы и программы развития электроэнергетики Ханты-Мансийского автономного округа – Югры на период до 2027 года».

По данным различных источников, отказы распределительных сетей 6-35 кВ можно распределить следующим образом: 5-6% отказов приходится на трехфазные короткие замыкания; в равной степени (15%) встречаются двухфазные и двухфазные замыкания на землю; более 50% отказов приходится на однофазные замыкания на землю (ОЗЗ). При этом ОЗЗ не приравниваются к аварийному режиму работы сети, требующему незамедлительного отключения.

Проблема поиска отходящей линии с ОЗЗ существует на протяжении достаточно большого промежутка времени, однако она до настоящего времени остается актуальной ввиду отсутствия универсального решения, успешно функционирующего в различных конфигурациях сетей. Кроме того, к настоящему времени большинство находящихся в эксплуатации устройств защиты обеспечивают выполнение предъявляемых к ним требований лишь при синусоидальной форме кривых тока и напряжения, что невозможно при

современном уровне электрических нагрузок, изменяющихся в процессе эксплуатации оборудования нефтегазодобывающих предприятий, с наличием нелинейных преобразователей и осветительных установок.

Существует большое количество методов и технических решений, позволяющих идентифицировать отходящую линию с ОЗЗ, однако большинство из них обладает низким уровнем селективности. Тенденции развития рынка устройств защиты от ОЗЗ направлены на значительные изменения, где, начиная с 2000-х годов, в эксплуатацию вошли и закрепились на рынке микропроцессорные устройства релейной защиты и автоматики, ранее именуемые «интеллектуальной защитой».

На сегодняшний день термин закрепился за устройствами защиты, для которых обязательно не только использование современной микропроцессорной базы, но и удовлетворение требований, предъявляемых к достижению максимального количества информации об измеряемых параметрах. Этому удастся достичь благодаря высокоавтоматизированным подстанциям (ВАПС), выполненным на базе открытых стандартов и технологий МЭК 61850 с использованием инновационных способов сбора информации и обработки сигналов современными математическими методами, например вейвлет-преобразованием. Энергетический сектор ХМАО идет в соответствии с трендами, свидетельством этого является активное внедрение ВАПС в округе, что продиктовано программой «Цифровая трансформация» АО «Россети Тюмень» на 2020–2030 годы».

Степень разработанности темы исследования. Существование на протяжении нескольких десятков лет проблемы селективного определения отходящей линии с ОЗЗ позволяет наблюдать большое разнообразие технических решений, не имеющих общепринятой классификации. Наиболее широкое распространение получили устройства относительного замера высших гармоник в отходящих присоединениях.

Значительный вклад в развитие технологий поиска повреждений ЛЭП в распределительных сетях внесли Авербух М. А., Антонов В. И., Арцишевский Я. Л., Бульчев А. В., Вагапов Г. В., Вайнштейн Р. А., Горюнов В. А., Качесов В. Е., Кискачи В. М., Кутумов Ю. Д., Лачугин В. Ф., Левиуш А. И., Ощепков В. А., Пеленев Д. Н., Солдагов А. В., Сычев Ю. А., Тютиков В. В., Федотов А. И., Шадрикова Т. Ю., Шабад М. А., Шалыт Г. Н., Шуин В. А., Emanuel A. E., Valdes M. E., Dong X., Rui L. A. и многие другие.

Анализ отечественного и зарубежного опыта в области организации защит от ОЗЗ позволил выявить следующие причины низкого уровня селективности существующих подходов:

1. Известные на сегодняшний день типы защит относительного замера подразумевают последовательный анализ токов нулевой последовательности $3I_0$ отходящих присоединений, что приводит к неодновременности снятия характеристик.

2. Классические методы анализа высших гармоник с использованием аналоговых и цифровых Фурье-фильтров не способны распознать слабый уровень гармонических составляющих на фоне преобладающего ёмкостного тока основной частоты и нестационарного белого шума.

Необходимо отметить существование подхода к «цифровой защите» ЛЭП с использованием данных ВАПС. Широко известны своими научными достижениями в данном направлении ученые НИУ «МЭИ», ООО НПП «ЭКРА», ООО «ИЦ «Бреслер», ООО «НТЦ «Механотроника», ЧГУ им. И.Н. Ульянова и других научно-образовательных центров.

Цель диссертационной работы

Модернизация метода относительного замера высших гармоник на основе вейвлет-преобразования для повышения чувствительности средств поиска поврежденного присоединения с однофазным замыканием на землю.

Задачи исследования:

1. Провести анализ современного состояния проблемы определения отходящей линии с ОЗЗ в сетях с изолированной и компенсированной нейтралью.
2. Модернизировать метод относительного замера уровней высокочастотных составляющих в токах нулевой последовательности в диапазоне от 100 до 700 Гц.
3. Разработать алгоритм селективного определения отходящей линии с ОЗЗ на основе энергии спектра коэффициентов в узлах дерева разложения пакетного вейвлет-преобразования.
4. Разработать прототип устройства селективного определения отходящей линии с ОЗЗ с возможностью подключения к шине процесса ВАПС.
5. Оценить влияние протекания высших гармонических составляющих за время существования ОЗЗ на температурное поле кабельной линии электропередачи и близлежащий грунт.
6. Произвести оценку достоверности результатов работы алгоритма с использованием сертифицированного и, занесенного в государственный реестр средств измерений оборудования.

Объект исследования: сети 6 (10) кВ с изолированной нейтралью при наличии электроприемников, искажающих форму кривой напряжения.

Предмет исследования: методы вейвлет-анализа применительно к анализу полигармонических сигналов в токах $3i_0$ при наличии ОЗЗ в сети.

Научная новизна работы на основании выполненного исследования:

1. Модернизирован метод относительного замера уровней высокочастотных составляющих в токах нулевой последовательности в диапазоне от 100 до 700 Гц. Отличие от ранее известного состоит в отказе от использования среднеквадратичных и средневыпрямленных значений сумм высших гармоник и переходе к замеру энергии спектра частотного диапазона.
2. Разработан алгоритм селективного определения отходящей линии с ОЗЗ на основе энергии спектра вейвлет-коэффициентов пакетного вейвлет-преобразования, позволяющий отказаться от аппаратной фильтрации основной частоты и белого шума в сигнале тока $3i_0$.
3. Предложен критерий идентификации однофазного замыкания в отходящем присоединении, основанный на соотношении наибольшего и наименьшего значений энергии спектра высокочастотных составляющих в токах $3i_0$ частотного диапазона, отличающийся большей чувствительностью в сравнении с существующими критериями.

Теоретическая и практическая значимость заключается в следующем:

1. Разработан прототип устройства селективного определения отходящей линии с ОЗЗ, использующий для этого данные шины процесса ВАПС (до 20 присоединений) или аналоговые измерительные входы (3/9 присоединений).
2. Доказана работоспособность алгоритма селективного определения отходящей линии с ОЗЗ на основе энергии спектра вейвлет-коэффициентов при работе с аналоговым сигналом без применения аппаратной фильтрации токов нулевой последовательности в условиях малых ёмкостных токов.
3. Разработан аналоговый преобразователь с гальванической развязкой для передачи мгновенных значений переменного тока в аналого-цифровой преобразователь (АЦП) с возможностью захвата до 9 каналов частотой дискретизации 4 кГц.
4. Доказана возможность использования интерполированных значений потока SV80 для анализа высокочастотных составляющих диапазона 100-700 Гц в сигналах $3i_0$ отходящих

присоединений без значительных потерь информационной составляющей об уровне искажений.

