

На правах рукописи



ОСИПОВ ДМИТРИЙ СЕРГЕЕВИЧ

**МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ВЕЙВЛЕТ АНАЛИЗА НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ
НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 0,4–110 кВ.**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции
и электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Красноярск – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Омский государственный технический университет»

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Горюнов Владимир Николаевич

Официальные оппоненты: **Абрамович Борис Николаевич**
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет», кафедра электроэнергетики и электромеханики, профессор

Бердин Александр Сергеевич
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», кафедра автоматизированных электрических систем, профессор

Манусов Вадим Зиновьевич
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», кафедра систем электроснабжения предприятий, профессор

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Защита диссертации состоится «23» октября 2019 г. в 14⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 212.099.07, созданного на базе Сибирского федерального университета по адресу: 660049, г. Красноярск, ул. Ленина, д. 70, ауд. А-204.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» <http://sfu-kras.ru>

Автореферат разослан «_____» _____ 2019 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета

Сизганова Евгения Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

В последние десятилетия для анализа и описания динамики сложных нелинейных процессов в электроэнергетике все чаще находят применение математический аппарат вейвлет преобразования. Вейвлеты применяются в качестве иерархического базиса для анализа возмущений в широких диапазонах частот в условиях нестационарности исследуемых процессов. Анализ литературы показывает, что инструмент вейвлет преобразования привлекается для исследования переходных процессов в электроэнергетических системах (ЭЭС), разработке алгоритмов релейной защиты, диагностике электрооборудования, прогнозирования нагрузки, электрических измерениях и т.д. Вейвлет преобразование (ВП) в отличие от преобразования Фурье обеспечивает двумерную интерпретацию исследуемой функции тока (напряжения, мощности) прежде всего в физическом пространстве (мгновенное значение величины, время) и в частотном пространстве (амплитуда, частота). Таким образом, вейвлеты могут быть успешно применены для анализа несинусоидальных нестационарных режимов электроэнергетических систем.

Существенное увеличение доли электроприёмников, имеющих нелинейную вольт-амперную (вебер-амперную) характеристику (ВАХ) в системах электроснабжения (СЭС) промышленных предприятий и гражданских зданий (частотно-регулируемый электропривод, вентильные преобразователи, дуговые сталеплавильные печи, светодиодные источники света, импульсные блоки питания компьютеров и др.) явилось причиной повышенного внимания исследователей к вопросам измерения, анализа, нормирования и моделирования несинусоидальных режимов. Высшие гармоники (ВГ) в СЭС приводят к дополнительным потерям в токоведущих частях, уменьшению срока службы элементов СЭС, перегреву токоведущих частей и даже перегоранию нулевых проводников в сетях напряжением 380/220 В, возникновению резонансных явлений при наличии батарей статических конденсаторов (БСК), отрицательному влиянию на системы учета электрической энергии. Указанные негативные последствия снижают энергетическую эффективность отдельных электроприёмников и СЭС в целом, что затрудняет достижение целей, сформулированных в Федеральном Законе ФЗ №261 от 23.11.2009 «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности» и стратегии развития электросетевого комплекса РФ.

Большой вклад в развитие теории, разработку методов и алгоритмов анализа показателей качества электроэнергии и несинусоидальных режимов электроэнергетических систем внесли коллективы НИУ «МЭИ», СПбГУ, СФУ, ТПУ, ИСЭМ СО РАН, НГТУ, ИрГУПС, БГТУ им. В.Г. Шухова, ЛГТУ и ряд других организаций, известные отечественные и зарубежные учёные Б.Н. Абрамович, М.А. Авербух, А.В. Агунов, Г.Я. Вагин, С.И. Гамазин, В.П. Довгун, И.В. Жежеленко, Ю.С. Железко, В.П. Закарюкин, В.И. Зацепина, И.И. Карташев, В.З. Манусов, В.Г. Сальников, С.С. Смирнов, В.Н. Тульский, В.Я. Ушаков, С.А. Цырук, Я.Э. Шклярский, J. Arrillaga, A. Kusko и многие их коллеги.

Наличие существенной доли электроприёмников напряжением 0,4 кВ, искажающих синусоидальность формы напряжения и тока оказывает влияние на распространение гармоник в распределительные сети 6-10 кВ. Сети среднего класса напряжения могут работать в режиме изолированной или компенсированной нейтрали. При однофазном замыкании на землю (ОЗЗ) в таких сетях токи замыкания определяются спектром ВГ на поврежденной фазе в момент, предшествующий возникновению повреждения. Дополнительно ток может содержать гармоники, генерируемые дугогасящим реактором (ДГР) и дугой в месте повреждения. Таким образом, на основании спектрального анализа высших гармонических составляющих токов Z_{i0} и напряжения Z_{u0} разработаны и

функционируют устройства защиты, позволяющие определить отходящую линию, где произошло ОЗЗ. Математический аппарат вейвлет анализа представляет исследователю возможность зафиксировать высокочастотные компоненты, возникающие при переходном процессе в результате ОЗЗ. Как показали исследования спектральной плотности тока замыкания (В.А. Шуин и др. сотрудники ИГЭУ) для организации релейной защиты от ОЗЗ с использованием данных переходного процесса, «рабочая частота измерительных органов может быть ограничена значением 2–3 кГц». В условиях стратегической инициативы, предполагающей развитие цифровых подстанций и постепенного внедрения оптических трансформаторов тока и напряжения потребуется разработка алгоритмов, способных осуществлять цифровую фильтрацию сигналов тока (напряжения) не только с применением аппаратного способа, но и программными средствами.

В настоящей работе представлена методология применения математического аппарата ВП для решения задач цифровой фильтрации и частотной декомпозиции параметров нормального, аварийного и послеаварийного режимов (токов, напряжений, мгновенной мощности) ЭЭС. Представлена методика и критерий выбора оптимального типа вейвлета для расчета установившихся несинусоидальных режимов СЭС и расчета дополнительных потерь мощности и энергии при нестационарных режимах с учетом фактического нагрева токоведущих частей на основе вейвлет коэффициентов.

Объект исследований:

Электроэнергетические системы и сети 0,4–110 кВ, имеющие в своем составе электроприёмники с нелинейными ВАХ при нестационарных режимах работы.

Предмет исследований:

Частотный анализ параметров нормального, аварийного и послеаварийного режимов электроэнергетических систем и сетей 0,4–110 кВ на основе вейвлет преобразования.

Связь темы диссертации с общенаучными (государственными) программами. Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках выполнения государственного контракта № 14.В37.21.0332 от 27.07.12 «Разработка математических моделей, алгоритмов, программных и технических средств повышения энергетической эффективности функционирования устройств и систем электроэнергетики. В рамках реализации программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» Соглашение №14.577.21.0097 от 22.08.2014 г. «Разработка научно-технических решений по селективному определению поврежденных фидеров в сетях с компенсированной нейтралью». Работа направлена на развитие цифровизации электроэнергетической отрасли и соответствует положениям плана мероприятий Национальной технологической инициативы по направлению «Энерджинет» (утвержден распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 апреля 2018 г. №830-р). Основные положения, выносимые на защиту, соответствуют приоритетным направлениям Программы инновационного развития ПАО «ФСК ЕЭС» на 2016-2020 годы с перспективой до 2025 года в части развития цифровых подстанций. Задачи, которые решены в рамках выполнения диссертации, создают научную и теоретическую основу для развития цифровой обработки потока данных о нормальных, аварийных и послеаварийных режимах электрических сетей 0,4–110 кВ, в том числе при анализе показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения.

Целью диссертационной работы является разработка принципов анализа, контроля и моделирования несинусоидальных нестационарных режимов электроэнергетических систем на основе вейвлет преобразования цифрового потока мгновенных значений токов и напряжений.

Для достижения указанной цели в работе поставлены и **решены следующие научные задачи:**

1. Определить критерий выбора оптимального типа материнского вейвлета для задач исследования показателей качества электроэнергии.
2. Разработать методы анализа качества электроэнергии на основе алгоритмов вейвлет преобразования.
3. Разработать методы и алгоритмы расчета интегральных характеристик параметров установившихся и переходных режимов ЭЭС (действующих значений токов и напряжений, составляющих мощности) на основе пакетного вейвлет преобразования.
4. Разработать рекурсивный алгоритм расчета переходных процессов в электрических сетях 0,4–110 кВ.
5. Разработать метод идентификации интергармоник, как показателя качества электроэнергии.
6. Разработать метод определения отходящей линии, где произошло однофазное замыкание на землю в сетях с изолированной и компенсированной нейтралью 6-35 кВ на основе спектральных характеристик вейвлет преобразования.
7. Оценить коэффициенты чувствительности разработанного метода сигнализации ОЗЗ в сетях 6-35 кВ на основе экспериментально полученных уровней высших гармоник.
8. Модернизировать алгоритм определения частоты контура нулевой последовательности с помощью вейвлет преобразования для автоматического управления дугогасящим реактором в сетях 6-35 кВ.
9. Разработать метод расчета дополнительных потерь в токоведущих частях от высших гармоник с учетом зависимости сопротивления от температуры.
10. Разработать метод расчета динамической устойчивости узла с асинхронной нагрузкой при наличии высших гармоник.

Научная новизна работы.

1. Сформулированы и обоснованы методические основы применения математического аппарата ВП для расчета, анализа и моделирования нестационарных несинусоидальных режимов электроэнергетических систем и сетей 0,4–110 кВ. Предложена оригинальная идея согласования полосы пропускания вейвлет функции с шириной гармонической группы, определённой в действующей нормативной документации по средствам измерения гармоник и интергармоник. Создана модель эффективного применения вейвлет преобразования для обработки и передачи цифрового потока мгновенных значений токов и напряжений.
2. Предложен критерий для выбора оптимального типа вейвлета в задачах расчета и моделирования несинусоидальных режимов электроэнергетических систем и сетей 0,4–110 кВ. Критерий основан на определении локальной энергетической плотности исследуемой гармонической группы и на возможности провести обратное вейвлет преобразование (реконструкцию сигнала) с наименьшей погрешностью.
3. Разработана новая методика расчета переходных процессов в электрических цепях, основанная на рекурсивном алгоритме и задании напряжения (э.д.с.) через вейвлет коэффициенты дискретного вейвлет преобразования.
4. Разработан метод анализа качества электроэнергии с помощью алгоритмов вейвлет преобразования. Доказана эффективность применения вейвлет преобразования для сжатия цифрового потока данных, характеризующих режимы работы электрических сетей. Доказано, что высокочастотные детализирующие вейвлет коэффициенты следует использовать в устройствах релейной защиты и автоматики для сигнализации об изменении режима работы электрической сети.

5. Проведена модернизация существующих математических алгоритмов определения отходящей линии с ОЗЗ в сетях 6 – 35 кВ с компенсированной нейтралью с применением теории вейвлет анализа. Предложено использовать алгоритм вейвлет разложения для программной фильтрации высокочастотных компонент токов и напряжений нулевой последовательности.

6. Разработан способ автоматической настройки компенсации ёмкостных токов замыкания на землю в электрических сетях. Способ основан на определении частоты свободных колебаний контура посредством частотной декомпозиции тока контура нулевой последовательности с помощью дискретного вейвлет преобразования.

7. Предложен нетрадиционный подход для анализа, идентификации интергармоник в электрических сетях 0,4–110 кВ на основе вейвлет преобразования. Разработан алгоритм для расчета дополнительных потерь в токоведущих частях от интергармоник.

8. Проведена модернизация методов расчета дополнительных потерь мощности в токоведущих частях от высших гармоник с учетом зависимости сопротивления от температуры. Разработанный на основе вейвлет преобразования метод, позволяет определять потери от отдельных гармоник с учетом нестационарных режимов электрических сетей.

9. Предложена методика анализа динамической устойчивости узлов нагрузок электроэнергетических систем (самозапуска электродвигателей) с учётом несинусоидальности формы кривой напряжения в точке общего подключения.

Теоретическая значимость работы.

Результаты диссертационной работы являются развитием теории и методов математического моделирования ЭЭС при несинусоидальных режимах работы, создают методическую основу для совершенствования методов расчета дополнительных потерь от высших гармоник и анализа динамической устойчивости узлов нагрузки, представляют теоретический задел для разработки программного обеспечения общесистемного и отраслевого уровней с использованием современного математического аппарата ВП.

Практическая значимость работы.

Разработанные методы и подходы позволят значительно сократить объемы передаваемой информации (цифровая компрессия данных ВП) о характеристиках режима электрической сети при реализации задач непрерывного мониторинга или развитии технологий Smart Grid («умные сети») и «Цифровая подстанция».

Разработанные алгоритмы позволят повысить точность расчета и анализа дополнительных потерь от ВГ и ИГ, что в конечном итоге окажет влияние на технико-экономические расчеты, связанные с выбором фильтрокомпенсирующих устройств для подавления гармоник. В рамках государственной стратегии развития цифровых подстанций, вейвлет преобразование должно стать одним из инструментов цифрового анализа параметров режима электроэнергетических систем и сетей.

Внедрение результатов.

Предложенные в диссертации алгоритмы и методы анализа переходных процессов (коротких замыканий, однофазных замыканий на землю) с помощью вейвлет коэффициентов пакетного вейвлет преобразования использовались при разработке мероприятий по обеспечению допустимых параметров энергетического режима и динамической устойчивости сетей ООО «РН-Юганскнефтегаз» на подстанциях 110/35/6 кВ, что подтверждено актом внедрения.

Разработанный алгоритм определения поврежденного присоединения на основе вейвлет преобразования и способ настройки компенсации ёмкостных токов замыкания на землю в электрических сетях с компенсированной нейтралью (патент на изобретение RUS 26445B2 18.11.2016), были использованы при реализации программы «Исследова-

ния и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» Соглашение №14.577.21.0097 от 22.08.2014 г. «Разработка научно-технических решений по селективному определению поврежденных фидеров в сетях с компенсированной нейтралью». Получены акты внедрения результатов диссертационной работы на шести электросетевых предприятиях г. Омска, г. Красноярска и Ханты-Мансийского АО.

Теоретические результаты диссертации, и созданные на их базе учебно-методические работы а так же разработанное программное обеспечение применяются при реализации учебного процесса ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет». Программное обеспечение используется бакалаврами, магистрантами и аспирантами при выполнении научно-исследовательских работ.

Акты об использовании и внедрении результатов диссертационной работы приведены в приложениях.

Методология и методы диссертационного исследования основаны на положениях общей теории вейвлетов и гармонического анализа; моделирования, расчета, анализа установившихся и переходных процессов ЭЭС.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту.

1. Критерий выбора оптимального типа вейвлет функции для анализа режимов электроэнергетических систем и качества электроэнергии.

2. Методические основы и программная реализация алгоритма определения показателей, характеризующих параметры нестационарных несинусоидальных режимов электроэнергетических систем (активной, реактивной, полной мощности, действующих значений токов и напряжений отдельных частот) на основе пакетного вейвлет преобразования.

3. Методы сжатия цифрового потока данных, характеризующих режим работы электрических сетей.

4. Модифицированный алгоритм определения отходящей линии, где произошло замыкание на землю в сетях с изолированной (компенсированной) нейтралью, по энергетическим показателям (энергии спектра) отдельных детализирующих вейвлет коэффициентов.

5. Методы, способы и вычислительные алгоритмы идентификации и оценки отклонения от требуемого уровня показателя качества электроэнергии (несинусоидальность, колебания напряжения, ИГ) по величине и характеру изменения коэффициентов пакетного вейвлет преобразования, заданных в относительных единицах.

6. Методы и алгоритмы расчета переходных процессов электрических цепей с применением рекурсивных методов, где в качестве исходных данных используются вейвлет коэффициенты заданной глубины разложения.

7. Способ автоматической настройки дугогасящего реактора для компенсации ёмкостных токов замыкания на землю в электрических сетях 6-35 кВ, основанный на выделении частоты свободных колебаний контура с применением алгоритма пакетного вейвлет преобразования.

8. Модификация метода расчета дополнительных потерь мощности и энергии по вейвлет коэффициентам с учётом фактического нагрева токоведущих частей при несинусоидальных режимах.

9. Алгоритмы и программная реализация анализа динамической устойчивости узлов нагрузок при несинусоидальных режимах системы электроснабжения.

Степень достоверности полученных результатов полученных результатов подтверждается совпадением результатов имитационного и численного моделирования с результатами физических экспериментальных данных, полученных с использованием

сертифицированного оборудования, соответствующего требованиям международных стандартов, приборов по измерению показателей качества электроэнергии. Чистота экспериментальных исследований обеспечивается корректным использованием современных научно-исследовательских программных продуктов, реализующих алгоритмы ВП. Теоретические результаты получены с использованием обобщения передового мирового опыта применения аппарата ВП для частотного анализа нестационарных динамических систем, в том числе для ЭЭС.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. В диссертационной работе проведены исследования по развитию и совершенствованию теоретической базы электроэнергетики с целью снабжения потребителей электроэнергией требуемого качества. Работа соответствует паспорту специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы по направлениям исследования: п. 6 «Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике», п. 7 «Разработка методов расчета установившихся режимов, переходных процессов и устойчивости электроэнергетических систем», п. 12 «Разработка методов контроля и анализа качества электроэнергии и мер по его обеспечению».