5. Разработана математическая модель распределительной сети 6 (10) кВ с учетом характерных особенностей нефтегазодобывающих регионов для генерации потока SV80 в сеть при помощи КИМ «РИТМ».

6. Выполнена оценка воздействия высших гармонических составляющих за время существования однофазного замыкания на землю на температурное поле кабельной линии электропередачи и близлежащий грунт.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач использовались теоретические и экспериментальные методы исследования. Математическое моделирование через анализ конечных элементов проводилось с использованием среды COMSOL Multiphysics. Проверка полученных результатов проводилась с использованием пакета прикладных программ для технических вычислений MATLAB Simulink. Для получения референсных экспериментальных данных использовались средства измерений, занесенные в государственный реестр, такие как осциллограф Rigol DS1102 (серия DS1000), анализатор качества электроэнергии Metrel MI2892 и модуль ввода-вывода RITMeX DA-RT-FMC.

Положения, выносимые на защиту.

В диссертационной работе изложены и обоснованы решения научной задачи, имеющей значение для развития электроэнергетики, направленные на повышение чувствительности метода относительного замера высших гармоник для определения поврежденного присоединения с ОЗЗ, а именно:

1. Модернизированный метод относительного замера уровней высокочастотных составляющих в токах I_{10} для диапазона частот от 100 до 700 Гц.

2. Разработанный алгоритм селективного определения отходящей линии с ОЗЗ на основе энергии спектра вейвлет-коэффициентов пакетного вейвлет-преобразования.

3. Критерий идентификации ОЗЗ в отходящем присоединении, основанный на соотношении наибольшего и наименьшего значения энергии спектра высокочастотных составляющих в токах нулевой последовательности.

Степень достоверности результатов диссертационной работы подтверждается с помощью численных и полунатурных экспериментов, выполненных на моделях распределительной сети с изолированной нейтралью. Результаты расчетов имитационных моделей распределительной сети численными методами сопоставимы с результатами, полученными в ходе физических и полунатурных экспериментов.

Апробация результатов.

Основные материалы докладывались и обсуждались на конференциях (НПК): «Развитие энергетической отрасли: проблемы и перспективы» – г. Ханты-Мансийск, 2024; 6th 2024 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), IEEE – г. Москва: МЭИ, 2024; Международная НПК им. Д. И. Менделеева – г. Тюмень: ТИУ, 2023; International Russian Automation Conference (RusAutoCon) – г. Сочи, 2023; Международная НПК «Проблемы электроэнергетики и телекоммуникаций Севера России» – г. Сургут: СурГУ, 2023.

Реализация результатов работы. Результаты проведенных в работе исследований по идентификации присоединения с наличием однофазного замыкания на землю используются в АО «ЮРЭСК», АО «ЮТЭК-РС», АО «ХМГЭС», а также в научно-исследовательской и учебном процессе Югорского государственного университета.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертационное исследование соответствует паспорту научной специальности 2.4.3. Энергоэнергетика:

П.10. Разработка цифровых и физических методов анализа и мониторинга режимных параметров основного оборудования электростанций, электрических сетей и систем электроснабжения.

П.13. Разработка методов обработки сигналов для мониторинга и диагностики состояния электрооборудования электроустановок.

П.16. Разработка методов анализа и синтеза систем автоматического регулирования, противоаварийной автоматики и релейной защиты в электроэнергетике.

Личный вклад соискателя. Соискателю принадлежит разработка методов, разработка прототипа устройства, анализ результатов, программная реализация алгоритмов, проверка достоверности исследований. Научные и практические результаты, выносимые на защиту, разработаны и получены автором.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 работ, из них 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК, и 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 191 наименования и 2 приложений.

Благодарности. Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема «Разработка моделей вейвлет-анализа нестационарных режимов электрических сетей для повышения надежности и эффективности электроснабжения потребителей», код темы: FENG-2023-0005).

ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Метод относительного замера уровней высокочастотных составляющих в токах $3i_0$ для диапазона частот от 100 до 700 Гц

Искажение формы кривой питающего напряжения определяется в соответствии с ГОСТ 32144-2013, согласно которому нормируется уровень гармонических искажений (THD) и действующие значения отдельных гармоник.

Существующие подходы к анализу режимов с наличием гармонических искажений предполагают использование математического аппарата преобразования Фурье (ПФ) и его разновидностей в соответствии с ГОСТ 30804.4.7-2013 применительно к усредненным данным в количестве 10 периодов промышленной частоты, что неизбежно приводит к явлению Гиббса, именуемому также «растеканием спектра», и невозможности достоверной интерпретации результатов.

Действующие стандарты предполагают взаимодействие со среднеквадратичными значениями отдельных гармонических составляющих, причем для оценки гармоник результаты ПФ должны быть сгруппированы по гармоническим группам и сглажены.

В качестве альтернативы ПФ и использованию среднеквадратичных значений составляющих предлагается модернизированный метод цифровой обработки сигналов на базе пакетного вейвлет-преобразования (ПВП), использование которого позволяет исключить явление Гиббса за счет рассмотрения частотных диапазонов в узлах дерева разложения (Рисунок 1).

Вейвлет-преобразование аналогично преобразованию Фурье (ПФ) позволяет выполнять расчет интегральных показателей на основании равенства Парсеваля, используя для этого коэффициенты пакетного вейвлет-преобразования (1)

$$I = \sqrt{\frac{1}{2^N} \sum_{2^{-j} m m}^{2^{-j} n(m+1)-1} i_{j,m}^2(k)} \cdot \quad (1)$$

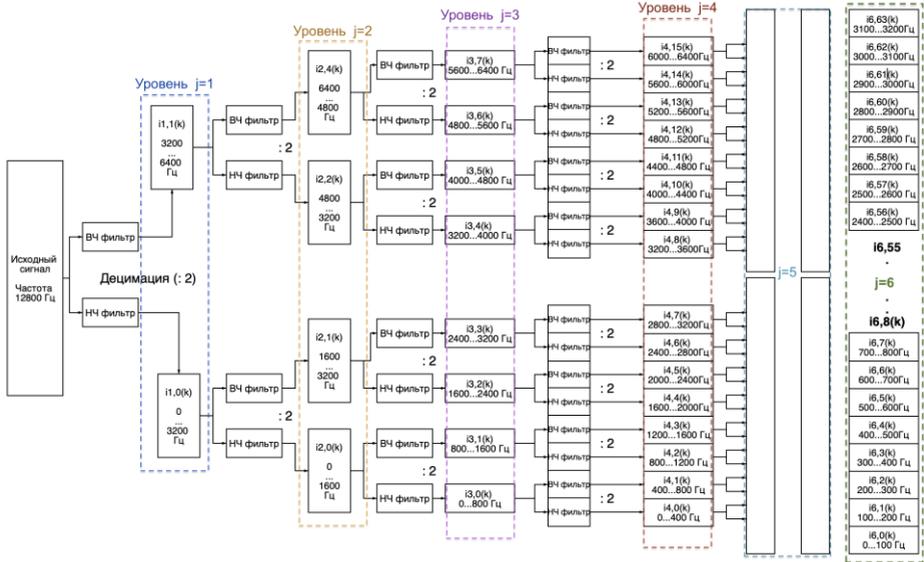


Рис. 1 – Дерево разложения пакетного вейвлет-преобразования

Однако данный подход спектрального представления сигнала также считается неэффективным по причине наличия нестационарной суммарной составляющей шумов и помех в реальном сигнале токов Z_{i0} , которая не может быть априорно или в реальном времени определена.

На рисунке 2 продемонстрирован результат извлечения среднеквадратичных значений отдельных гармоник из синтезированного нестационарного сигнала при помощи ПФ и различных типов вейвлет-функций. Несмотря на значительное превосходство последних перед традиционным ПФ, среди многообразия вейвлетов не удастся сделать конкретный выбор, поскольку в ряде случаев отклонения достигают значений в 50%.

Аппарат вейвлет-преобразования позволяет определять локальную энергию спектра в пределах частотного диапазона, локализованного соответствующими вейвлет-коэффициентами в узлах пакетного вейвлет-преобразования (2). Таким образом, удастся рассматривать не отдельные гармонические составляющие, а анализировать диапазоны в соответствии с рассматриваемыми узлами дерева пакетного вейвлет-преобразования и вычислять энергию спектра согласно (3).

$$E = \int Z_{i0}(t) dt = C_w^{-1} \iint Z_{i0}^2(j, m) \frac{dj dm}{j^2} \quad (2)$$

$$E_{Z_{i0}}(j, m) = \sum_{2^j m}^{2^{-j} n(m+1) - 1} i_{j, m}^2(k) \cdot \quad (3)$$

Если энергия спектра вейвлет-коэффициентов узла, частотная локализация которого соответствует гармонической группе, менее порогового значения, то это означает либо отсутствие гармоники с данной частотой, либо ее малую амплитуду.

Причем важно при выборе узлов пакетного вейвлет-преобразования, соответствующих определенному частотному диапазону, не допускать перекрытия полосами пропускания высокочастотных (ФВЧ) и низкочастотных (ФНЧ) фильтров одновременно нескольких гармонических групп (Рисунок 3).

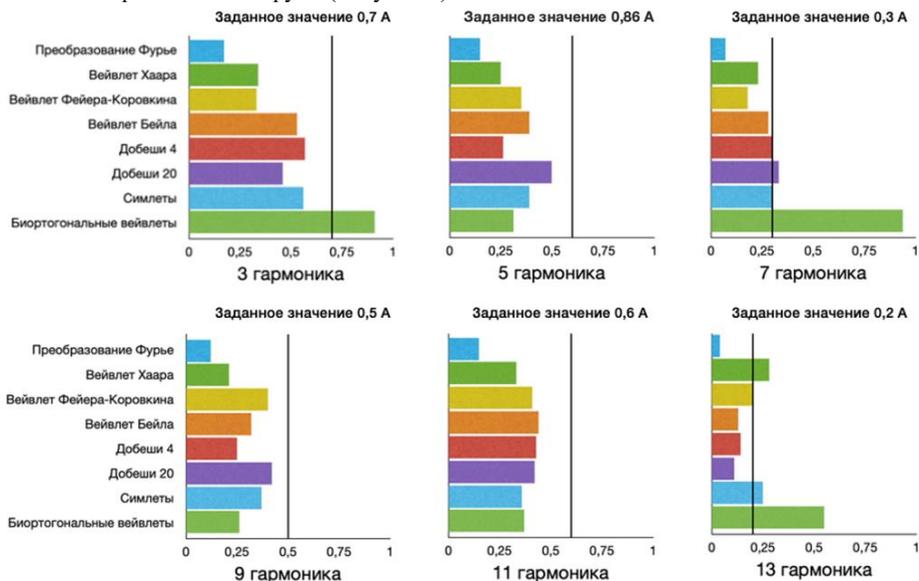


Рис. 2 – Сравнение действующих значений отдельных гармоник при спектральном представлении сигнала различными методами

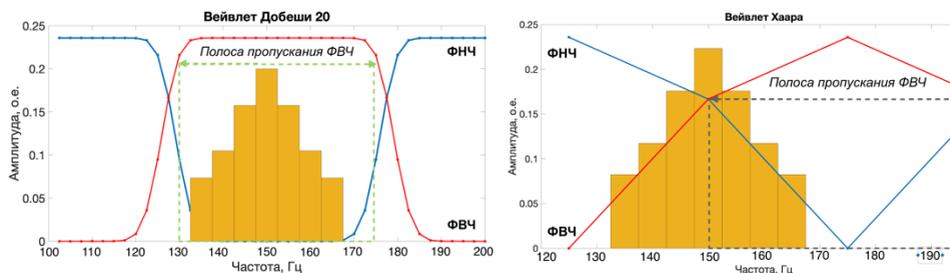


Рис. 3 – Наложение полос пропускания ФВЧ и ФНЧ на гармоническую группу для вейвлетов Добеши 20 (без перекрытия) и Хаара (с перекрытием)

Результаты вычисления энергии спектра частотных диапазонов от 100 до 700 Гц в синтезированном сигнале и их сопоставление с заданными величинами представлены в таблице 1. На рисунке 4 показаны значения вейвлет-коэффициентов в узлах дерева пакетного вейвлет-преобразования, соответствующих частотным диапазонам нечетных гармоник с 3 по 13 с шагом в 100 Гц.

Таблица 1 — Сравнение результатов вычисления энергии спектра и заданных значений гармоник в нестационарном полигармоническом сигнале

Номер гармоники	3	5	7	9	11	13
Частотный диапазон, Гц	100-200	200-300	300-400	400-500	500-600	600-700
Узел разложения	$i_{6,1}$	$i_{6,2}$	$i_{6,3}$	$i_{6,4}$	$i_{6,5}$	$i_{6,6}$
Энергия $E_{j,k}$, о.е.	636	710	121	434	603	120
Заданное значение, А	0,70	0,86	0,30	0,50	0,60	0,20