Апробация работы.

Основные положения и научные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях: VII, VIII Международной научно-технической конференциях «Динамика систем, механизмов и машин» (Омск, 2009, 2012); Региональной молодёжной научно-технической конференции «Омское время – взгляд в будущее» (Омск, 2010); Международной научно-технической конференции «Энергосбережение, энергоэффективность, экономика» (Сургут, 2010); Всероссийской научно-технической конференции «Россия молодая: передовые технологии – в промышленность» (Омск, 2013); IV Международной научно-технической конференции CIGRE «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем» (Екатеринбург, 2013); International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015 - Proceedings (Omsk, May 21-23, 2015); 11th International Conference on ELEKTRO (Slovakia, May 16-18, 2016); International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2016 – Proceedings (Moscow, May 12-14, 2016); 3rd International Conference on Manufacturing and Industrial Technologies, ICMIT 2016 (Istanbul, Turkey, May 25-27, 2016); Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICEAM Челябинск 2016, Москва 2018).

Публикации и личный вклад автора. Материал диссертации опубликован в 61 научном труде (включая 29 публикации в изданиях из списка ВАК, 15 работ, индексируемых в базе SCOPUS). Личный вклад автора в совместных публикациях составляет от 50 до 75%.

Личный вклад автора состоит в постановке цели и задач исследования, разработке методических основ применения ВП для анализа и расчета установившихся и переходных процессов в ЭЭС, разработке критерия оптимального выбора типа материнского вейвлета; разработке оригинальной идеи использовать ВП для выделения частоты свободной составляющей и реализация её в алгоритме управления компенсацией ёмкостных токов; разработке алгоритма идентификации линии с ОЗЗ по локальным энергетическим спектрам вейвлет преобразования; непосредственном участии в получении экспериментальных данных на действующих ПС 110/35/6 кВ и последующей интерпретации этих данных; подготовке основных публикаций по выполненной работе.

Структура и содержание диссертации. Диссертационная работа содержит 305 страниц машинописного текста, который поясняется 144 рисунками и 10 таблицами.

Она состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Список литературы содержит 353 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе исследованы и научно обоснованы вопросы применения алгоритмов вейвлет преобразования для анализа и обработки, нестационарных во времени и не однородных в пространстве функций и сигналов, характеризующих нормальные, аварийные и послеаварийные режимы электроэнергетических систем. Идея базируется на обобщении передового опыта применения вейвлет преобразования в физике и математике для анализа сигналов, когда результаты анализа должны содержать не только общую частотную характеристику сигнала, но и сведения об определённых локальных координатах, на которых зафиксированы те или иные группы частотных составляющих. Представлены основные элементы теории вейвлет анализа и приводится обоснование перспективности применения данной теории к анализу электроэнергетических систем.

Отличие вейвлет преобразования и оконного преобразования Фурье заключается в форме анализирующих функций. Все функции оконного преобразования Фурье состоят из одной и той же функции-оболочки, сдвинутой во времени и имеющей одинаковую ширину. Функция вейвлет преобразования имеет переменную ширину во времени, зависящую от частоты. Вейвлет функции для высокочастотных составляющих сужаются, а для низкочастотных становятся шире. В итоге, ВП позволяет с высокой точностью анализировать высокочастотные возмущения, имеющие короткую продолжительность.

Впервые фундаментальные положения теории вейвлет анализа были выполнены И. Мейером (Y. Meyer), И. Добеши (I. Daubechies), и С.А. Малла (S.A. Mallat). Основные положения о применимости метода вейвлет преобразований для анализа режимов работы электроэнергетических систем впервые были опубликованы Д. Робертсоном (D. Robertson) и П. Рибейро (P. Ribeiro) в 1994 г. В данных работах были представлены основные понятия теории вейвлетов, а также были раскрыты потенциальные сферы применения математического аппарата вейвлет преобразования при изучении сигналов тока и напряжения. Позднее С. Сантосо (S. Santoso) предложил использовать вейвлеты для обнаружения и локализации искажений показателей качества электроэнергии – колебаний, отклонения и несинусоидальности напряжения.

В научно-технической литературе принято различать непрерывное (1) и дискретное (2) ВП¹:

$$\hat{F}(a, b) = |a|^{-1/2} \int f(t) \psi \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (1)$$

$$\hat{F}_{m,n} = a_0^{-m/2} \int f(t) \psi \left(a_0^{-m} t - nb_0 \right) dt \quad (2)$$

где $\psi_f(t)$ – функция материнского вейвлета.

Формула (2) получается из (1), если принять, что a и b принимают только дискретные значения: $a = a_0^m$, $b = nb_0 a_0^m$, а $m, n \in Z$.

¹ Добеши, И. Десять лекций по вейвлетам / И. Добеши. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 464 с.

Вейвлет преобразование для нестационарных режимов СЭС позволяет избежать эффекта растекания спектра (рисунок 1), что возможно при реализации преобразования Фурье при недостаточном внимании к выбору ширины окна.

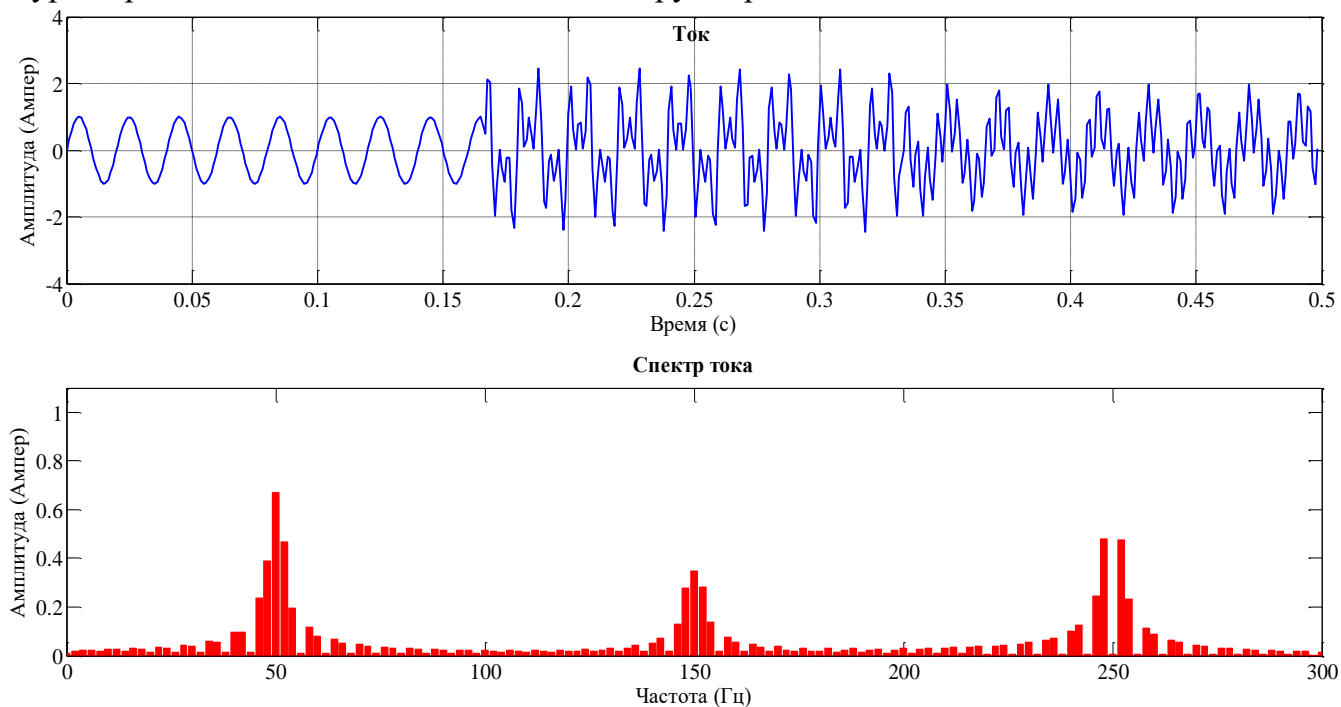


Рисунок 1 – Нестационарный несинусоидальный ток в узле нагрузки. Эффект растекания спектра при реализации преобразования Фурье

Обратное непрерывное ВП (реконструкция) может быть выполнено по формуле²:

$$f(t) = C_{\psi}^{-1} \iint \hat{F}(a,b) \psi_{ab}(t) \frac{dad b}{a^2}. \quad (3)$$

Вейвлет преобразование позволяет получить трехмерную интерпретацию сигнала в осях амплитуда – частота – время. Для решения ряда прикладных задач, в том числе для анализа несинусоидальных режимов СЭС непрерывное ВП, зачастую оказывается избыточным. Для расчета ВГ и коэффициента гармонических искажений (THD) в настоящей работе предлагается использовать дискретное ВП (рисунок 3).

Любой дискретный сигнал тока или напряжения может быть представлен в виде суммы аппроксимирующих и детализирующих коэффициентов:

$$i(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} i_{j,k}^A \varphi_{j,k}(t) + \sum_{j=J}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} i_{j,k}^D \psi_{j,k}(t). \quad (4)$$

Как показано на рисунке 2, каждый аппроксимирующий или детализирующий коэффициент определяет полосу частотного разрешения сигнала. Ветвь разложения $a_{i,j}$ принято называть «аппроксимирующими коэффициентами» (рисунок 3), а ветвь d_j – «детализирующими коэффициентами». Каждый последующий элемент $a_{i,j+1}$ получается путём повторного применения фильтров частот, в то время как для детализирующих коэффициентов заключительным вычислительным шагом всегда является высокочастотная фильтрация.

² Смоленцев, Н. К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB / Н.К. Смоленцев. – М.: ДМК Пресс, 2014. – 628 с.

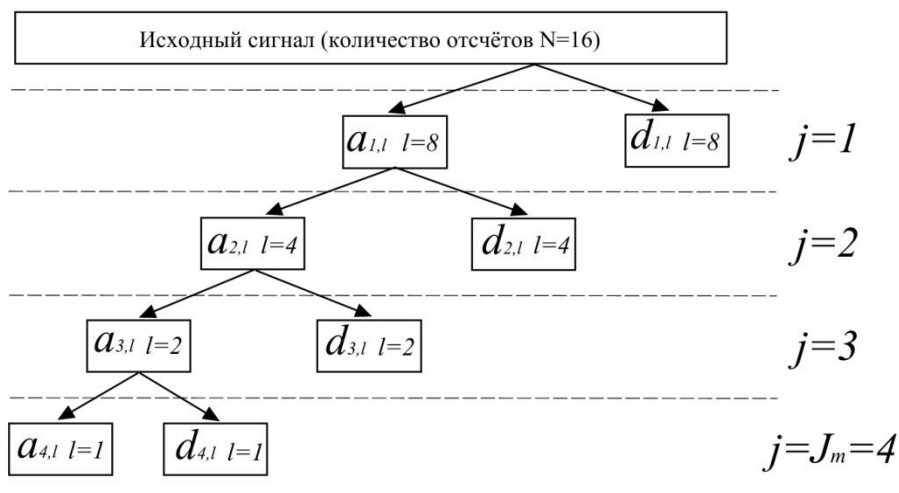


Рисунок 2 – Схема дискретного вейвлет преобразования

Пакетное ВП (рисунок 3), являясь разновидностью дискретного ВП обеспечивает равномерную локализацию частот. Данное обстоятельство позволяет рекомендовать применение пакетного ВП для анализа несинусоидальности (как показателя качества электроэнергии) в системах электроснабжения.

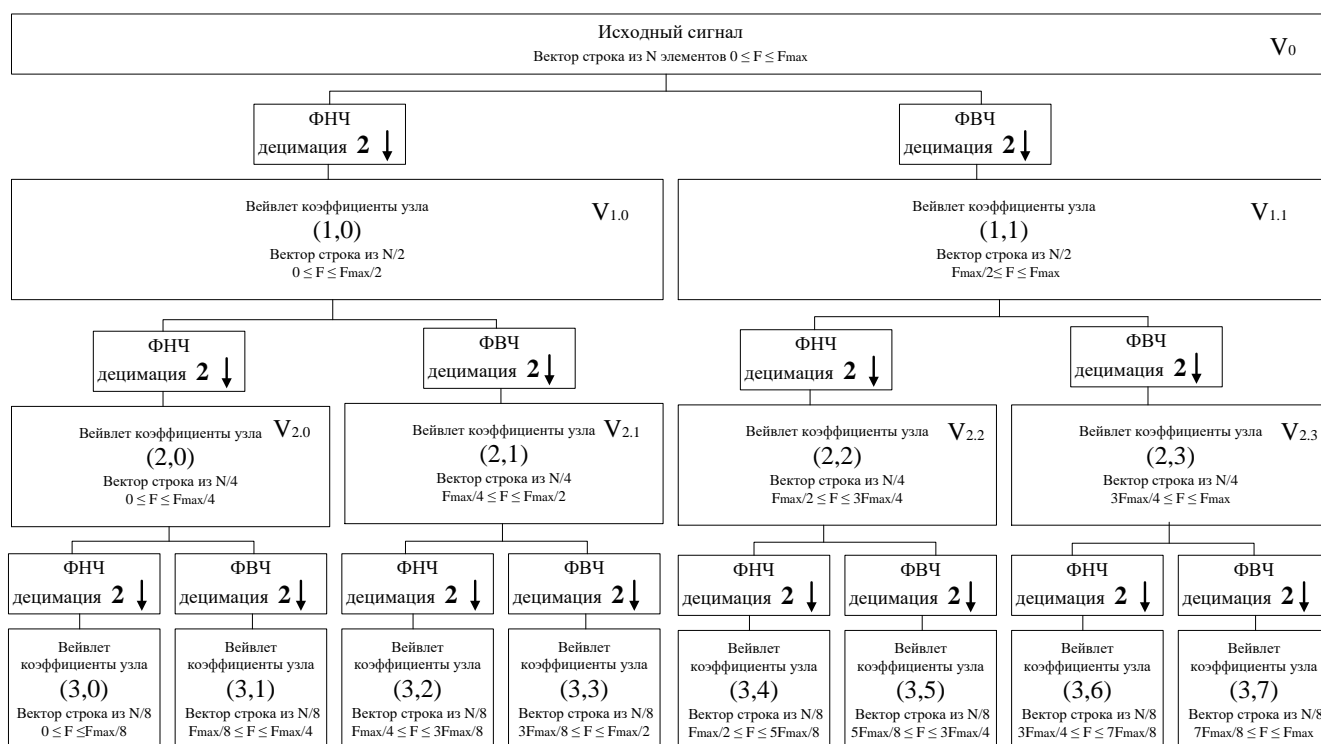


Рисунок 3 – Схема пакетного вейвлет преобразования

Согласно действующему стандарту (ГОСТ 30804.4.30–2013) результаты измерений должны усредняться на интервале 10 периодов. Такое усреднение приводит к растеканию спектра интергармоник в результате чего возникает необходимость осуществлять дополнительную группировку гармонических и интергармонических составляющих напряжений. Это обстоятельство является одной из причин, сдерживающих внедрение в России разработку нормативных требований к допустимым уровням интергармоник в электрических сетях. Применение вейвлет преобразования в электроэнергетике обеспечит выполнение требований стандарта МЭК 61850 по протоколу передачи цифровых мгновенных значений тока и напряжения между интеллектуальными электронными

устройствами (IED). Вейвлет преобразование использует базисные функции с локализацией по времени, что позволяет избежать негативного эффекта растекания спектра. Для реализации алгоритмов ВП отсутствует необходимость выбора ширины окна при анализе электроэнергетических режимов, имеющих случайный характер (изменение мощности и характера нагрузок, изменение конфигурации схемы, короткие замыкания, внутренние и внешние перенапряжения и др.).

Вторая глава посвящена разработке критерия выбора типа вейвлет функции для анализа качества электроэнергии. Разработаны методы расчета действующих значений токов и напряжений в электрических цепях по вейвлет коэффициентам. Представлены разработанные рекурсивные алгоритмы расчета переходных процессов в электрических сетях 0,4–110 кВ и в цепях постоянного тока. Разработаны методы анализа качества электроэнергии, цифрового сжатия потока данных, характеризующих режим электрических сетей.

Для анализа несинусоидальных режимов электрических сетей необходимо выбрать частоту дискретизации и схему вейвлет разложения таким образом, чтобы произошло совмещение полосы пропускания фильтра вейвлет функции и ширины гармонической группы, определённой по ГОСТ 30804.4.7–2013 (рисунок 4).