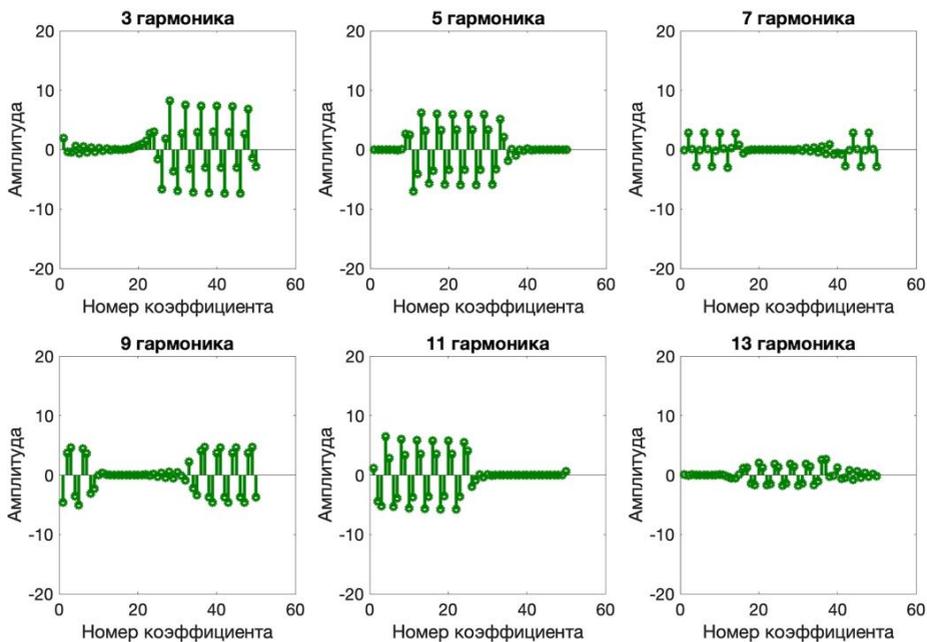


Рис. 4 – Значения вейвлет-коэффициентов в узлах 6-го уровня разложения

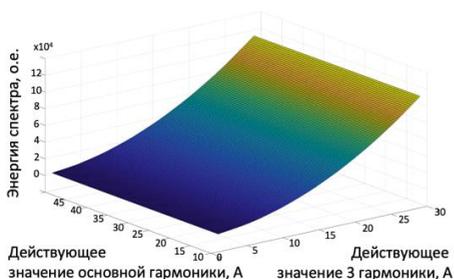


Рис. 5 – Зависимость энергии спектра ВЧ-диапазона от уровня гармонических искажений

Адекватность и соразмерность отклика модифицированного метода относительного замера подтверждается серией численных экспериментов, результаты которых представлены на рисунке 5. Изменение действующего значения тока основной частоты не вызывает изменения величины энергии спектра высокочастотного (ВЧ) диапазона от 100 до 700 Гц. С ростом действующего значения 3 гармоники в сигнале Z_{10} наблюдается экспоненциальный рост величины энергии спектра.

Поскольку величина энергии спектра вейвлет-коэффициентов, определяемая из их значений, соответствующих заданному частотному диапазону, пропорциональна действующему значению гармоник, входящих в данные диапазоны, можно сделать вывод о возможности сравнения уровней высокочастотных составляющих в нестационарных сигналах путем сравнения значений энергии спектра высших гармоник относительно друг друга. Сигналу с наибольшим уровнем будет соответствовать большее значение энергии спектра по сравнению с сигналом, где уровень искажений ниже.

Метод относительного замера уровней высокочастотных составляющих в токах I_{i0} для диапазона частот от 100 до 700 Гц заключается в следующем:

1. Для каждой отходящей линии фиксируется массив мгновенных значений тока I_{i0} длительностью 6 периодов с частотой дискретизации 12,8 кГц.
2. Определяются коэффициенты фильтра пакетного вейвлет-преобразования, и формируется матрица вейвлет-преобразования.
3. Матрица дискретных значений токов I_{i0} умножается на матрицу вейвлет-преобразования, за счет чего происходит декомпозиция сигнала с выделением высокочастотной и низкочастотной составляющих в виде вейвлет-коэффициентов.
4. Результат декомпозиции сигнала, полученный на предыдущем шаге, умножается на матрицу вейвлет-преобразования до тех пор, пока не будут получены коэффициенты пакетного вейвлет-преобразования 6-го уровня разложения.
5. По найденным вейвлет-коэффициентам, соответствующим узлам $i_{6,1}(k)-i_{6,6}(k)$, вычисляется энергия спектра в соответствии с выражениями (2, 3).
6. Значения энергии спектра частотных диапазонов суммируются, и вычисляется суммарная энергия спектра высокочастотных составляющих.

2. Алгоритм селективного определения отходящей линии с ОЗЗ на основе энергии спектра вейвлет-коэффициентов пакетного вейвлет-преобразования

Ближайшим промышленным аналогом, реализующим схожий принцип, является централизованное устройство защиты УСЗ-3М, разработанное В. М. Кискачи, которое реализует принцип относительного замера высших гармоник в токах I_{i0} отходящих присоединений. Поврежденное присоединение определяется на основании сравнения значений среднеквадратичных либо средневыпрямленных сумм высших гармоник, где наибольшему уровню высших гармоник в соответствии с уравнением баланса мощностей (4) будет соответствовать присоединение с ОЗЗ.

$$\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^n \dot{S}_{i,k} = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^n I_{i,k}^2 R_i + j\omega \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^n I_{i,k}^2 L_{i,k} + \frac{1}{j\omega} \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^n \frac{I_{i,k}^2}{C_{i,k}}. \quad (4)$$

Основная концепция «высокоавтоматизированных подстанций» подразумевает синхронизированную по времени передачу электрических величин в векторной форме, которая регламентирована стандартом МЭК (IEC) 61850, и позволяет решить проблему неодновременности снятия характеристик. Измеряемый при помощи таких устройств сигнал, как правило, подвергается преобразованию через аттенуатор и набор аналоговых фильтров, а затем оцифровывается с помощью АЦП.

Взаимодействие с цифровыми сигналами позволяет использовать в качестве замены аналоговых фильтров современные математические методы и алгоритмы обработки данных, например представленный ранее метод относительного замера уровней высокочастотных составляющих на основе вейвлет-преобразования.

МЭК 61850 определяет передачу синхронизированных измерений в соответствии с протоколом Sampled Values (SV-поток), который подразумевает передачу мгновенных выборок аналоговых величин в широковещательном формате.

SV обрабатывается устройствами подписчиками, которые могут быть подключены к источнику информации в неограниченном количестве, при этом не увеличивая нагрузку на измерительных трансформаторах тока. Распознавание такого потока выполняется по MAC-адресу, а также идентификаторам потока и приложения (SVid, AppID).

Применение SV позволяет решить обозначенную ранее проблему синхронизации измерений, полученных с различных источников одним приёмником. Однако для достижения единообразия решений в части использования протокола Sampled Values в РФ необходимо руководствоваться положениями профиля ПАО «ФСК ЕЭС» для передачи данных по протоколу Sampled Values, основанному на стандарте МЭК 61869, которому соответствует частота дискретизации 96 выборок за период, в отличие от регламентируемых профилем UCA 9-2LE стандарта 80 точек на период для нужд релейной защиты.

Следовательно, для определения отходящей линии с ОЗЗ на основе энергии спектра вейвлет-коэффициентов в узлах пакетного вейвлет-преобразования стоит задача обеспечения совместимости метода распознавания высокочастотных составляющих в сигнале $3i_0$ и количества выборок, предоставленных источником SV-потока без потери информационной составляющей. Данная задача решается наличием в алгоритме нормирующего звена, задача которого состоит в увеличении количества выборок с 80/96 точек до 256 точек на период путем кусочно-линейной интерполяции.

Результат интерполяции (зеленый пунктир) исходного потока SV-80 (красные точки) и их сопоставление с источником референсных данных (ломаная линия), которым является датчик тока ACS712, представлены на Рисунке 6. Преобразование аналоговых данных с датчика выполнено при помощи цифрового осциллографа Rigol DS1102E с внешней синхронизацией каналов. Среднеквадратичная ошибка MSE (5) интерполированных значений потока SV-80 (i_{SV80i}) относительно референсных данных (i_{ACS712}) составила $5 \cdot 10^{-6}$ о.е.

$$MSE = \frac{1}{1536} \sum_{i=1}^{1536} (i_{ACS712} - i_{SV80i})^2 \quad (5)$$

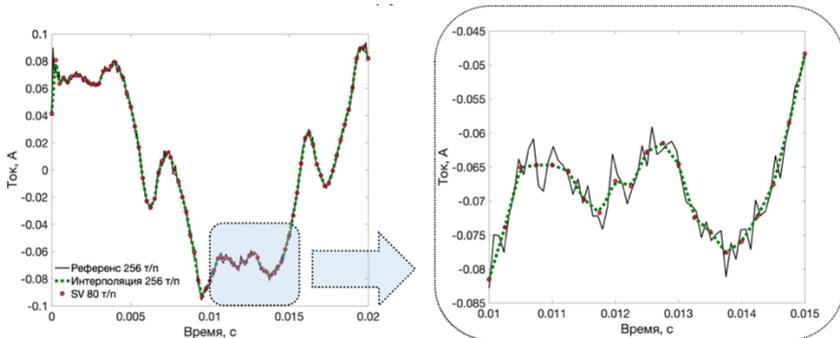


Рис. 6 – Сравнение мгновенных значений, полученных с датчика тока ACS712, потока SV-80 и результата интерполяции

Графическая интерпретация алгоритма представлена на рисунке 7 и подразумевает следующую последовательность действий:

Этап 1: исходными данными служит наполняемый массив $3i_0 = [n_T \times n_{Fact}]$, где n_T – выборки потока SV в количестве 6 периодов промышленной частоты для количества линий n_{Fact} с порядковыми номерами j .

Этап 2: нормирующее звено увеличивает количество отсчетов массива $3i_0$ с 80 (96) до 256 точек/период, пока длина каждого вектора не станет равной 1536 точкам.

Этап 3: выполняется ввод коэффициентов фильтра для трех различных вейвлет-функций P_w и формируются матрицы вейвлет-преобразования.

Этап 4-10: подготовленные данные подвергаются пакетному вейвлет-преобразованию W_j с разложением до 6 уровня при помощи коэффициентов фильтра P_w с вычислением величины энтропии σ в узлах разложения.

Замечание: минимальное значение энтропии σ_{\min} является индикатором информативности вейвлет-коэффициентов k , как следствие – индикатором выбора оптимальной вейвлет-функции среди вейвлетов Добеши 4, 10 и 20 порядка.

Этап 11-16: для наиболее информативного набора $node$ (j, k) вычисляется энергия спектра отдельных узлов ПВП $E_{node}(j, k)$, которая затем складывается, и вычисляется энергия спектра частотного диапазона от 100 до 700 Гц $E_{\Sigma node}(j)$. Значения последней сравниваются для j количества отходящих линий и сортируются по убыванию.

Этап 17: результатом работы алгоритма является порядковый номер m линии с ОЗЗ, которой соответствует наибольшее относительно других значение энергии $E_{\Sigma node}$.

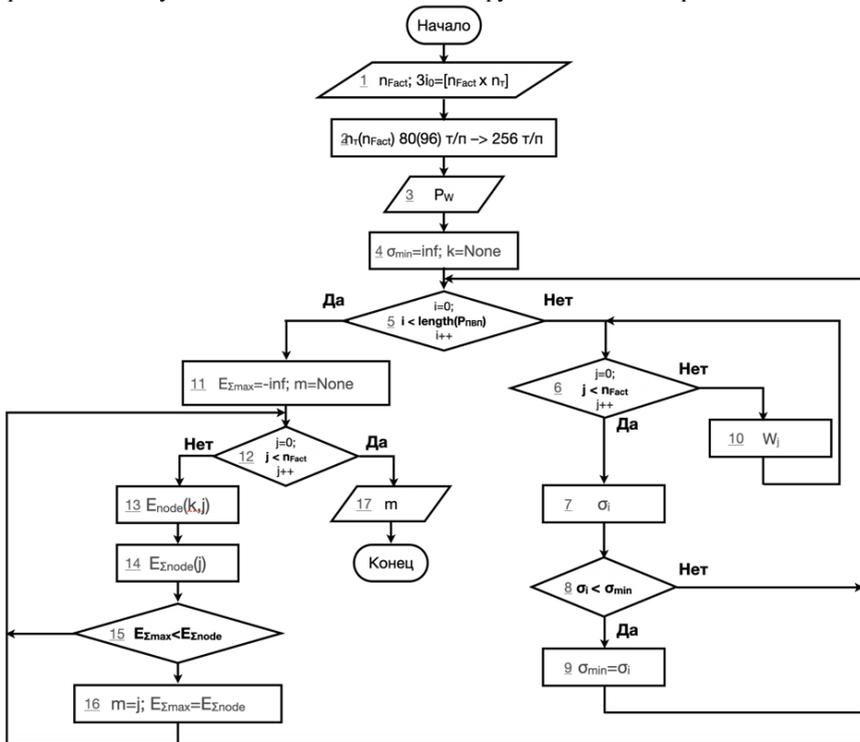


Рис. 7 – Алгоритм селективного определения отходящей линии с ОЗЗ

Верификация алгоритма проведена с использованием пакета Matlab Simulink на имитационной модели распределительной сети 10 кВ при наличии нелинейной нагрузки. Поврежденному присоединению соответствует наибольшее значение энергии спектра высокочастотных составляющих в токе $3i_0$ вне зависимости от изначального уровня гармонических искажений осциллограмм фазных токов (Рисунок 8), а также THD токов $3i_0$.

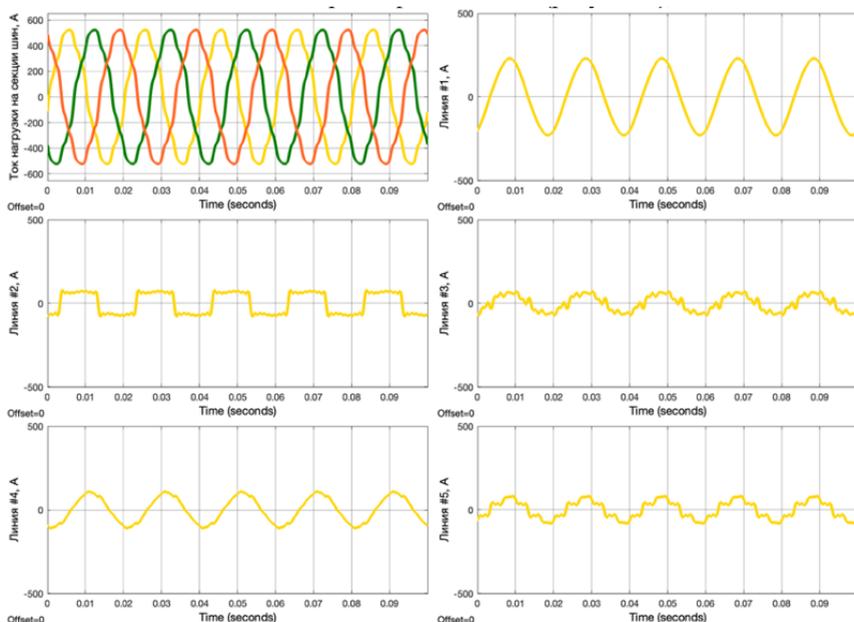


Рис. 8 – Осциллограммы токов в нормальном режиме работы сети

Таблица 2 – Результаты вычисления энергии спектра ВГ ($E_{\Sigma node}$) в отходящих линиях