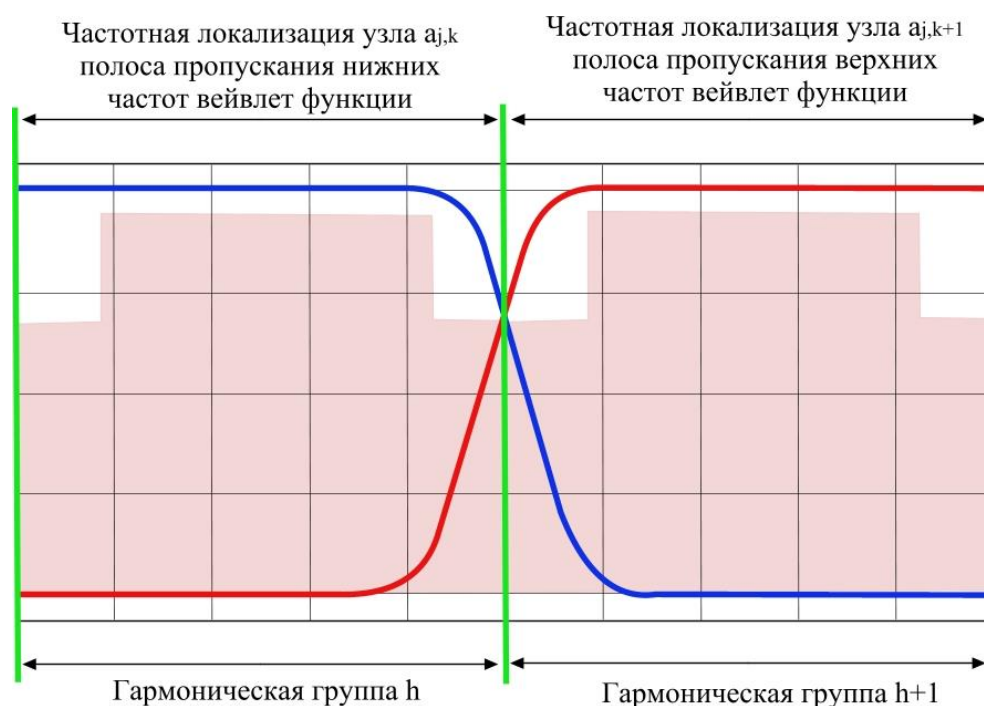


Рисунок 4 – Совмещение частотной локализации вейвлета и гармонических групп

Для гармонической группы h должно быть обеспечено перекрытие полосой пропускания фильтра нижних частот вейвлет функции. Гармоническую группу $h+1$ должна перекрывать полоса пропускания верхних частот. В этом случае частотная локализация узла вейвлет разложения $a_{j,k}$ будет соответствовать ширине гармонической группы h , узел $a_{j,k+1}$ будет характеризовать гармоническую группу $h+1$. Вейвлет коэффициенты, отвечающие за локализацию других гармонических групп, должны быть исключены из расчета. На основе анализа АЧХ вейвлет функций был сформулирован критерий оптимального выбора материнского вейвлета (5) – среднеквадратичное отклонение значений исходного сигнала i_k должно иметь минимальное значение по сравнению с восстановленным по вейвлет коэффициентам сигналом \hat{i}_k и локальная энергия спектра выбранной

гармонической группы, заданной глубины разложения должна быть максимально полно представлена в границах исследуемого частотного диапазона:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (i_k - \hat{i}_k)^2}{\sum_{k=1}^n i_k^2}} \rightarrow \min \\ \Delta_{En} = \frac{E_n}{E_\Sigma} \frac{\sum_{k=n} |i_{j,k}^A|^2 + \sum_{k=n} |i_{j,k}^D|^2}{\sum_{k=-\infty} |i_{j,k}^A|^2 + \sum_{j=J} \sum_{k=-\infty} |i_{j,k}^D|^2} \rightarrow \max \end{array} \right. \quad (5)$$

В работе предложен метод расчета действующих величин параметров режима (токов, напряжений, э.д.с.) ЭЭС по вейвлет коэффициентам, определяющим различные гармонические группы. Действующее значение тока (напряжения, Э.Д.С.), заданного вейвлет коэффициентами определяется по формуле:

$$I = N^{-\frac{1}{2}} \sqrt{\sum_{k \in Z} (i_{J_0,k}^A)^2 + \sum_{k \in Z} \sum_{j=J_0}^{J-1} (i_{j,k}^D)^2} \quad (6)$$

Если в формуле 6 оставить только вейвлет коэффициенты, отвечающие за конкретный частотный диапазон (гармоническую группу в соответствии с ГОСТ 30804.4.7–2013), исключив при этом из расчета вейвлет коэффициенты, характеризующие другие частоты, то можно с достаточной степенью точности получать действующее значение отдельных гармоник.

Далее, во второй главе диссертации производится разработка численного рекурсивного метода расчета переходных процессов. Общая структура предложенного алгоритма представлена следующим порядком.

Шаг 1. Задание параметров исследуемой схемы замещения (напряжений, Э.Д.С., активных, реактивных сопротивлений, частоты сети и т.д.). Выбор оптимального типа вейвлета и глубины разложения функций с учетом (5). Задание требуемого количества итераций N .

Шаг 2. Дискретное вейвлет разложение вынуждающей силы (напряжения, Э.Д.С.). Если напряжение задано мгновенными дискретными значениями в виде вектор строки, состоящей из n -элементов $u(t) = [u_0 \ u_1 \ u_2 \ \dots \ u_{n-1} \ u_n]$, то дискретное разложение сигнала на первом уровне с учетом коэффициентов вейвлет фильтров нижних h_0, h_1 и верхних частот g_0, g_1 в матричном виде реализуется по формуле 7:

$$\begin{pmatrix} h_0 & h_1 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & h_0 & h_1 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & h_0 & h_1 \\ g_0 & g_1 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g_0 & g_1 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & g_0 & g_1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} u_0 \\ u_1 \\ u_2 \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ u_{n-1} \\ u_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_{j,0}^A \\ u_{j,1}^A \\ \dots \\ u_{j,n/2}^A \\ u_{j,0}^D \\ u_{j,1}^D \\ \dots \\ u_{j,n/2}^D \end{pmatrix} \quad (7)$$

Шаг 3. Расчет вейвлет коэффициентов тока цепи рекурсивным методом – для расчета последующего вейвлет коэффициента $i_{Aj,k}^A$ используется предыдущий коэффициент $i_{Aj,k-1}^A$:

$$i_{Aj,k}^A = \frac{\frac{\omega}{X_T + X_{\mathcal{L}}} u_{j,k}^A + \Delta t \cdot i_{Aj,k-1}^A}{\Delta t + \frac{\omega(R_T + R_{\mathcal{L}})}{X_T + X_{\mathcal{L}}}}, \quad (8) \quad i_{Aj,k}^D = \frac{\frac{\omega}{X_T + X_{\mathcal{L}}} u_{j,k}^D + \Delta t \cdot i_{Aj,k-1}^D}{\Delta t + \frac{\omega(R_T + R_{\mathcal{L}})}{X_T + X_{\mathcal{L}}}}. \quad (9)$$

Шаг 4. Обратное ВП (реконструкцию сигнала), последовательности коэффициентов тока преобразуются в единый дискретный сигнал – функцию мгновенного тока. Количество элементов в матрице тока после реконструкции соответствует количеству элементов в матрице напряжений n .

$$\begin{pmatrix} H_0 & 0 & \dots & 0 & G_0 & 0 & \dots & 0 \\ H_1 & 0 & \dots & 0 & G_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & H_0 & \dots & 0 & 0 & G_0 & \dots & 0 \\ 0 & H_1 & \dots & 0 & 0 & G_1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & H_0 & 0 & 0 & \dots & G_0 \\ 0 & 0 & \dots & H_1 & 0 & 0 & \dots & G_1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} i_{Aj,0}^A \\ i_{Aj,1}^A \\ \dots \\ i_{Aj,n/2}^A \\ i_{Aj,0}^D \\ i_{Aj,1}^D \\ \dots \\ i_{Aj,n/2}^D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i_0 \\ i_1 \\ i_2 \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ i_{n-1} \\ i_n \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Шаг 5. Осуществляется переход к следующему интервалу времени $t=t+\Delta t$. Производится пересчет значений вейвлета и масштабирующей функции по формулам (11).

$$\begin{aligned} \varphi_{j,k}(t) &= a_0^{-j/2} \varphi[a_0^{-j}t - kb_0] & \varphi_{j,k}(t) &= a_0^{-j/2} \varphi[a_0^{-j}(t - \Delta t) - kb_0], \\ \psi_{j,k}(t) &= a_0^{-j/2} \psi[a_0^{-j}t - kb_0] & \psi_{j,k}(t) &= a_0^{-j/2} \psi[a_0^{-j}(t - \Delta t) - kb_0]. \end{aligned} \quad (11)$$

Цикл повторяется до достижения заданного числа итераций.

С помощью предложенного алгоритма были произведены расчеты переходного процесса при трехфазном коротком замыкании в сети 110 кВ, модели при коммутации RL цепей в сетях постоянного и переменного тока. Относительная погрешность расчета по разработанной методике не превысила 3%. Разработанный алгоритм может быть использован для создания основ цифровой обработки данных о параметрах режима электроэнергетических систем в рамках развития технологии «цифровые подстанции». Информация о мгновенных значениях напряжений может быть передана в сжатом виде в центр обработки цифровой информации, где с помощью предложенного алгоритма можно будет производить анализ процессов.

Во второй главе произведена разработка методики анализа качества электроэнергии с применением алгоритмов непрерывного, дискретного и пакетного вейвлет преобразования. Представлен анализ трехфазного короткого замыкания, бросков тока при коммутации БСК, импульсных напряжений, несинусоидальных режимов, провалов и прерываний напряжения. Разработана методика разложения исследуемого сигнала и сжатия потока информации для реализации технологии «Цифровая подстанция». Доказано, что коэффициенты сжатия при использовании методов вейвлет преобразования составляют от 12 до 16. Представлена оценка точности вейвлет реконструкции на основе среднеквадратического отклонения исходного и восстановленного сигналов. Произведена оценка эффективности применения 10 типов вейвлет функций для дискретного анализа качества электроэнергии.

В третьей главе произведен анализ проблемы нормирования и обеспечения качества электроэнергии. Проведены экспериментальные исследования и анализ высших гармоник систем электроснабжения предприятий нефтедобывающей отрасли (Роснефть-Юганскнефтегаз). Измерения производились на сертифицированном оборудовании (Metrel MI 2792A). Была разработана методика расчета составляющих мощности при несинусоидальных режимах на основе пакетного ВП.

Напряжение и ток могут быть представлены коэффициентами, полученными в результате пакетного вейвлет разложения:

$$i(t) = \sum_{2^{-j}nm}^{2^{-j}n(m+1)-1} i_{j,m}(k) \cdot \psi(t) \quad (12)$$

$$u(t) = \sum_{2^{-j}nm}^{2^{-j}n(m+1)-1} u_{j,m}(k) \cdot \psi(k). \quad (13)$$

Активная мощность через вейвлет коэффициенты для искомого частотного диапазона может быть определена:

$$P_{j,m} = \frac{1}{n} \left(\sum_{2^{-j}nm}^{2^{-j}n(m+1)-1} i_{j,m}(k) u_{j,m}(k) \right). \quad (14)$$

По теории реактивной мощности Фризе полный ток состоит из двух составляющих: активного и реактивного тока.

$$i = i_a + i_r \quad (15)$$

Реактивную мощность по Фризе определяется по формуле:

$$Q = UI_r = \sqrt{U^2 I^2 - U^2 I_a^2}. \quad (16)$$

В соответствии с поставленной задачей адаптируем теорию реактивной мощности по Фризе для алгоритма на основе пакетного ВП. Для выделения из полного тока активной составляющей необходимо предварительно вычислить активную проводимость исследуемой ветви по формуле:

$$g = \frac{P_{j,m}}{(U_{j,m})^2} = \frac{\frac{1}{n} \left(\sum_{2^{-j}nm}^{2^{-j}n(m+1)-1} i_{j,m}(k) u_{j,m}(k) \right)}{\frac{1}{n} \sum_{2^{-j}nm}^{2^{-j}n(m+1)-1} u_{j,m}^2(k)}. \quad (17)$$

Активная составляющая мгновенного тока в этом случае определяется по формуле:

$$i_a = g u_{j,m} = \frac{\frac{1}{n} \left(\sum_{2^{-j}nm}^{2^{-j}n(m+1)-1} i_{j,m}(k) u_{j,m}(k) \right)}{\frac{1}{n} \sum_{2^{-j}nm}^{2^{-j}n(m+1)-1} u_{j,m}^2(k)} \cdot \frac{1}{n} \sum_{2^{-j}nm}^{2^{-j}n(m+1)-1} u_{j,m}(k). \quad (18)$$

Действующее значение активного тока определяем по:

$$I_a = \sqrt{\frac{1}{2^N} \sum_{2^{-j}nm}^{2^{-j}n(m+1)-1} i_a^2(k)} = \sqrt{\frac{1}{2^N} \sum_{2^{-j}nm}^{2^{-j}n(m+1)-1} i_{j,m}^2(k)}. \quad (19)$$

Коэффициент искажения синусоидальности:

$$K_u = \frac{I_{(v)}}{I_{(50)}} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^2 \sum_{k=0}^{k_m} (i_{j,k}^D)^2}{\sum_{k=0}^{k_m} (i_{3,k}^A)^2 + \sum_{k=0}^{k_m} (i_{3,k}^D)^2}}. \quad (20)$$

Разработанная методика расчета активной и реактивной (по Фризе) мощности для отдельных гармоник (гармонических групп в соответствии с ГОСТ 30804.4.7–2013) была апробирована в СЭС 110/35/6 кВ Роснефть–Юганскнефтегаз (рисунок 5).