Номер линии	ЛИНИЯ 1	Линия 2	Линия 3	Линия 4	Линия 5
Энергия $E_{\Sigma node}$	$3,78 \cdot 10^8$ о.е.	$1,99 \cdot 10^7$ о.е.	$2,12 \cdot 10^{-24}$ о.е.	$2,67 \cdot 10^{-24}$ о.е.	$8,52 \cdot 10^4$ о.е.
Номер линии	Линия 1	ЛИНИЯ 2	Линия 3	Линия 4	Линия 5
Энергия $E_{\Sigma node}$	$2,93 \cdot 10^4$ о.е.	$5,52 \cdot 10^6$ о.е.	$1,58 \cdot 10^{-26}$ о.е.	$2,32 \cdot 10^{-26}$ о.е.	$2,91 \cdot 10^4$ о.е.

3. Критерий идентификации однофазного замыкания на землю в отходящем присоединении, основанный на соотношении наибольшего и наименьшего значения энергии спектра высокочастотных составляющих в токах нулевой последовательности

Для проверки степени достоверности разработанного алгоритма и усовершенствованного метода относительного замера был разработан прототип устройства селективного определения отходящей линии с однофазным замыканием на землю (Рисунок 9). Устройство построено на базе одноплатного микрокомпьютера RADXA Rock 5B с дополнительным подключением высокоточной платы 10-канального АЦП. Микрокомпьютер является ключевым элементом устройства и за счет наличия Unix-подобной операционной системы и порта Ethernet обеспечивает взаимодействие с шиной процесса ВАПС по МЭК 61850, используя для этого известные программные решения. Плата АЦП предназначена для измерения мгновенных значений токов $3i_0$, поступающих от аналогового преобразователя с гальванической развязкой. Основная задача преобразователя состоит в преобразовании измеренных значений трансформаторами тока нулевой последовательности в аналоговый сигнал напряжения $\pm 2,5$ В. Структурная схема прототипа представлена на рисунке 10.



Рис. 9 – Прототип устройства

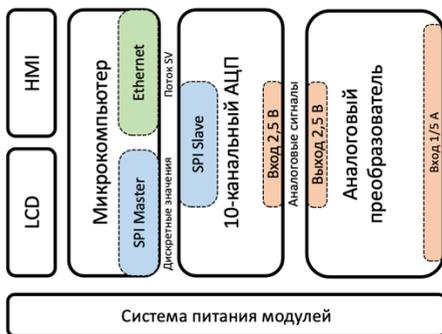


Рис. 10 – Структурная схема прототипа

Исследование работоспособности устройства производилось на двух наборах экспериментов с использованием КПМ «РИТМ», имитационной модели сети 10 кВ, библиотеки IEC 61850 для Matlab Simulink и экспериментальной установки на базе лабораторных стендов «Учебная техника».

Серия полунатурных экспериментов проведена по данным имитационного моделирования в Matlab Simulink на КПМ «РИТМ». С помощью КПМ в режиме реального времени в локальную сеть генерировался поток SV80 для выборок мгновенных значений $3i_0$ отходящих присоединений. Эксперимент показал, что количество присоединений (изменялось от 3 до 6), величина тока нагрузки (изменялась от 10 до 50 А) и уровень высокочастотных составляющих (THD нагрузок изменялся от 0,4% до 30%) не оказывают влияния на точность определения поврежденного присоединения. Вне зависимости от вариации параметров экспериментов поврежденное присоединение имеет максимальное значение энергии спектра, обозначенное соответствующим цветовым оттенком и положением поверхности (Рисунок 11).

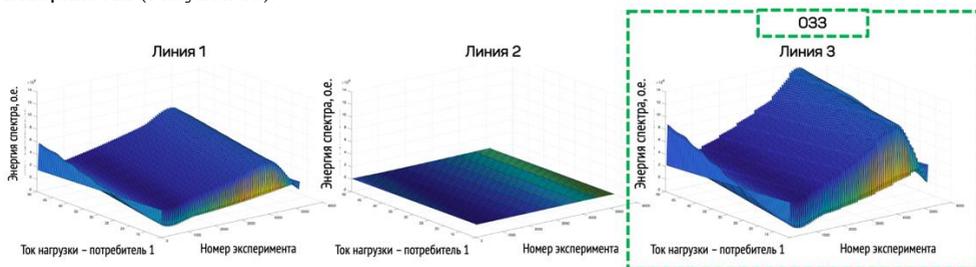


Рис. 11 – Результаты вычисления энергии спектра отходящих линий по данным SV-потока с вариацией гармонического состава нагрузки при ОЗЗ в линии 3

Серия экспериментов с аналоговыми значениями $3i_0$ выполнена на базе физической модели сети с изолированной нейтралью, функционирующей на пониженном напряжении 0,4 кВ (Рисунок 12). Здесь КПМ «РИТМ» выступал в качестве источника референсных данных по фазным токам отходящих линий. В таблице 3 представлены значения энергии спектра высокочастотных составляющих при вариации параметров ЛЭП в ходе эксперимента. Линии с ОЗЗ соответствует выделенное значение.

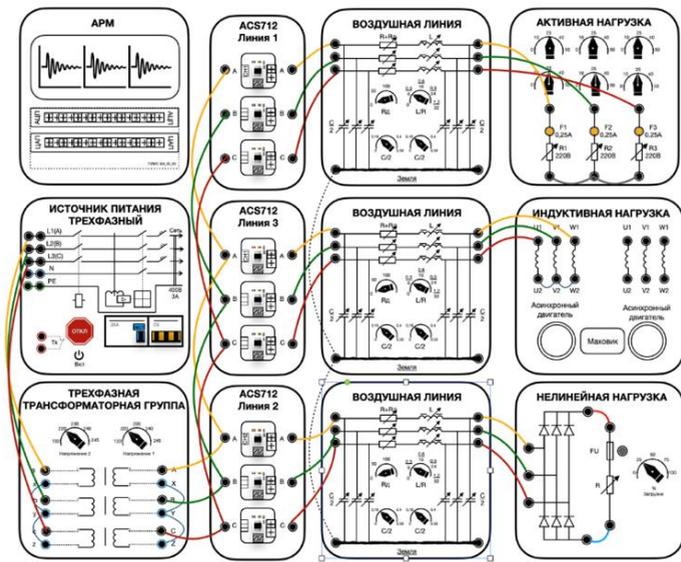


Рис. 12 – Физическая модель сети с изолированной нейтралью

Таблица 3 – Распределение энергии спектра по результатам экспериментов

Эксперимент	Точка ОЗЗ	Энергия спектра ВГ в токе $3I_0 E_{\Sigma nodes}$ о.е.		
		Линия 1	Линия 2	Линия 3
1	Конец линии 3	0,22	0,32	0,52
2	Конец линии 2	0,68	1,52	0,52
3	Конец линии 1	60,11	24,54	40,59
4	Конец линии 2	2,03	2,51	0,80
5	Конец линии 3	0,23	0,32	0,35

На физической модели получены реальные осциллограммы (Рисунок 13) с проявлением таких негативных эффектов, как наличие белого шума, малые значения ёмкостных токов и преобладание основной частоты. Указанные факторы затрудняют распознавание высших гармоник традиционными средствами защиты. Разработанный метод и алгоритм селективного определения не подвержены влиянию данных факторов.