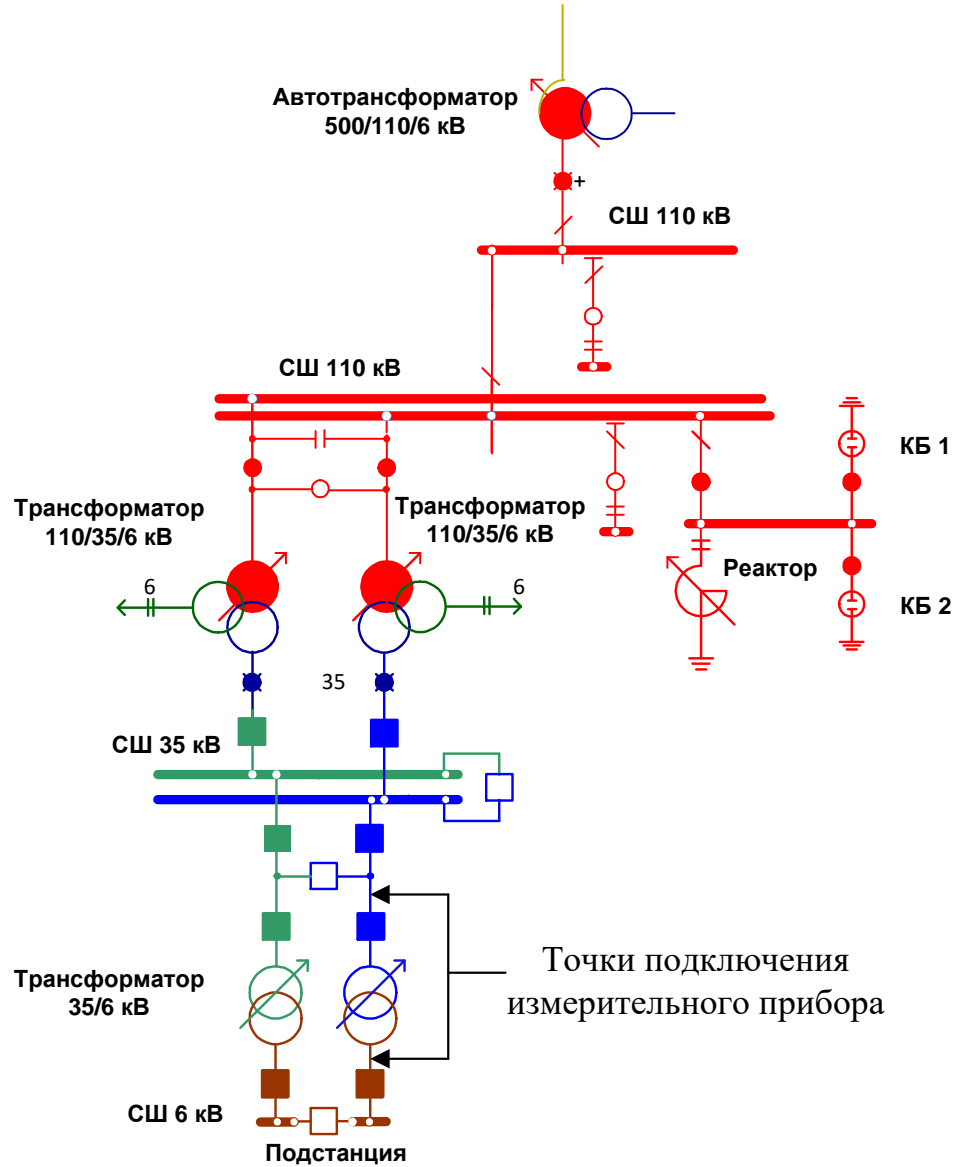
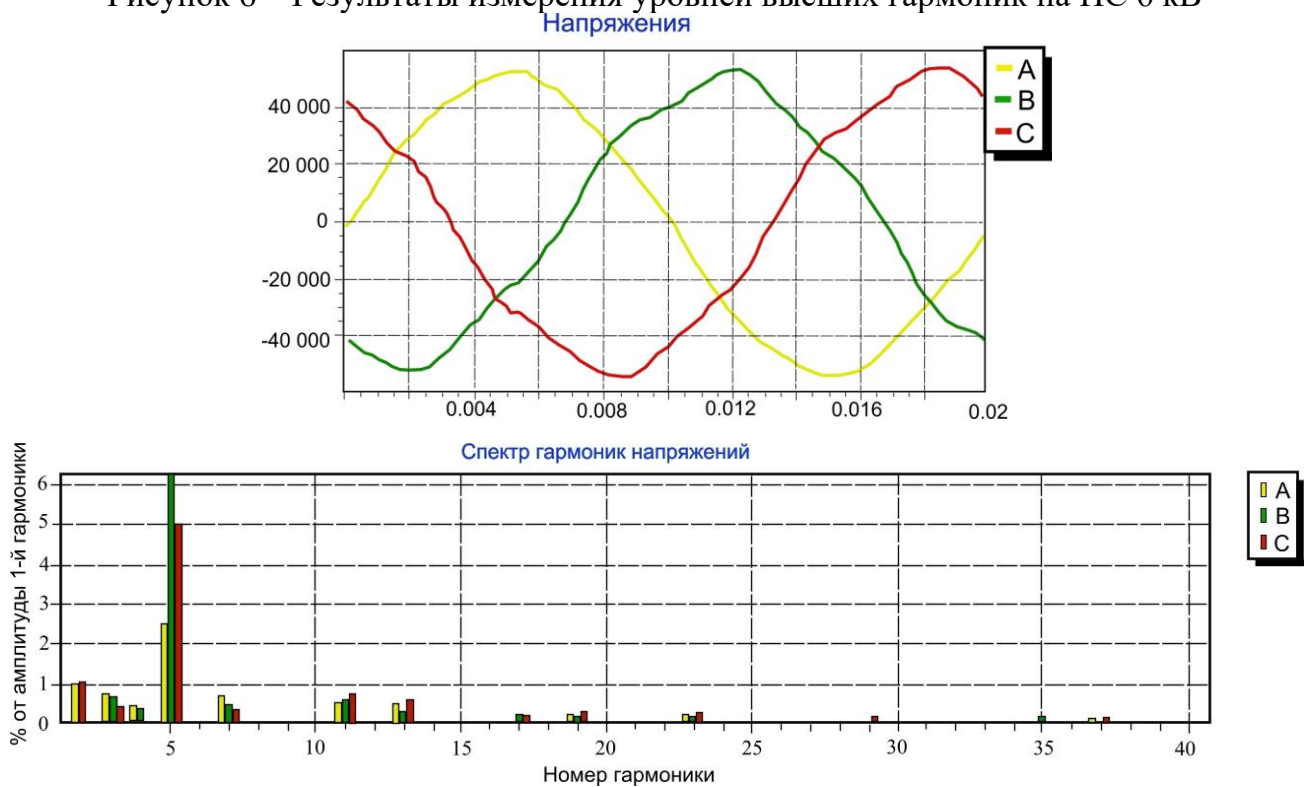
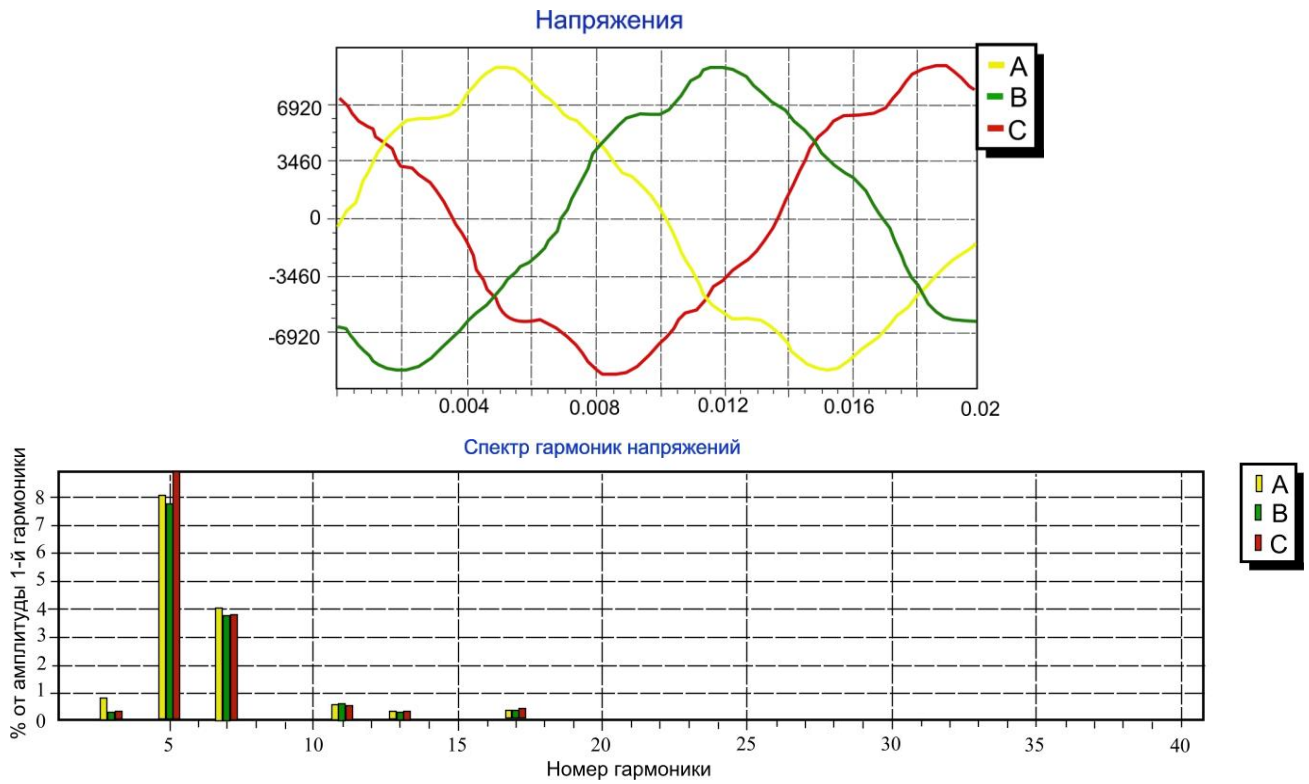


Рисунок 5 – Фрагмент исследуемой системы электроснабжения

Физические измерения производились на сертифицированном оборудовании – с применением прибора METREL MI 2892 (номер в госреестре 57207-14), соответствующем ГОСТ 30804.4.7–2013.

Результаты измерений на СШ 6 и 35 кВ представлены на рисунках 6 и 7 соответственно.



Как следует из полученных результатов, коэффициенты n -ной гармонической составляющей K_{Un} не соответствуют, требованиям ГОСТ 32144–2013 по 5 и 7 гармоникам. Источниками гармоник являются станции управления погружными электродвигателями, установленными на стороне 0,4 кВ. Существенная доля нелинейной нагрузки 0,4 кВ приводит к искажению синусоидальности на шинах 6–35 кВ.

Для проведения численных экспериментов была составлена имитационная модель в среде MATLAB Simulink – рисунок 8.

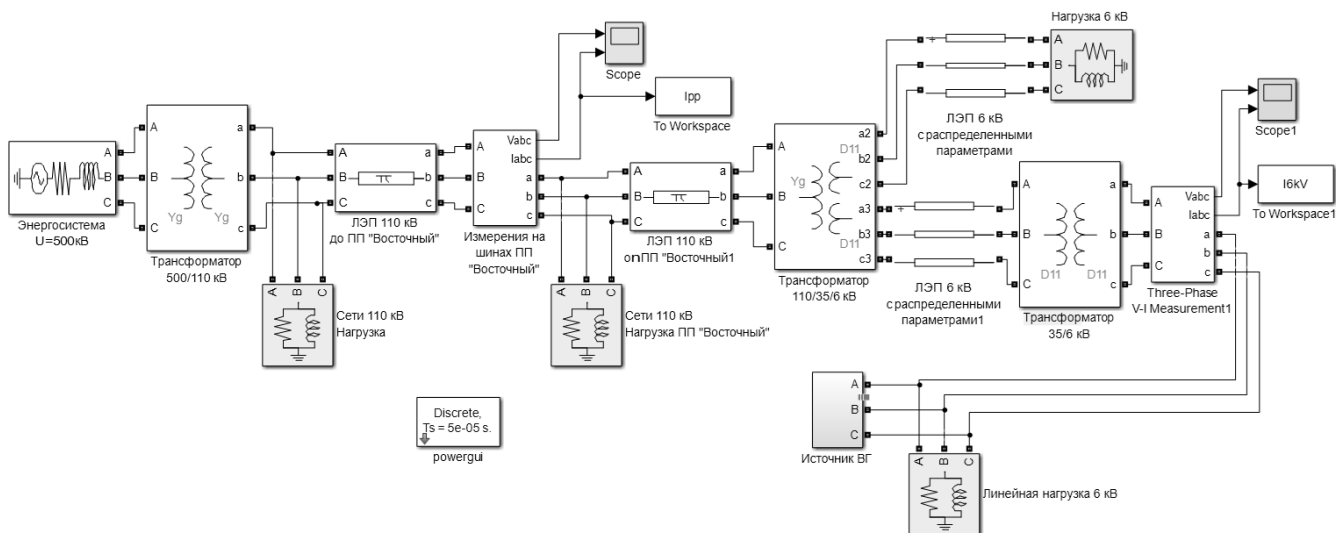


Рисунок 8 – Имитационная модель MATLAB Simulink

Результаты расчетов сведены в таблицу 1, из которой следует, что разработанная методика дает приемлемые по точности результаты.

Таблица 1. Расчет параметров режима по вейвлет коэффициентам

Параметр	Частота, Гц	Обозначение, единица измерения	Фактическое значение	Значение, вычисленное через вейвлет коэффициенты
Активная составляющая тока	50	I_{a1}, A	402,3	402,2
	250	I_{a5}, A	68,4	69,1
	350	I_{a7}, A	42,1	43,1
Активная мощность	50	$P_1, кВт$	4 386	4 380
	250	$P_5, кВт$	746	752
	350	$P_7, кВт$	459	463
Реактивная мощность и мощность искажения	50	$Q_1+N_1, квар$	3 156	3 158
	250	$Q_5+N_5, квар$	560	559
	350	$Q_7+N_7, квар$	362	360

Относительная погрешность определения составляющих мощности по вейвлет коэффициентам не превысила 1%.

Далее в третьей главе диссертации произведена разработка метода идентификации и расчета интергармонических составляющих по вейвлет коэффициентам. Интергамоники – это гармонические колебания с частотами, не кратными частоте питающей сети. В настоящее время в мире отсутствуют единые подходы к вопросам стандартизации интергармоник (ИГ). В ряде стран Европейского Союза, в соответствии с ИЕС 61000-4-7:2 ИГ напряжения не должны превышать 0,2% для всей шкалы номинальных значений напряжения. Стандарт США IEEE Std 519 регламентирует предельные уровни ИГ для каждого класса напряжения. В России процесс нормирования ИГ находится на стадии рассмотрения. ИГ вызывают дополнительный нагрев оборудования и, как следствие, сокращение срока службы его изоляции; являются причиной дополнительных потерь активной электроэнергии; вызывают колебания и искажение синусоидальной формы питающего напряжения. Уровень интергармонических составляющих напряжения электропитания увеличивается в связи с применением в электроустановках частотных преобразователей и другого управляющего оборудования.

Разработанный в настоящей работе алгоритм идентификации ИГ (рисунок 9) и расчета дополнительных потерь от ИГ может быть реализован в следующем порядке.

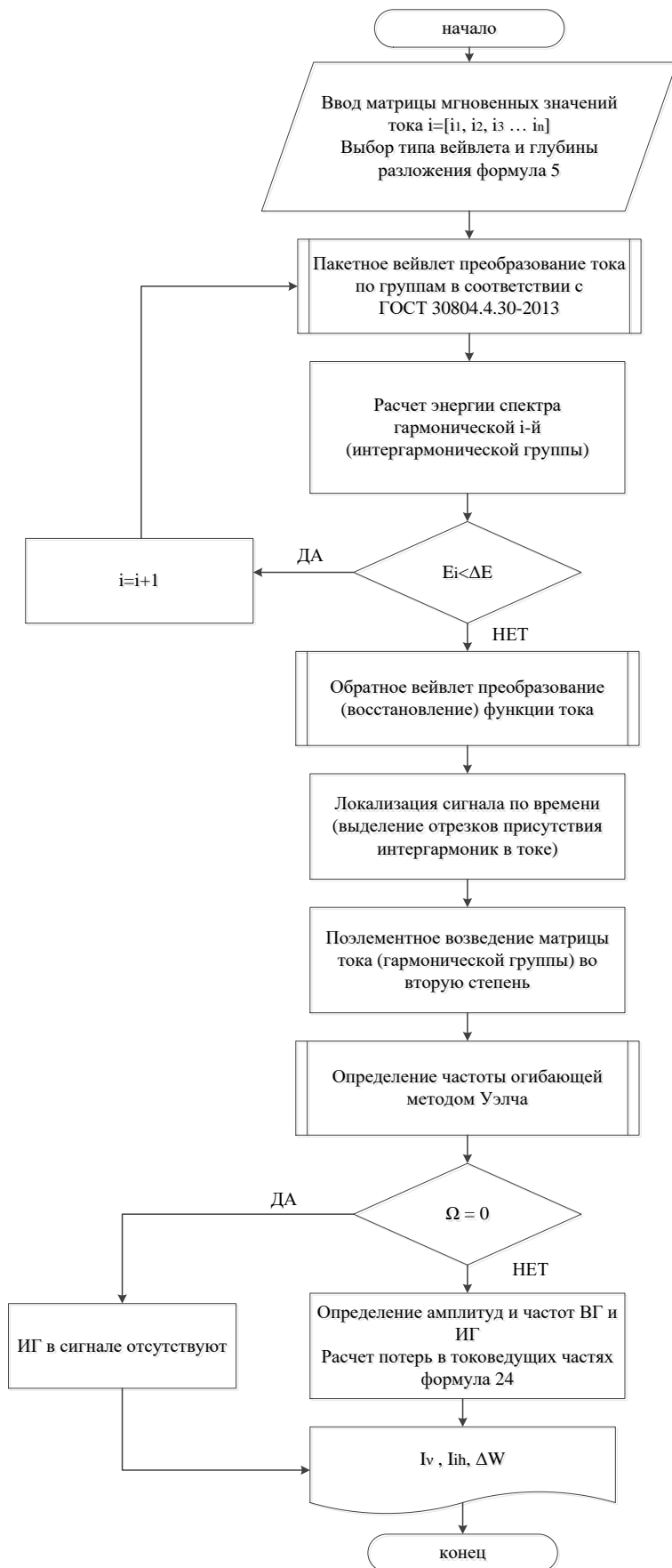


Рисунок 9 – Предлагаемый алгоритм

Шаг 4. Очевидно, что производная тока (напряжения) di/dt непрерывна, тогда как вторая производная будет иметь разрывы в точках t_1 и t_2 . На основании чего наличие изменения сигнала, проявляющееся не в самой функции тока $i(t)$, а в некоторой его высшей производной. Участок времени, на котором случилось столь существенное измене-

Шаг 1. Создается матрица мгновенных значений тока, которую формирует измерительный прибор. При помощи пакетного ВП, производится частотная декомпозиция матрицы тока. Необходимо чтобы каждому комплекту (пакету) вейвлет коэффициентов подходил (совпадал) интервал пропускания частот, центрированный около определённой гармонической группы (в соответствии с ГОСТ 30804.4.7-2013). Исходный сигнал делится на частотные отрезки (участки). На этих участках кроме высшей гармоники с частотой ω_0 , имеются частоты, созданные интергармониками $\omega_0 \pm \Omega$.