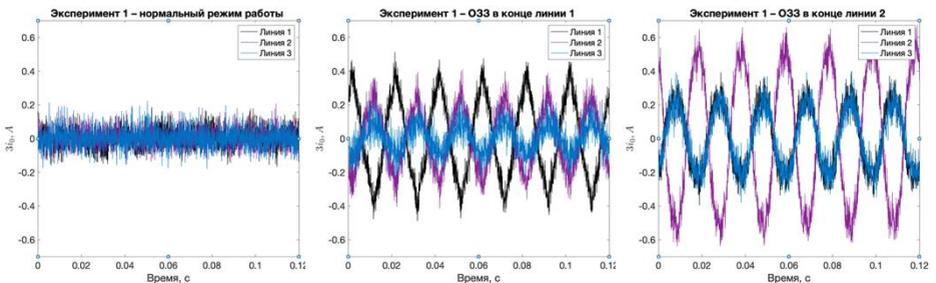


Рис. 13 – Осциллограммы токов нулевой последовательности $3I_0$ отходящих присоединений для эксперимента 1

Критерий чувствительности определен на основании результатов численного эксперимента (Таблица 4). В ходе эксперимента исследовалась возможность определения поврежденного присоединения по максимальному значению энергии спектра среди отходящих линий L_i , где i – номер линии, а также принималось во внимание соотношение минимального и максимального значения.

Преимущество использования максимального значения энергии спектра $E_{\Sigma\max}$ в качестве критерия повреждения продемонстрировано через сравнение с существующим критерием на основе максимального среднеквадратичного значения суммы высших гармоник Σ_{Vg} . Существующий критерий показал свою неэффективность при работе в таких граничных условиях, как низкий уровень THD (0,4% и менее), а также при ОЗЗ в линии со значением ёмкостного тока менее 0,1 А. Установлено, что минимальная величина критерия $E_{\Sigma\max}/E_{\Sigma\min}$, гарантирующая работоспособность метода, составляет 1,5 о.е. при THD=0,4% и равномерном распределении нагрузок.

Таблица 4 – Результаты определения критерия чувствительности разработанного алгоритма

Используемый критерий	Номер линии	ОЗЗ В Л1	ОЗЗ В Л1	ОЗЗ В Л1	ОЗЗ В Л3	ОЗЗ В Л3	ОЗЗ В Л2
Энергия спектра, о.е.	1	0,00031	0,00037	273,2	30250	30330	30390
Среднеквадратичное значение суммы ВГ, А		0	0	0,10	15,4	9,8	9,9
Энергия спектра, о.е.	2	0,0002	0,00025	28,45	39,36	127,7	46190
Среднеквадратичное значение суммы ВГ, А		0	0	0,012	1,35	1,01	12,3
Энергия спектра, о.е.	3	0	0	0	33650	37610	0
Среднеквадратичное значение суммы ВГ, А		0	0	0	21,2	12,1	0
$E_{\Sigma\max}/E_{\Sigma\min}$	–	1,55	1,5	9,60	854,93	294,52	1,52
$\Sigma I_{Vg\max}/\Sigma I_{Vg\min}$	–	–	–	–	15,70	11,98	1,24

Результаты работы алгоритма легли в основу теоретического базиса разработанной математической модели дополнительного нагрева токоведущих частей ЛЭП токами ВГ за время существования ОЗЗ в сети.

Режим однофазного замыкания на землю характеризуется значительным уровнем гармонических составляющих, о чем говорилось ранее. Соответственно, за время существования ОЗЗ в сети возникает дополнительный нагрев токоведущих частей. Дополнительный нагрев кабельных ЛЭП высшими гармониками в токе ОЗЗ приводит к ускоренному износу изоляции. Кроме того, при больших уровнях ВГ возможен переход из ОЗЗ в короткое замыкание по причине перегрева междуфазной изоляции.

Выражение (6) представляет уравнение теплового баланса для трехфазного кабеля на основе коэффициентов в узлах разложения пакетного вейвлет-преобразования $i_{j,m}$.

$$\frac{3}{2^N} \sum_{n=1}^{2^{j-1}n(m+1)-1} i_{j,m}^2 R_{20} (1 + \alpha (\Theta - 20)) = \frac{\Theta - \Theta_{окр}}{S_{из} + S_{окр}}, \quad (6)$$

где R_{20} – сопротивление постоянному току жилы кабеля при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$; α – линейный температурный коэффициент активного сопротивления материала токопроводящей жилы; Θ – фактическая температура токопроводящей жилы; $\Theta_{окр}$ – температура окружающей среды (в случае прокладки в земле принимается температура поверхности земли); $S_{из}$ – тепловое сопротивление изоляции кабеля.

В случае прокладки одного кабеля в траншее тепловое сопротивление грунта на глубине прокладки h можно определить на основе метода зеркальных отображений для однородного грунта по аналогии с электрическим полем по выражению (7)

$$S_{окр} = \frac{1}{2\pi\lambda_{грунт}} \ln\left(\frac{2h}{d_k} + \sqrt{\frac{4h^2}{d_k^2} - 1}\right), \quad (7)$$

где $\lambda_{грунт}$ – коэффициент теплопроводности грунта; d_k – наружный диаметр кабеля.

Фактическую температуру центрального кабеля трёхфазной системы однофазных кабелей можно определить по выражению (8)

$$\Theta_{\phi 2} = \frac{1}{2^N} \sum_{2^{j-1}m}^{2^j n(m+1)-1} i_{j,m}^2 R_{20} (1 + \alpha(\Theta_{\phi 2} - 20))(S_{из} + S_{г0}) + P_{из} \frac{S_{из}}{2}, \quad (8)$$

где $S_{г0}$ – тепловое сопротивление единичного кабеля; $P_{из} = U^2 \omega C \cdot \text{tg} \delta$.

Процесс дополнительного нагрева рассмотрен на примере кабеля АПвП 1х50/16, проложенного в земле, с изоляцией из сшитого полиэтилена, с жилами, выполненными из алюминиевой проволоки, рассчитанного на напряжение 10 кВ.

Для оценки величины температуры в кабельной линии электропередачи для режимов работы с ОЗЗ и его отсутствием используется комбинированный частотно-стационарный метод исследования. Данный метод, позволяющий смоделировать установившийся процесс с учётом температурной зависимости активных сопротивлений, используется для расчета переменных электромагнитных полей. Численное моделирование процесса нагрева кабеля произведено в программе COMSOL Multiphysics.

Результаты численного моделирования представлены на Рисунке 14 и в Таблице 5.