Шаг 2. По каждому частотному отрезку определяется энергия спектра вейвлет коэффициентов. Если энергия спектра меньше заданного значения погрешности $\Delta \epsilon$, то коэффициенты можно не учитывать.

Шаг 3. Если энергия спектра выше заданного значения $\Delta \epsilon$, то выполняется обратное ВП. Это позволит восстановить сигнал тока, который отвечает за определенный частотный интервал.

ние сигнала локализован по времени очень четкими всплесками детализирующих коэффициентов d_l (рисунок 10). Таким образом, в предлагаемом алгоритме по детализирующим вейвлет коэффициентам начальных уровней разложения можно достаточно точно определить в какой отрезок времени Δt в сигнале присутствуют интергармоники.

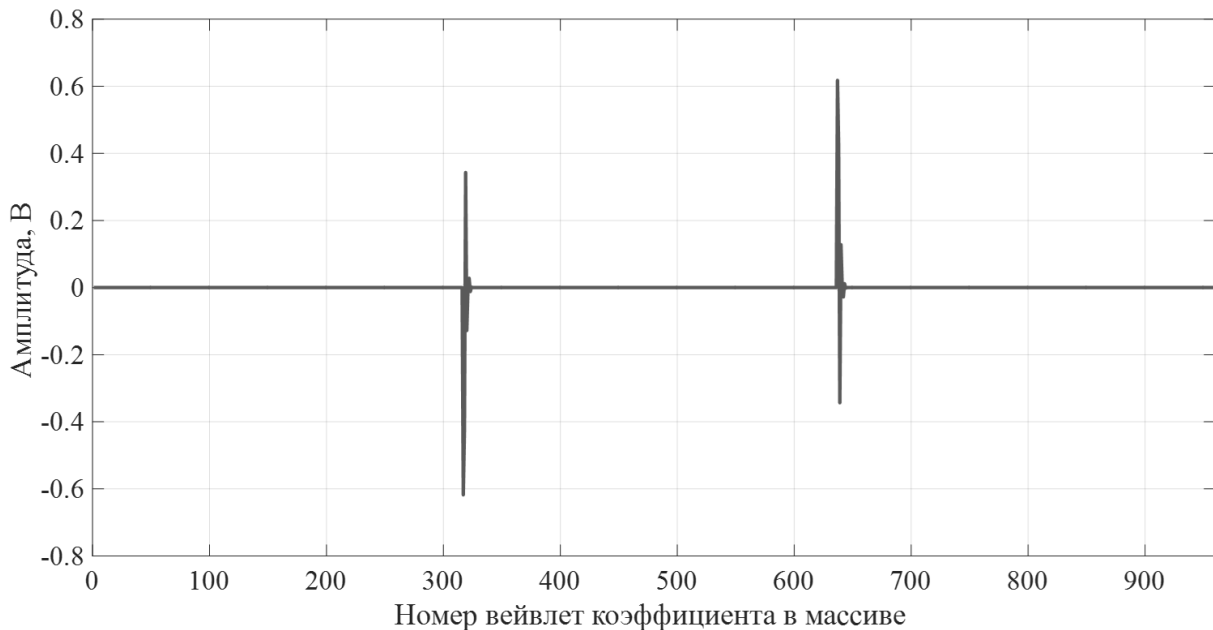


Рисунок 10 – График детализирующего коэффициента d_l

Шаг 5. Каждый элемент матрицы сигнала тока возводится во вторую степень:

$$i_{jk}^2 = [i_1^2, i_2^2, \dots, i_k^2]. \quad (21)$$

Функция тока в общем виде может быть представлена выражением:

$$i(t) = I_m \cdot \sin(\omega t) + I_m \cdot m \cdot \sin((\omega \mp \Omega)t). \quad (22)$$

где I_m - амплитуда основной частоты, $I_m \cdot m$ - амплитуда боковых частот, ω – угловая частота питающей сети, рад/с; Ω – угловая частота огибающей, рад/с.

В итоге получаем:

$$\begin{aligned} i(t) &= I_m^2 \cdot \sin^2(\omega t) + I_m^2 \cdot m^2 \cdot \sin^2((\omega \mp \Omega)t) = \\ &= I_m^2 \cdot \left(\frac{1}{2} + m^2 \right) + 2I_m^2 \cdot m \cdot \cos \Omega \cdot t + I_m^2 \cdot m^2 \cdot \cos 2\Omega t + \\ &+ I_m^2 \cdot \left(m^2 - \frac{1}{2} \right) \cdot \cos 2\omega t - I_m^2 \cdot m \cdot \cos(\omega - \Omega) - I_m^2 \cdot m \cdot \cos(\omega + \Omega) - \\ &- \frac{I_m^2 \cdot m}{2} \cdot \cos 2 \cdot (\omega - \Omega) - \frac{I_m^2 \cdot m}{2} \cdot \cos 2 \cdot (\omega + \Omega). \end{aligned} \quad (23)$$

Как следует из выражения (23) появляется частотная компонента, содержащая частоту огибающей – Ω в чистом виде. Из этого слагаемого в дальнейшем и будет определяться частота интергармоники

Шаг 6. Для определения присутствия боковых частот Ω целесообразно использовать метод Уэлча.

Если боковая частота определяется, производим корректировку частотного участка пропускания фильтра. Находим наиболее приемлемый частотный участок пропускания фильтра из условия $\Delta\omega < \Omega$. В том случае, если боковой частоты нет, переходим к шагу 7.

Шаг 7. Принимая во внимание наиболее приемлемый частотный участок пропускания вейвлет фильтра $\Delta\omega$ можно производить частотную декомпозицию сигнала. Затем определяются действующие значения гармоник и интергармоник и их частоты. Поскольку нет эффекта растекания спектра, то сигнал считаем условно стационарным.

Шаг 8. На последнем этапе производится расчет потерь в токоведущих частях

$$\Delta W_{\Sigma} = \Sigma(I_{\nu}^2 \cdot R \cdot t_i) + \Sigma(I_k^2 \cdot R \cdot t_j), \quad (24)$$

где I_{ν}, I_k - действующие значение тока высшей гармоники и ИГ, R - активное сопротивление жилы кабеля, t_i, t_j - интервалы времени, на которых зафиксирована ν -тая высшая гармоника и k -тая ИГ соответственно.

Представленный алгоритм дает возможность более точного расчета потерь при несинусоидальных режимах работы систем электроснабжения, вызванных высшими гармониками и ИГ в токоведущих частях.

В четвёртой главе произведена модернизация существующих алгоритмов защиты и сигнализации ОЗЗ для цифровых устройств релейной защиты относительного замера высших гармоник.

В соответствии с принятыми нормами в электроэнергетических системах России могут применяться различные режимы работы нейтрали. Электрические сети среднего напряжения (6–35 кВ) работают, как правило, в режиме изолированной или компенсированной нейтрали. Заземление нейтрали через дугогасящий реактор позволяет снизить вероятность возникновения дуговых ОЗЗ и ограничения сопровождающих их перенапряжений. Вейвлет преобразование может быть применено для дополнения существующих методов идентификации ОЗЗ. Одним из видов защит от ОЗЗ в сетях с компенсированной нейтралью являются максимальные токовые защиты, основанные на абсолютном замере высших гармоник.

Предлагаемый алгоритм может быть представлен в два этапа.

Этап 1. Определение частотных характеристик переходного процесса на основе непрерывного вейвлет преобразования. Непрерывное вейвлет преобразование позволяет на раннем этапе выявить наиболее существенные частотные составляющие в плане энергии спектра.

Этап 2. Определение энергии спектра высших гармоник установившегося режима на основе пакетного вейвлет преобразования для выявления отходящей линии, где произошло ОЗЗ.

Достоверность работы алгоритма оценивалась с применением имитационной модели (рисунок 11), с помощью которой была получена осциллограмма тока металлического замыкания на землю (рисунок 12).

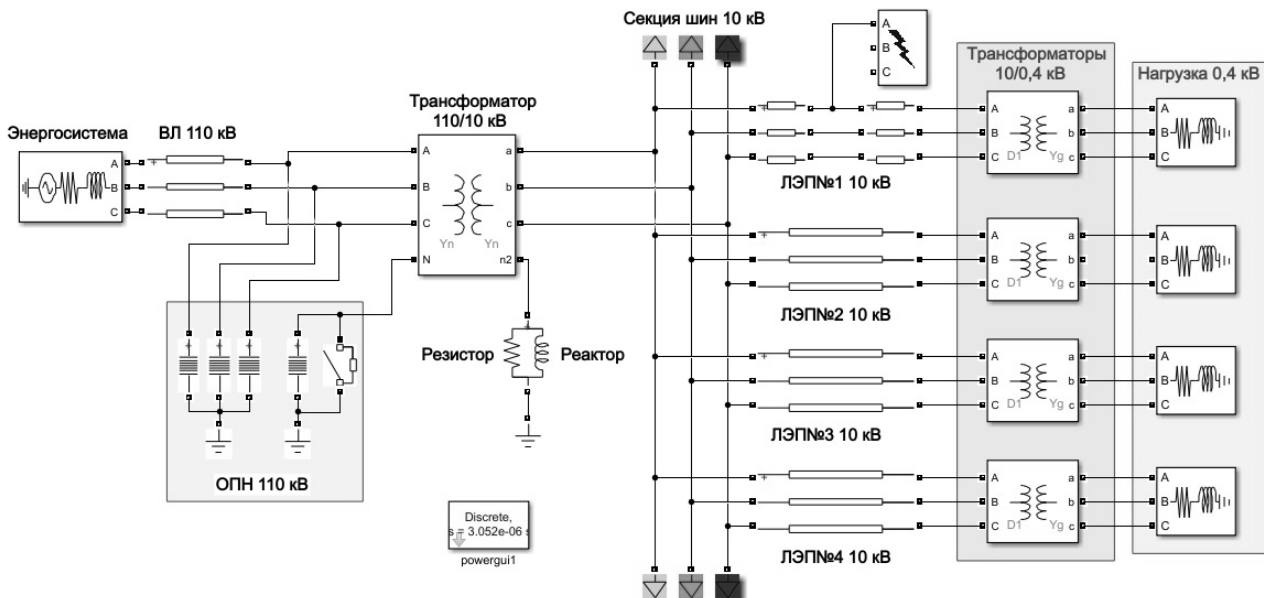


Рисунок 11 – Имитационная модель MATLAB Simulink для исследования ОЗЗ

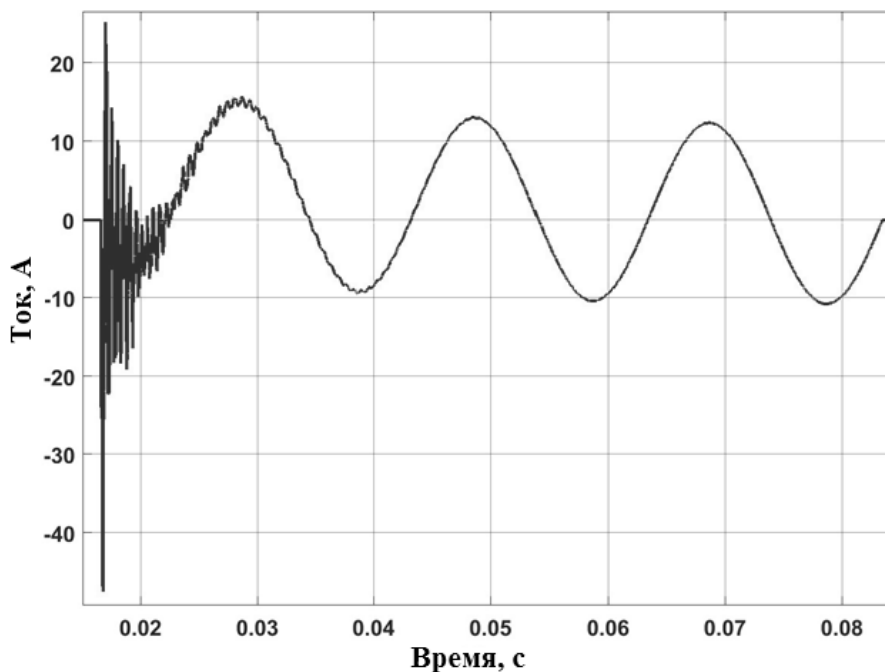


Рисунок 12 – Осциллограмма тока металлического замыкания на землю

В результате вейвлет анализа тока $3i_0$ были идентифицированы две частотные составляющие переходного процесса. Как видно по спектральному составу (рисунок 13) и скалограммы непрерывного ВП на основе вейвлета Морсе (Morse) (рисунок 14) в момент ОЗЗ в токе нулевой последовательности возникают две дополнительные частоты 2 кГц и 4,2 кГц. Полученные в результате вейвлет анализа частоты соответствуют частотным диапазонам (зарядных и разрядных составляющих), полученным аналитически в работах В.А. Шуина (и др. сотрудников ИГЭУ). В диссертации предлагается решать задачу цифровой фильтрации высших гармоник более 1,5 кГц помощью ВП на программном уровне. Отказ от аппаратной фильтрации, совместно с использованием цифровых оптических трансформаторов тока является вкладом в развитие технологии «цифровая подстанция» и национальной инициативы «Энерджинет».

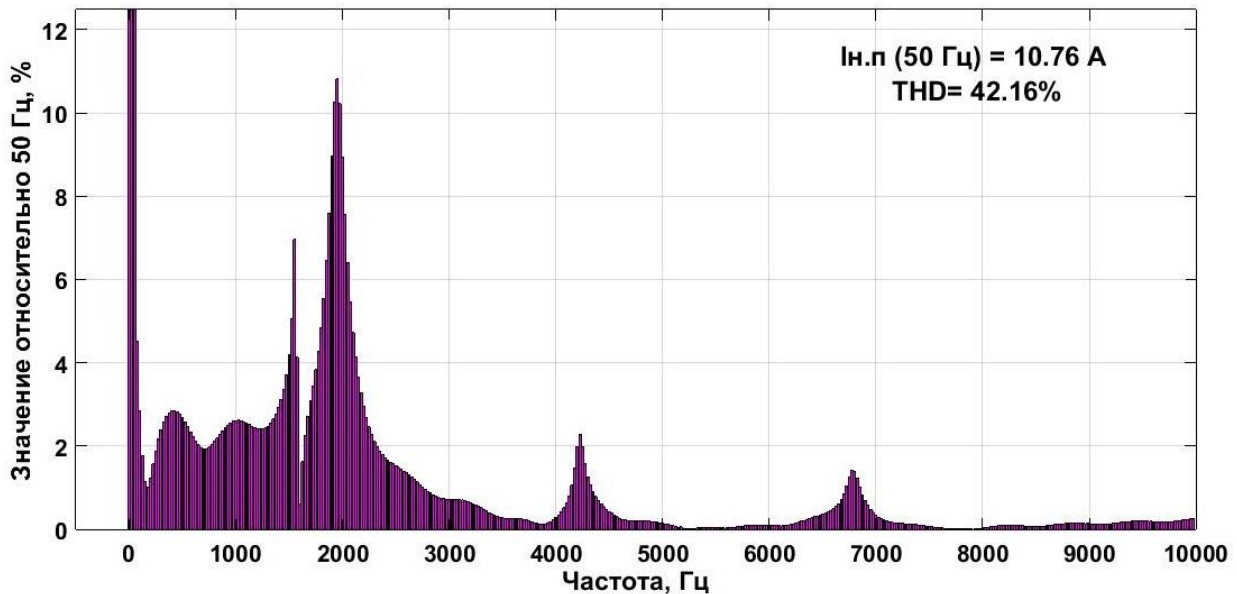


Рисунок 13 – Быстрое преобразование Фурье осциллограммы на рисунке 12

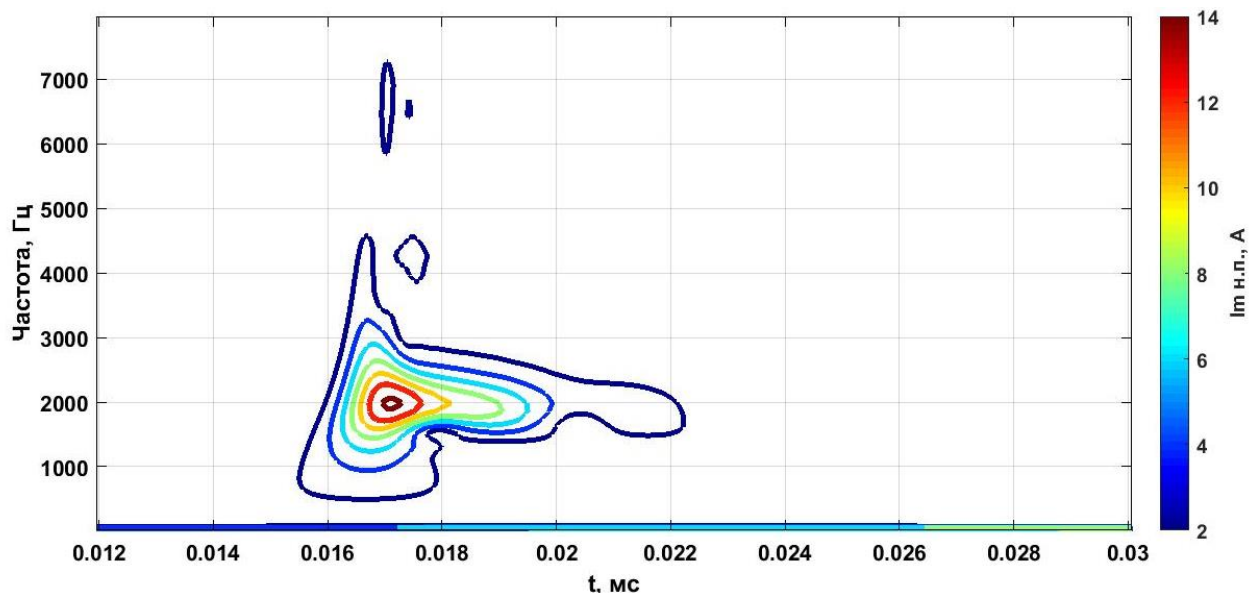


Рисунок 14 – Непрерывное вейвлет преобразование осциллограммы, представленной на рисунке 12