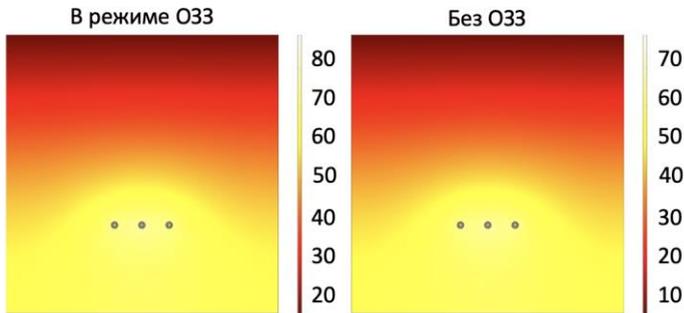


Рис. 14 – Температурное поле кабеля и близлежащего грунта при установившемся ОЗЗ

Таблица 5 – Расчетные значения температуры в различных режимах работы кабельной ЛЭП

	Фаза А	Фаза В	Фаза С	Оболочка А	Оболочка В	Оболочка С
В режиме ОЗЗ, А	86,6	89,1	87,1	77,2	79,7	77,7
Без ОЗЗ, А	71,8	73,8	72,2	64,4	66,3	64,8

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе изложены и обоснованы решения научной задачи, имеющей значение для развития электроэнергетики, направленные на повышение чувствительности метода относительного замера высших гармоник для определения поврежденного присоединения с однофазным замыканием на землю:

1. Метод относительного замера уровней высокочастотных составляющих в токах нулевой последовательности в диапазоне от 100 до 700 Гц, позволяющий отказаться от использования среднеквадратичных и среднев्यпрямленных значений сумм высших гармоник и перейти к замеру энергии спектра частотного диапазона.

2. Разработан алгоритм селективного определения отходящей линии с ОЗЗ на основе энергии спектра вейвлет-коэффициентов пакетного вейвлет-преобразования, что позволяет отказаться от аппаратной фильтрации основной частоты и белого шума в сигнале тока Σi_0 . Эффективность работы алгоритма доказана результатами проведения серий полунатурных, физических и численных экспериментов, которые показали, что такие негативные факторы, как наличие белого шума, малые значения ёмкостных токов и преобладание основной частоты, не оказывают влияния на результат работы алгоритма.

3. Сформирован критерий определения отходящей линии с ОЗЗ, основанный на соотношении наибольшего и наименьшего значения энергии спектра высокочастотных составляющих в токах нулевой последовательности, позволяющий определить поврежденное присоединение при соотношении 1,5 и более о.е.

4. Проведен сравнительный анализ результатов определения отходящей линии с использованием среднеквадратичных значений сумм высших гармоник, полученных при помощи преобразования Фурье и энергии спектра вейвлет-коэффициентов в узлах дерева разложения, соответствующих диапазону от 100 до 700 Гц. В результате разработанный метод позволяет повысить чувствительность на 15 и более %.

5. Разработан прототип устройства селективного определения отходящей линии с ОЗЗ, позволяющий анализировать до 20 присоединений, используя данные SV-потока ВАПС, и до 9 присоединений при подключении к аналоговым цепям.

Перспективы дальнейшей разработки темы диссертации заключаются в исследовании эффективности работы разработанного прототипа устройства в реальной электрической сети с изолированной нейтралью, а также в разработке методики оценки воздействия токов ОЗЗ на температурное поле кабельной линии электропередачи и близлежащий грунт.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК РФ и приравненных к ним:

1. **Парамзин, А. О.** Применение вейвлет-преобразования в задачах поиска поврежденного присоединения с однофазным замыканием на землю по данным SV-потока / А. О. Парамзин, С. Ю. Долингер. – Текст : непосредственный // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. – 2024. – № 4(103). – С. 17-28.

2. **Парамзин, А. О.** Разработка способа селективного определения линии с однофазным замыканием на землю для промышленных сетей 6-35 кВ с изолированной нейтралью при преобладании несинусоидальной нагрузки / А. О. Парамзин. – Текст : непосредственный // Омский научный вестник. – 2023. – № 4(188). – С. 100-108.

3. **Парамзин, А. О.** Анализ режимов систем электроснабжения на основе цифровой обработки потока мгновенных значений напряжений и токов с помощью вейвлет-преобразования / О. В. Архипова, Д. С. Осипов, А. О. Парамзин. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 2(42). – С. 87-96.

Публикации в материалах конференций, входящих в библиографическую базу Scopus:

4. **Paramzin, A. O.** Selecting the Alternating Current Waveform Measurement Channel for Detecting a Feeder with a Single-Phase Ground Fault / A. O. Paramzin, S. Y. Dolinger. – Текст : электронный // 2024 6th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE) 29th February-2th March 2024, Moscow, Russia, 2024. – С. 1-5.

5. **Paramzin, A. O.** Wavelet transform algorithms in analyzing transient phenomena and power quality parameters / D. S. Osipov, A. O. Paramzin, V. A. Tkachenko. – Текст : электронный // International Russian Automation Conference 10th-16th September 2023, Sochi, Russia, 2023. – С. 31-35.

Другие работы автора:

6. **Парамзин, А. О.** Измерение мгновенных значений токов отходящих линий для поиска поврежденного присоединения с замыканием на землю / А. О. Парамзин, С. Ю. Долингер. – Текст : электронный // Материалы Международной научно-практической конференции им. Д. И. Менделеева, посвящённой 15-летию Института промышленных технологий и инжиниринга : Сборник статей конференции. В 3-х томах. Тюмень, 16–18 ноября 2023 года. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2024. – С. 45-48.

7. **Парамзин, А. О.** Идентификация однофазных замыканий на землю в сетях 6-35 кВ на основе вейвлет-преобразования / Н. Н. Долгих, Д. С. Осипов, А. О. Парамзин. – Текст : непосредственный // Вестник Югорского государственного университета. – 2023. – № 1(68). – С. 139-146.

8. **Парамзин, А. О.** Идентификация однофазных замыканий на землю в сетях 6-35 кВ / А. О. Парамзин. Текст : электронный // Пространственное социально-экономическое развитие территорий: формирование комфортной среды и повышение качества жизни населения : Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием XIV Международного IT-форума с участием стран БРИКС и ШОС, Ханты-Мансийск, 06–07 июня 2023 года. – Ханты-Мансийск: Югорский государственный университет, 2023. – С. 271-276.

Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ:

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024666601 Российская Федерация. «Математическая модель распределительной сети 6(10) кВ с учетом характерных особенностей нефтегазодобывающих регионов»: No 2024663068: заявлено 06.06.2024: опубликовано (зарегистрировано) 15.07.2024 / **А. О. Парамзин**. – 1 с. – Текст : непосредственный.

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020662624 Российская Федерация. «Автоматизированная система определения отходящей линии с однофазным замыканием на землю в электрических сетях с изолированной нейтралью»: No 2024663300: заявлено 10.06.2024: опубликовано (зарегистрировано) 24.06.2024 / **А. О. Парамзин** – 1 с. – Текст : непосредственный.

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета 24.2.350.04, созданном на базе ОмГТУ

Печатается в авторской редакции. Подписано в печать 12.12.2024 г.

Формат 60x84/16.

Усл. печ. л. 1.25. Тираж 100 экз. Заказ № 2024

Отпечатано в ООО "Издательский центр КАН"

644122, г. Омск, ул. Красный путь, 30.

Лицензия ПЛД №58-47 от 21.04.97