Для вейвлет преобразования действителен аналог равенства Парсеваля, из которого следует, что полная энергия исследуемой функции напряжения u (тока i , мгновенной мощности p) может быть определена через амплитуды вейвлет коэффициентов:

$$E_u = \int u^2(t) dt = C_\psi^{-1} \iint V^2(a, b) \frac{dadb}{a^2}. \quad (25)$$

Плотность энергии $E_V(a, b) = V^2(a, b)$ исследуемого сигнала может быть представлена отдельно по энергетическим уровням. Для случая ДВП с выбранными частотными коридорами гармонических групп в соответствии с ГОСТ 30804.4.7-2013, энергетические уровни будут соответствовать искомой частоте гармоники или интергармоники в пространстве масштаб-время. Для аппарата ВП существует возможность определять энергию спектра в пределах локализованного периода времени. Некоторые авторы вводят термин «локальный энергетический спектр». Другими словами, ВП позволяет определять плотность энергии сигнала в локальной окрестности точки времени t_0 :

$$E_{\xi}(a, t_0) = \int E_V(a, b) \xi\left(\frac{b-t_0}{a}\right) db, \quad (26)$$

где ξ – оконная функция.

С учетом формул (25-26) имеем возможность определить энергию спектра отдельных гармоник (интергармоник), либо исследуемого частотного диапазона.

Расчет энергии спектра вейвлет коэффициентов позволит определить линию, в которой произошло ОЗЗ. Максимальная энергия спектра высших гармоник является признаком линии, где произошло однофазное замыкание на землю. Предложенный алгоритм позволяет работать в режиме непрерывного мониторинга уровней энергии спектра высших гармоник.

Далее в диссертации был разработан алгоритм управления дугогасящим реактором для автоматической компенсации ёмкостных токов. Алгоритм представлен на рисунке 15. Личный вклад автора заключается в оригинальной идее выделить свободную составляющую напряжения контура нулевой последовательности с помощью вейвлет анализа (блоки 4-7). Дополнительно алгоритм предусматривает очистку напряжения от зашумления (высших гармоник) также на основе вейвлет преобразования.

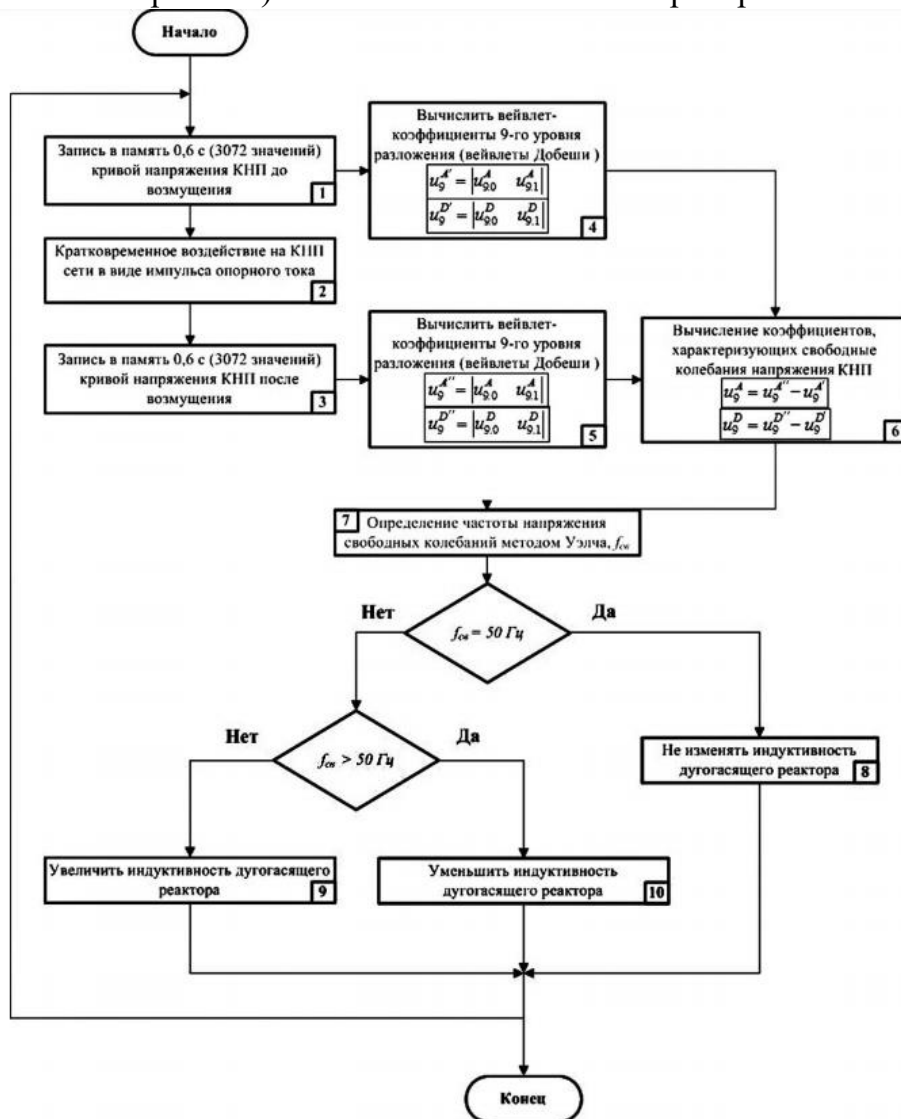


Рисунок 15 – Алгоритм управления дугогасящим реактором

Новые элементы алгоритма управления реактором, предложенные в настоящей диссертации можно представить в следующем порядке:

Шаг 1. Производится вейвлет преобразование напряжения нулевой последовательности по схеме, представленной на рисунке 16.

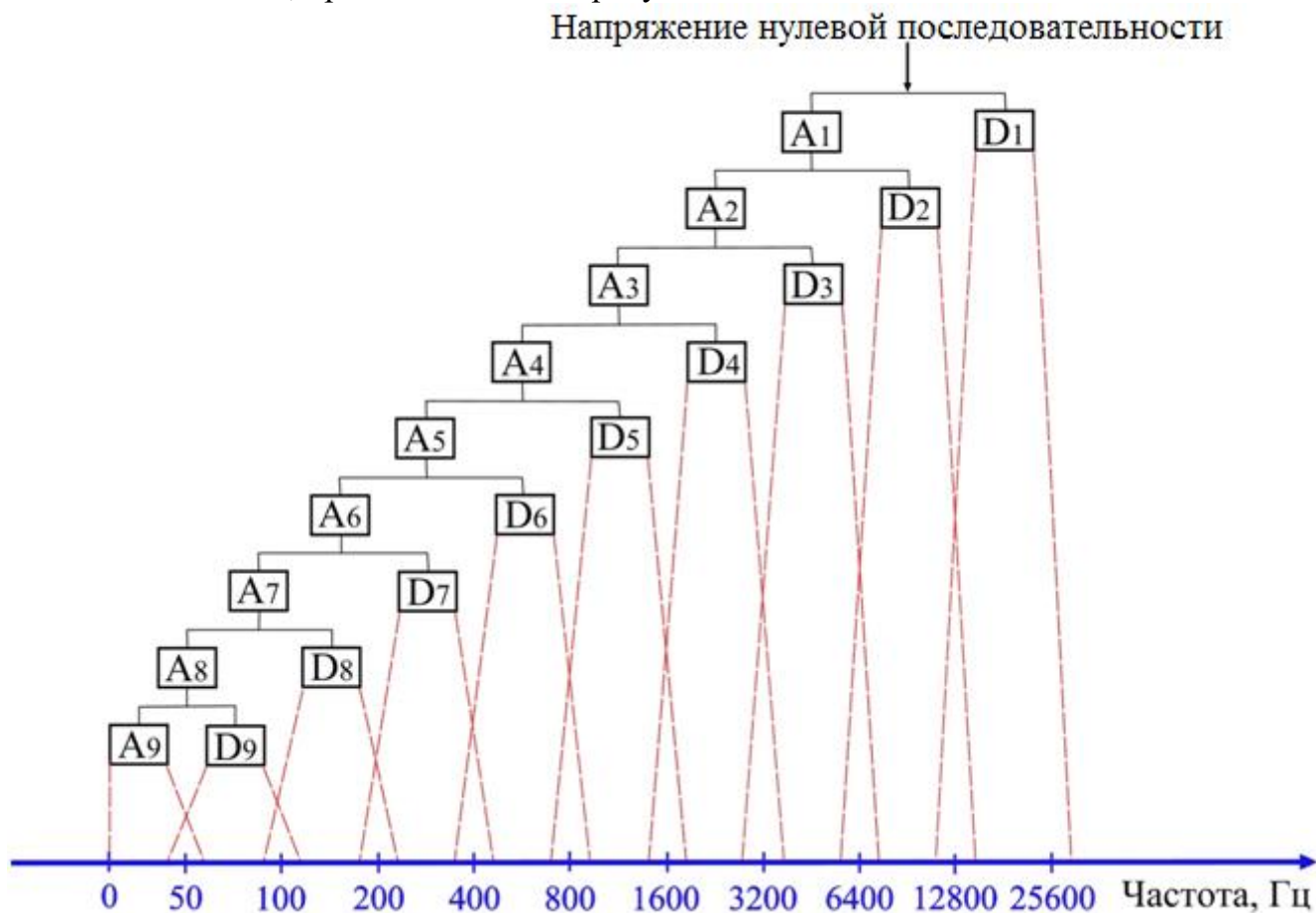


Рисунок 16 – Схема разложения напряжения нулевой последовательности

В соответствии с представленной схемой локализация частот вейвлет коэффициентами будет представлена коридорами, показанными в таблице 2

Таблица 2. Частотные диапазоны, определяемые вейвлет коэффициентами

Вейвлет коэффициенты		a9	d9	d8	d7	d6	d5	d4	d3	d2	d1
Частотный диапазон (Гц)	Верхний предел	50	100	200	400	800	1600	3200	6400	12800	25600
	Нижний предел	0	50	100	200	400	800	1600	3200	6400	12800
Размерность матрицы вейвлет коэффициентов		1x2	1x2	1x4	1x8	1x16	1x32	1x64	1x128	1x256	1x512

Аппроксимирующие u_9^A и детализирующие u_9^D коэффициенты 9-го уровня (как отмечено в таблице 2) представляют собой вектор строки, состоящие из 2 элементов каждая:

$$u_9^A = \left| u_{9,0}^A \quad u_{9,1}^A \right|. \quad (27)$$

$$u_9^D = \left| u_{9,0}^D \quad u_{9,1}^D \right|. \quad (28)$$

Шаг 2. Вычисление коэффициентов 9-го уровня разложения из фрагмента напряжения до управляющего воздействия. Обозначим полученные коэффициенты с индексом «'» (штрих): $u_9^{A'} = \left| u_{9,0}^A \quad u_{9,1}^A \right|$, $u_9^{D'} = \left| u_{9,0}^D \quad u_{9,1}^D \right|$.

Шаг 3. Подача токового импульса в контур нулевой последовательности. Вычисление коэффициентов 9-го уровня разложения из фрагмента напряжения после управ-

ляющего воздействия. Обозначим полученные коэффициенты с индексом " (два штриха):

$$u_9^A'' = \begin{vmatrix} u_{9,0}^A & u_{9,1}^A \\ u_{9,0}^D & u_{9,1}^D \end{vmatrix}$$

$$u_9^D'' = \begin{vmatrix} u_{9,0}^D & u_{9,1}^D \\ u_{9,0}^A & u_{9,1}^A \end{vmatrix}$$

Шаг 4. Определяется алгебраическая разность вейвлет коэффициентов до и после инъекции тока

$$u_9^A = u_9^A'' - u_9^A' \quad (29)$$

$$u_9^D = u_9^D'' - u_9^D' \quad (30)$$

Искомая функция напряжения свободной составляющей контура нулевой последовательности в этом случае может быть записана через вейвлет коэффициенты:

$$u_{ce}(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} u_{j,k}^A \phi_{j,k}(t) + \sum_{j=J}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} u_{j,k}^D \psi_{j,k}(t), \quad (31)$$

или с учётом, что в алгоритме используем только коэффициенты $u_9^A(k)$ и $u_9^D(k)$, с учетом (27-28) формула (31) может быть переписана в виде:

$$u_{ce}(t) = \sum u_{9,0}^A \varphi_{9,0} + \sum u_{9,1}^A \varphi_{9,1} + \sum u_{9,0}^D \varphi_{9,0} + \sum u_{9,1}^D \varphi_{9,1}. \quad (32)$$

Шаг 5. Определение частоты напряжения свободных колебаний методом Уэлча.

По формуле (32) получаем напряжение свободных колебаний контура нулевой последовательности. Для сравнения эффективности работы алгоритма на рисунке 17 приведено сравнение вычисленного сигнала напряжения свободных колебаний с истинным значением, заданном в рамках тестового расчета.

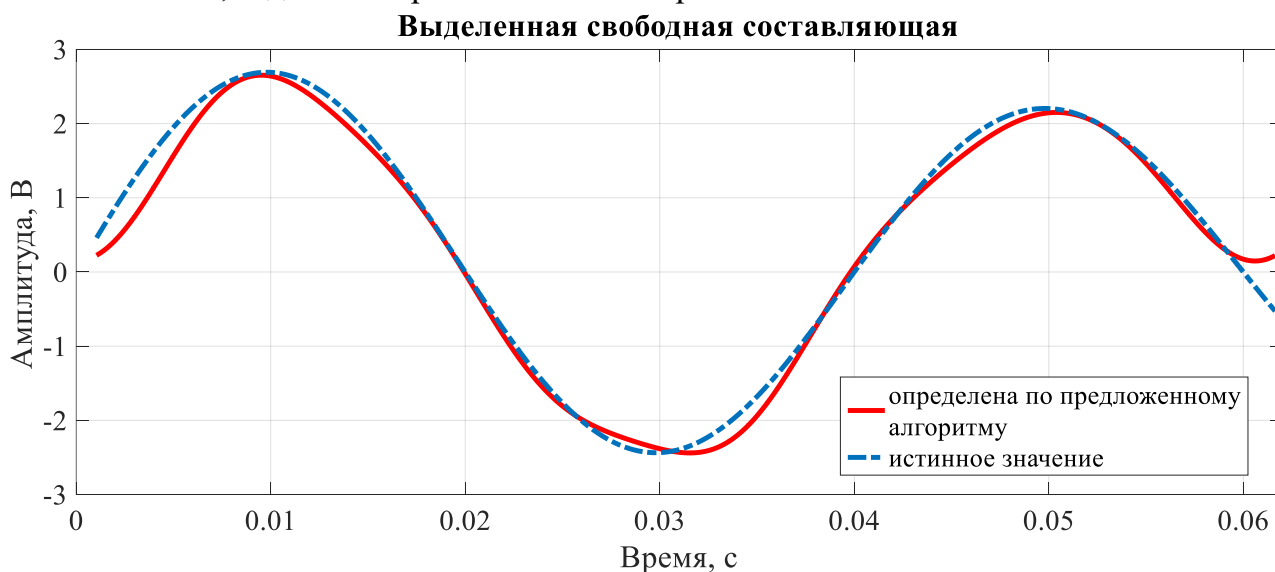


Рисунок 17 – Напряжение свободных колебаний контура нулевой последовательности

Напряжение контура нулевой последовательности при общем подходе является случайной величиной. Поэтому в чистом виде преобразование Фурье для определения частоты сигнала не применимо. Необходимо использовать методы спектрального оценивания, разработанные для случайных величин.

В данной работе для определения частоты напряжения свободных колебаний предлагается использовать метод Уэлча (рисунок 18).



Рисунок 18 – Определение частоты напряжения свободных колебаний по методу Уэлча

Метод Уэлча, являясь модифицированным методом Барлетта, дает оценку энергетического спектра.

Таким образом, можно отметить, что произведена модернизация существующего способа (НПП «Бреслер») автоматического управления дугогасящим реактором для компенсации ёмкостных токов ОЗЗ. Отличие от известных методов заключается в том, что вычисление частоты напряжения нулевой последовательности производится по двум вейвлет коэффициентам с размерностью матрицы 2x1 каждая. В оригинальной методике необходимо было сравнивать значительно большее количество дискретных цифровых значений.

В пятой главе разработана методика расчета дополнительных потерь мощности в токоведущих частях с учетом фактического нагрева при несинусоидальных нестационарных режимах электроприёмников.

Известно, что нагрузочные потери в элементах сети при несинусоидальных режимах в общем виде определяются по формуле:

$$\Delta P_{\Sigma \text{ фазн}} = I_1^2 R_1 + \sum_{v=2}^n I_v^2 R_v k_v, \quad (33)$$

где k_v – коэффициент, учитывающий поверхностный эффект.

В то же время, сопротивление имеет следующую зависимость от температуры:

$$R = R_0 \left[1 + \alpha (t_{\text{окр}} + \Theta_{\text{жс}}) \right]. \quad (34)$$

В настоящее время в эксплуатацию вводятся кабели и провода, изоляция которых допускает значительно более высокий нагрев, чем старые типы изоляции. Максимально допустимая температура послеаварийного режима для таких кабелей и проводов может превышать $+200^\circ\text{C}$. Считая минимальную температуру равной -50°C , а температурный коэффициент сопротивления $0,00435 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ по формуле (34) получим: при -30°C $R=0,87 \cdot R_0$; при $+200^\circ\text{C}$ $R=1,87 \cdot R_0$. Таким образом, максимальный диапазон изменения активного сопротивления в рабочем диапазоне температур составляет примерно 100% от сопротивления при нуле градусов, что весьма значительно.

Значительная доля электроприёмников, искажающих синусоидальность формы кривой напряжения и тока имеют резкопеременный график нагрузок (сварочные аппараты, импульсные блоки питания и др.). Как известно, постоянная нагрева, в общем слу-

чае, определяется материалом проводника и сечением жилы, однако для средних сечений величина постоянной нагрева может быть принята примерно равной 10 минутам. Данная величина хорошо соотносится с интервалами усреднения ПКЭ, установленными действующим ГОСТ – также 10 минут.

Вследствие того, что фактическая температура токоведущей части определяется всем спектром гармоник тока, а при большом количестве присоединений может меняться не только амплитуда, но и частотный состав спектра высших гармоник, то для расчета нестационарных несинусоидальных режимов с учетом температуры метод наложения в чистом виде неприменим.

При математическом моделировании процессов нагрева и охлаждения кабелей нельзя пренебрегать теплопроводностью изоляции. В общем случае, процесс нагрева может быть представлен двумя стадиями: проходной и регулярной. Проходной стадии свойственны разные скорости изменения температур в различных точках кабеля. Проходная стадия длится несколько десятков секунд, на основании чего, ею можно пренебречь. На регулярной стадии уравнение теплового баланса при нестационарном режиме, записанное через вейвлет коэффициенты имеет вид:

$$\frac{3(1 + \alpha\theta_{пр.кл})}{N} \left(\sum_{k \in Z} (i_{J_0,k}^A)^2 + \sum_{k \in Z} \sum_{j=J_0}^{J-1} (i_{j,k}^D)^2 \right) = C_{кл} \frac{d\theta_{кл}}{dt} + \frac{\theta_{пр.кл}^{1,25}}{A_k}, \quad (35)$$

где $C_{кл}$ – эквивалентная теплоемкость кабеля; $\theta_{кл}$ – температура поверхности кабеля; $\theta_{пр.кл}$ – превышение температуры жилы кабеля над температурой окружающей среды (перегрев жилы); A_k – коэффициент теплоотдачи.

Уравнения теплового баланса для масляного трансформатора будут иметь вид:

$$\begin{cases} P_{xx} + \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R_T + \frac{3R_{тв.0} \cdot (1 + \alpha\theta_{пр.м})}{N} \left(\sum_{k \in Z} (i_{J_0,k}^A)^2 + \sum_{k \in Z} \sum_{j=J_0}^{J-1} (i_{j,k}^D)^2 \right) = C_m \frac{d\theta_m}{dt} + A_m \theta_{пр.м}^{1,25}; \\ \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R_T + \frac{3R_{тв.0} \cdot (1 + \alpha\theta_{пр.об})}{N} \left(\sum_{k \in Z} (i_{J_0,k}^A)^2 + \sum_{k \in Z} \sum_{j=J_0}^{J-1} (i_{j,k}^D)^2 \right) = C_{об} \frac{d\theta_{об}}{dt} + A_{об} \theta_{пр.об}^{1,25}, \end{cases} \quad (36)$$

Для расчета дополнительных потерь мощности и энергии в кабельных линиях и трансформаторах с масляным охлаждением в настоящей диссертационной работе разработан алгоритм, который можно охарактеризовать следующей последовательностью действий (рисунок 19).

Шаг 1. Производится выбор оптимального типа вейвлета (формула 5) и глубины разложения сигнала тока. Наиболее оптимальным деревом разложения считается такой вариант, когда локализация частоты вейвлет коэффициентами соответствует ширине гармонических групп. Необходимо отметить, что уровни гармоник тока согласно ГОСТ не нормируются. Тем не менее, ширину гармонических групп тока следует согласовывать с указаниями, сделанными по напряжению.

Шаг 2. Производится пакетное вейвлет преобразование тока. Вейвлет коэффициенты, локализирующие частоту основной гармоники, поступают напрямую в расчет потерь. Вейвлет коэффициенты, характеризующие высшие гармоники и интергармоники проверяются на величину порогового уровня по локальной энергии спектра. Если энергия спектра вейвлет коэффициентов менее порогового значения, то это означает либо отсутствие гармоники с данной частотой, либо малую амплитуду. В любом случае, на точность расчета потерь и на дополнительный нагрев токоведущей части указанный узел вейвлет коэффициентов не окажет существенного влияния.

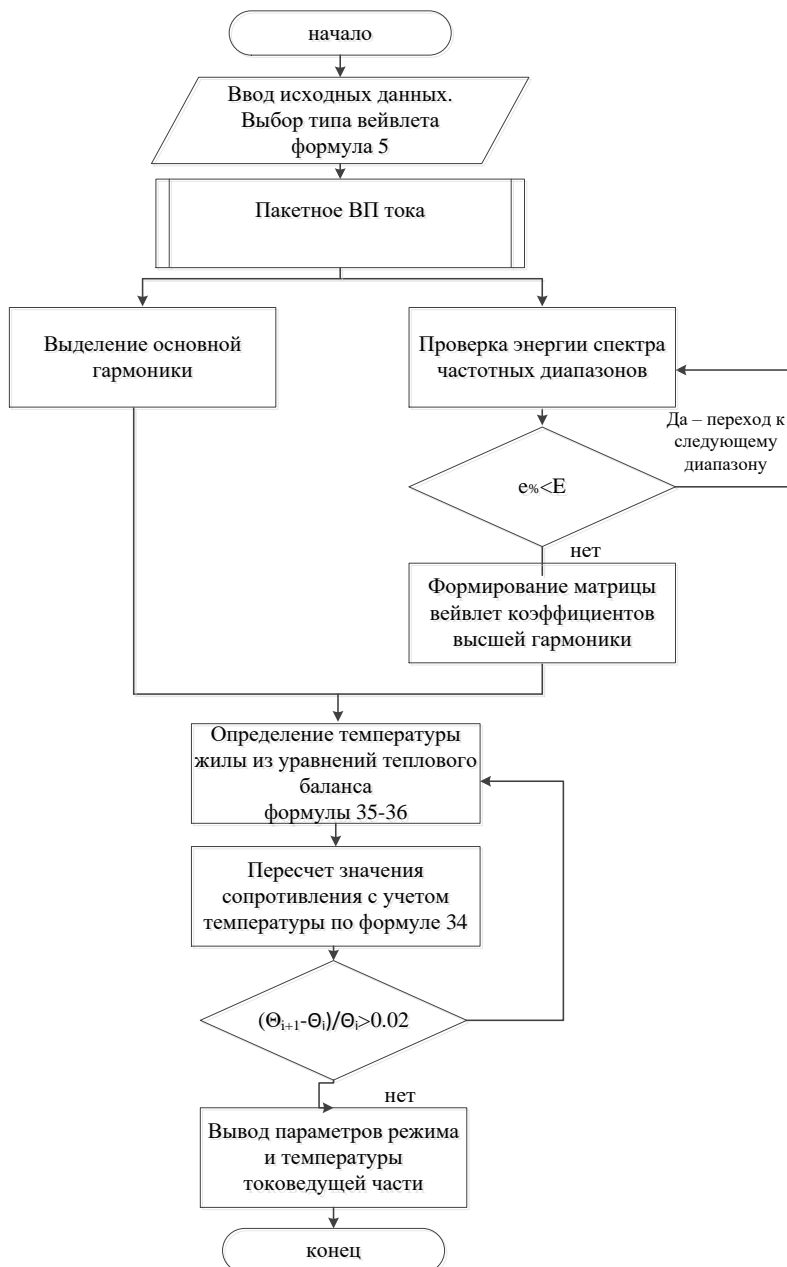


Рисунок 19 – Алгоритм расчета дополнительных потерь от ВГ при учете фактического нагрева токоведущих частей

Шаг 4. Уточнение значения сопротивления токоведущей части по расчетной температуре из предыдущего этапа. При отсутствии начальных данных о температуре токоведущих частей, на первом этапе принимается значение 0°C . Итерационный алгоритм обеспечит поэтапное достижение температуры – установившегося значения.

При увеличении суммарного коэффициента гармонического искажения тока (в ГОСТ не нормируется) происходит увеличение дополнительных потерь мощности в токоведущих частях. На рисунке 20 построены зависимости относительных значений потерь мощности при учете высших гармоник и фактического нагрева и без такого учета. Фактические потери при значениях коэффициента суммарных гармонических искажений более 70% возрастают на 20%. Преимущество вейвлет преобразования заключается в получении информации о времени присутствия гармоник, при значительно меньшем объеме цифровых данных по сравнению с оконным преобразованием Фурье. Применение разработанной в настоящей диссертационной работе методики позволяет зафиксировать

А в рамках решения задач по сжатию передаваемого потока цифровых данных, этот набор вейвлет коэффициентов следует удалить.

Вейвлет коэффициенты, характеризующие высшие гармоники и имеющие локальную энергию спектра выше порогового значения поступают в следующий блок, вслед за коэффициентами основной гармоники.

Шаг 3. Определяется температура жилы из уравнений теплового баланса (формулы 35–36). Если нагрузка задана токами высших гармоник, а шины питающего напряжения являются источником ограниченной мощности, то расчет должен вестись итерационно, с учетом изменения напряжения на шинах и у нагрузки, вследствие просадки напряжения. Более полную картину можно получить, дополнительно используя статические характеристики нагрузки.

ровать длительность присутствия гармоник в токе и оценить их вклад в уровень дополнительных потерь и дополнительного нагрева токоведущих частей.

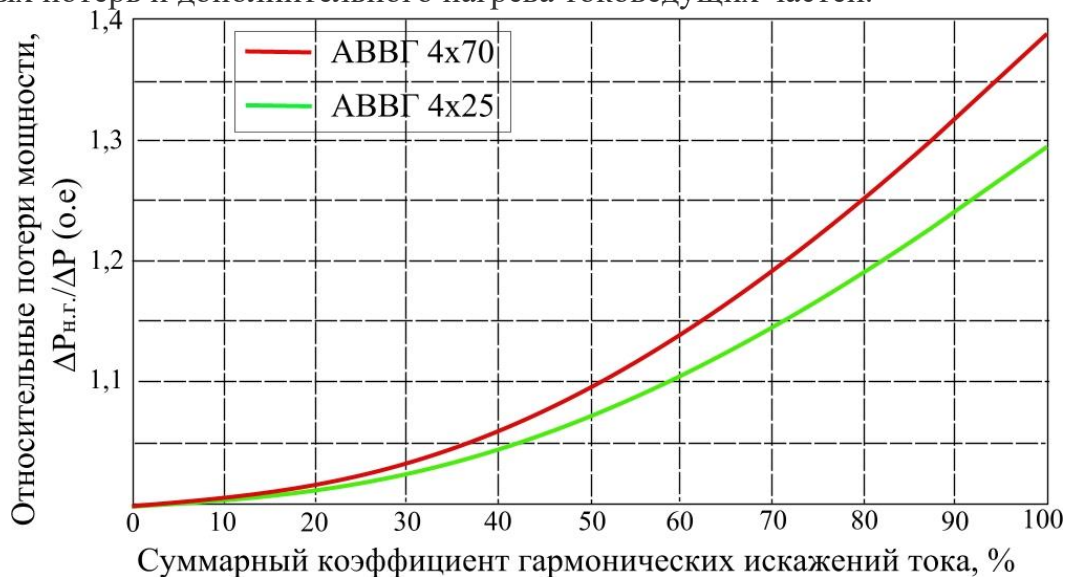


Рисунок 20 – Зависимость дополнительных потерь с учетом ВГ и температуры жилы

Разработанный алгоритм позволяет на стадии проектирования учесть при выборе сечения кабеля возможное увеличение токовой нагрузки, дополнительных потерь мощности и энергии, а также произвести предварительную оценку рабочей температуры жилы кабельной линии.

В шестой главе производится разработка методики анализа устойчивости узлов нагрузки с учётом несинусоидальности питающего напряжения.

При анализе устойчивости узлов СЭС с асинхронной нагрузкой с учетом электромагнитных переходных процессов влияние ВГ при самозапуске приведет к дополнительным колебаниям ротора АД, что отражено на рисунке 21.

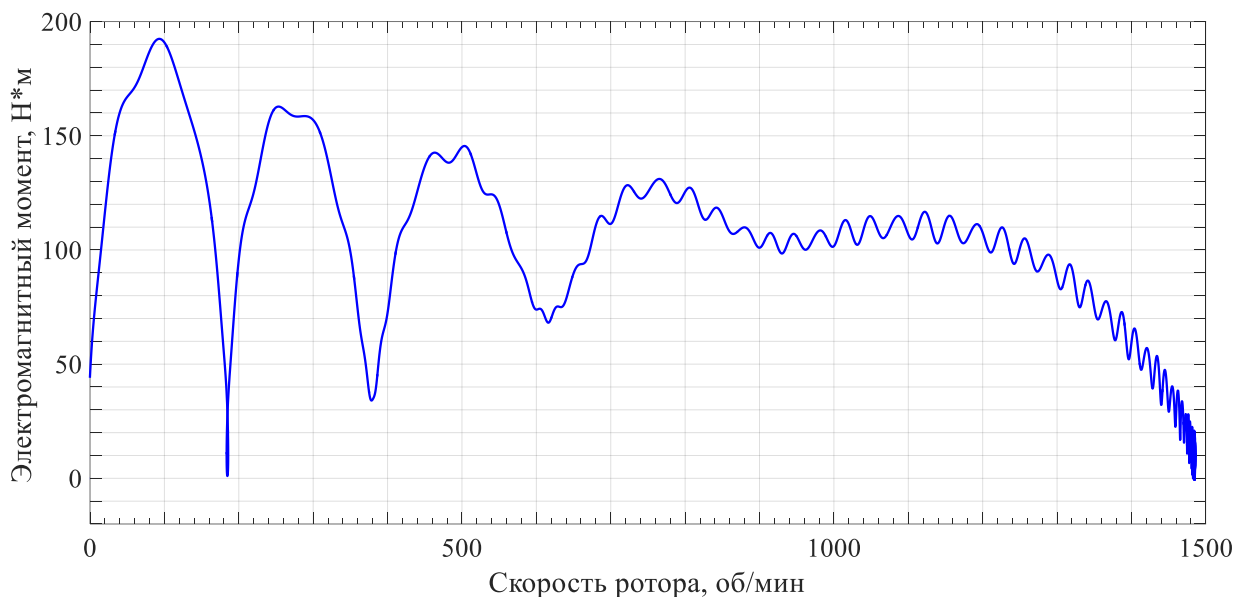


Рисунок 21 – Динамическая механическая характеристика АД с учетом ВГ

Следует отметить, что, несмотря на это, АД перейдет в номинальную точку рабочего диапазона. Однако в установившемся режиме работы момент, развиваемый АД при учете ВГ, будет носить пульсирующий характер (рисунок 22).

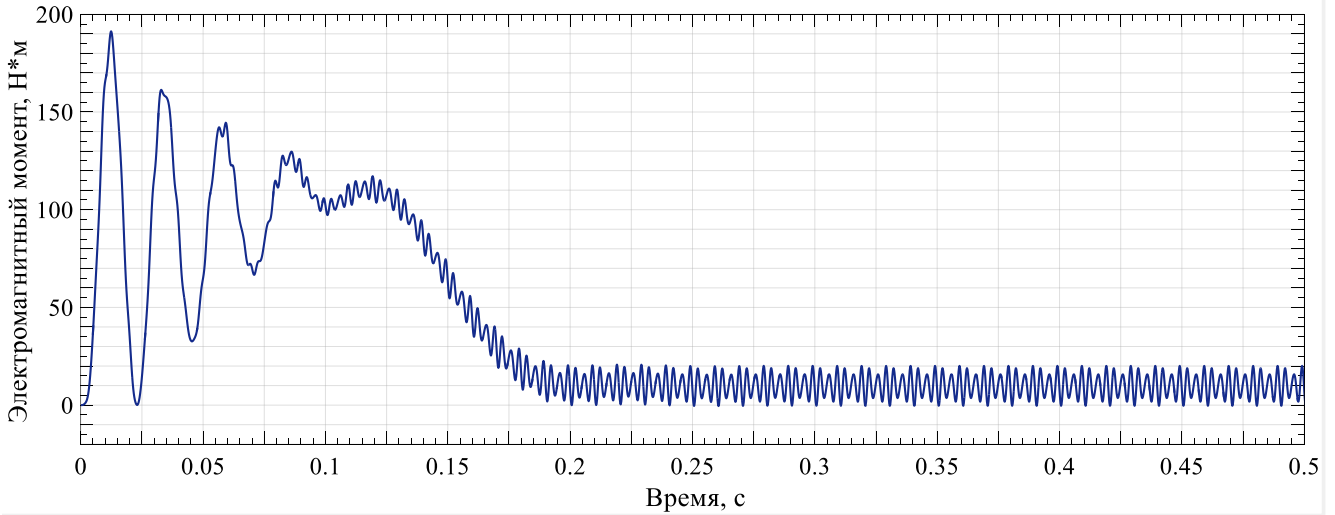


Рисунок 22 – Переходный процесс электромагнитного момента при пуске АД с учетом ВГ

Электрическая машина при задании напряжения через вейвлет коэффициенты может быть задана в системе координат $\alpha, \beta, 0$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\Psi_{1\alpha}}{dt} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} u_{j,k}^A \varphi_{j,k}(t) + \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} u_{j,k}^D \psi_{j,k}(t) - r_2 \frac{x_{\mu} \Psi_{2\alpha} - x_1 \Psi_{1\alpha}}{x_{\mu}^2 - x_1 x_2} \\ \frac{d\Psi_{1\beta}}{dt} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} u_{j,k}^A \varphi_{j,k}(t) + \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} u_{j,k}^D \psi_{j,k}(t) - r_2 \frac{x_{\mu} \Psi_{2\beta} - x_1 \Psi_{1\beta}}{x_{\mu}^2 - x_1 x_2} \\ \frac{d\Psi_{2\alpha}}{dt} = \Psi_{2\beta} \omega - r_1 \frac{x_{\mu} \Psi_{1\alpha} - x_1 \Psi_{2\alpha}}{x_{\mu}^2 - x_1 x_2} \\ \frac{d\Psi_{2\beta}}{dt} = \Psi_{2\alpha} \omega - r_1 \frac{x_{\mu} \Psi_{1\beta} - x_1 \Psi_{2\beta}}{x_{\mu}^2 - x_1 x_2} \\ \omega = \frac{x_{\mu} (x_{\mu}^2 \Psi_{1\beta} \Psi_{2\alpha} + x_1 x_2 \Psi_{2\beta} \Psi_{1\alpha} - x_{\mu}^2 \Psi_{2\beta} \Psi_{1\alpha} - x_1 x_2 \Psi_{1\beta} \Psi_{2\alpha})}{J (x_{\mu}^2 - x_1 x_2)} - \frac{m_c}{J} \end{array} \right. , \quad (37)$$

где $\Psi_{1\alpha}$ и $\Psi_{1\beta}$ – проекция потокосцепления обмотки статора АД на оси α и β ; $\Psi_{2\alpha}$ и $\Psi_{2\beta}$ – проекция потокосцепления обмотки ротора АД на оси α и β ; $U_{ном}$ – напряжение на основной частоте; U_v – напряжение на частотах ВГ; r_1 – активное сопротивление фазы обмотки статора АД; x_1 – полное индуктивное сопротивление фазы обмотки статора АД; r_2 – активное сопротивление фазы обмотки ротора АД; x_2 – полное индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора АД; x_{μ} – индуктивное сопротивление ветви намагничивания АД; J – инерционная постоянная вращающихся масс; m_c – момент органа рабочего механизма.

На характер изменения скорости при самозапуске оказывают влияние массогабаритные параметры АД

$$T_j \frac{ds}{dt} = m'_{\partial\sigma}(s) - m_c, \quad (38)$$

где T_j – электромеханическая постоянная времени; $m'_{\partial\sigma}$ – момент, развиваемый АД с учетом ВГ.

При самозапуске более легкого АД для выхода на номинальную скорость вращения потребуется меньше времени (рисунок 23) по сравнению с более тяжелым АД, при этом характер изменения скорости будет носить колебательный характер.

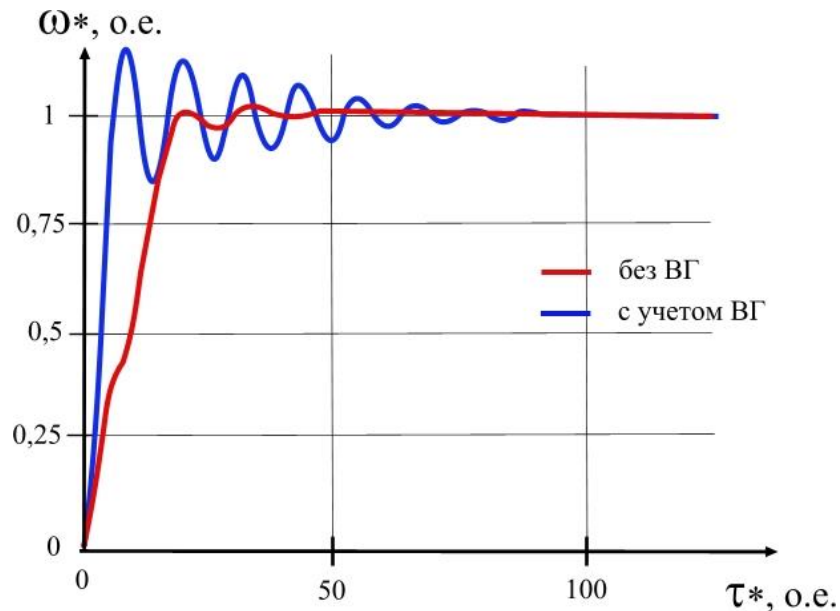


Рисунок 23 – Увеличение времени разгона АД в режиме СЗ при наличии ВГ

Расчеты, проведенные по уравнениям 37-38 на основе численных методов показали, что при наличии ВГ время разгона АД при самозапуске увеличивается на 20-30%, что в конечном итоге вызывает дополнительный нагрев обмоток.

В сетях РН-ЮНГ в рамках диссертационного исследования с использованием разработанных алгоритмов был проведен активный эксперимент для определения запаса статической устойчивости по напряжению.

В шестой главе диссертации приведены результаты анализа сетей ООО «РН-ЮНГ», обоснованы резонансные перенапряжения. Определена максимально возможная кратность перенапряжений – для сетей 35 кВ кратность составила 2,905; для сетей 6 кВ – 2,1, для сетей 0,4 кВ – 1,97 о.е. от значения номинального напряжения. Определены резонансные частоты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе разработаны теоретические положения, совокупность которых представляет научное достижение, развивающее теорию и практику гармонического анализа и вейвлет преобразования нестационарных несинусоидальных режимов электроэнергетических систем.

1. Доказана неэффективность применения преобразования Фурье для анализа показателей качества электроэнергии при нестационарных режимах. Раскрыты существующие противоречия в применяемых подходах к анализу интергармоник в электрических сетях.

2. Доказана перспективность практического использования вейвлет преобразования для расчета установившихся и переходных режимов электрических сетей при наличии электроприёмников с нелинейной вольт-амперной характеристикой. Изложены элементы теории непрерывного, дискретного и пакетного вейвлет преобразования применительно к анализу установившихся и переходных процессов электроэнергетических систем. Представлены методические рекомендации применения пакетного вейвлет преобразования при использовании ЭВМ для решения задач в электроэнергетике.

3. Разработаны методы контроля и анализа качества электроэнергии в электрических сетях 0,4–110 кВ на основе математического аппарата вейвлет преобразования. Разработана методика анализа нестационарного режима при наличии аperiodических (свободных) составляющих токов (напряжений) – вейвлет анализ ударного тока короткого замыкания в сети 110 кВ. Разработана методика анализа коммутационных бросков

тока (осциллирующая помеха), импульсных напряжений, провалов и прерываний напряжения с помощью непрерывного и дискретного вейвлет преобразования.

Изложены доказательства эффективного применения детализирующих вейвлет коэффициентов, отвечающих за локализацию высокочастотных компонент, для идентификации изменения режимных параметров электрической системы (на примере анализа провалов и прерываний напряжения). Увеличение амплитуд детализирующих коэффициентов, связано с разрывами производных высших порядков, при изменении режимного параметра. Амплитуда вейвлет коэффициента в момент изменения режима t возрастает более чем в 200 раз, что обеспечивает надёжную чувствительность цифровых защит. Данное обстоятельство позволяет использовать детализирующие вейвлет коэффициенты начальных уровней разложения ($D1, D2$) устройствами релейной защиты и автоматики для формирования цифрового сигнала о резком изменении режимного параметра.

4. Разработан критерий выбора оптимального типа вейвлета, для анализа несинусоидальных нестационарных режимов электроэнергетических систем и сетей 0,4–110 кВ. Критерий ставит условие: гармоническая группа h определённой по ГОСТ 30804.4.7–2013 должна быть максимально перекрыта полосой пропускания фильтра нижних частот вейвлет функции. Гармоническую группу $h+1$ должна перекрывать полоса пропускания верхних частот. В этом случае частотная локализация узла вейвлет разложения $a_{j,k}$ будет соответствовать ширине гармонической группы h , узел $a_{j,k+1}$ будет характеризовать гармоническую группу $h+1$. Математически выполнение данного условия соответствует максимуму локальной плотности энергетического спектра рассматриваемой гармонической группы $\Delta E_n \rightarrow \max$, что позволяет подобрать функцию материнского вейвлета, имеющего АЧХ максимально близкую к идеальной. Второе условие предложенного критерия – среднеквадратическое отклонение исходного и реконструируемого сигнала в результате вейвлет преобразования должно стремиться к минимуму. Проведен расчет среднеквадратического отклонения 10 типов вейвлет функций, интегрированных в систему MATLAB. Доказано, что минимальные среднеквадратические отклонения демонстрируют вейвлеты семейства Добеши (Добеши 10, Добеши 24 и др.).

5. Разработан рекурсивный метод и алгоритм расчета переходных процессов в цепях переменного (расчет тока трехфазного короткого замыкания в сети 110 кВ) и постоянного тока. Разработанный метод, относится к классу численных методов, позволяет по известному ряду коэффициентов дискретного вейвлет преобразования вынуждающей силы (напряжения, э.д.с.) получить дискретные вейвлет коэффициенты тока цепи переходного процесса. Обратное вейвлет преобразование позволяет получить искомую функцию тока в виде матрицы дискретных значений. Относительная погрешность при использовании разработанного метода не превысила 3%.

6. Доказана эффективность внедрения вейвлет преобразования в качестве основного инструмента сжатия потока цифровых данных для систем контроля и учета электропотребления. Установлено, что коэффициенты сжатия цифровых данных с использованием вейвлет преобразования составляют от 12 до 16. Необходимость разработки методов сжатия и удалённого восстановления данных сформулирована в плане мероприятий национальной технологической инициативы «Энерджинет» (распоряжение Правительства РФ от 28.04.2018 № 830-р, ст. 2803).

7. Разработаны методы и алгоритмы расчета интегральных характеристик (действующих значений токов и напряжений, составляющих мощности, энергии) установленных и переходных режимов электроэнергетических систем и сетей 0,4–110 кВ на основе пакетного вейвлет преобразования. Разработанные методы позволяют определять действующие значения токов и напряжений каждой гармоники в отдельности при нестационарных режимах работы электрических сетей. Для каждой частоты предложен

ный метод позволяет определить активную мощность, реактивную и мощность искажения.

8. Разработан метод и алгоритм расчета дополнительных потерь в токоведущих частях при несинусоидальных режимах. Учтено влияние интергармоник и изменения величины активного сопротивления под влиянием дополнительного нагрева, создаваемого токами гармоник. Установлено, что в диапазоне рабочих температур для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена (от -50°C до $+200^{\circ}\text{C}$) сопротивление жилы может изменяться в пределах $R=(0,87\div 1,87)R_0$. Разработаны уравнения теплового баланса для кабеля с ПВХ изоляцией и трансформатора с масляным охлаждением для расчета фактической температуры токоведущих частей при нестационарных режимах работы. Токи в уравнениях заданы набором вейвлет коэффициентов заданного уровня разложения, что позволяет использовать уравнения в системе цифровой обработки данных. Доказано, что если не учитывать фактический нагрев токоведущих частей, то при коэффициентах суммарного гармонического искажения по току $KI\geq 70\%$ погрешность в определении дополнительных потерь от высших гармоник превышает 20%. Разработанные алгоритмы расчета потерь от высших гармоник и интергармоник позволяют повысить точность технико-экономической оценки мероприятий по внедрению фильтрокомпенсирующих устройств, что обеспечит повышение энергоэффективности в рамках реализации Федерального Закона № 261-ФЗ «Об энергосбережении».

9. Приведено доказательство опасного увеличения температуры токоведущих частей (на примере кабельной линии) при значительных (более 80%) суммарных коэффициентах гармонических искажений по току.

10. Произведена модернизация алгоритмов релейной защиты, позволяющих определить отходящую линию с однофазным замыканием на землю в сетях с компенсированной нейтралью. Отличие от ранее известных алгоритмов заключается в определении энергии спектра ВГ через аппарат вейвлет преобразования. Поврежденная линия определяется по максимальной энергии спектра вейвлет коэффициентов, локализирующих высшие гармоники. С помощью вейвлет преобразования предложено осуществлять цифровую фильтрацию частот выше 1,5–2 кГц для повышения чувствительности максимальных адмитансных защит. Предложенный в диссертации алгоритм позволит осуществлять цифровой анализ тока замыкания программными средствами, что может быть внедрено при реализации стратегических задач, озвученных в программе развития цифровых подстанций и Smart Grid (умные сети).

11. Разработан способ автоматического управления дугогасящим реактором для компенсации ёмкостного тока при возникновении однофазных замыканий на землю. Способ основан на оригинальной идее выделения свободной составляющей напряжения контура нулевой последовательности на основе дискретного вейвлет преобразования и непараметрического метода Уэлча.

12. Предложен нетрадиционный подход для идентификации, анализа и расчета интергармоник на основе вейвлет преобразования. Проблема нормирования интергармоник в РФ в настоящее время находится на стадии рассмотрения. Доказано, что интергармоники должны подлежать обязательному нормированию, аналогично высшим гармоникам, что позволит сократить потери в токоведущих частях, устранить колебания напряжения, минимизировать дозу фликера. Повышение точности расчета, моделирования интергармоник и технических средств по их минимизации позволит повысить пропускную способность и стабильность энергоснабжения в соответствии с задачами, сформулированными в Постановлении Правительства РФ от 3.04.13 № 511-р.

13. Разработана методика анализа динамической устойчивости узлов нагрузок при наличии существенной доли нелинейной нагрузки, искажающей синусоидальность

формы кривой напряжения. Доказано, что для эквивалентной асинхронной нагрузки высшие гармоники оказывают негативное влияние – возникают дополнительные колебания электромагнитного момента, увеличивается на 20-30% время разгона в процессе самозапуска.

Представлена методика анализа резонансных режимов с применением вейвлет преобразования. Приведены результаты анализа сетей ООО «РН-ЮНГ», определена максимально возможная кратность перенапряжений – для сетей 35 кВ кратность составила 2,905; для сетей 6 кВ – 2,1.

Результаты численных экспериментов на имитационных моделях и физических измерений на действующих объектах электроэнергетической отрасли подтверждают правомерность представленных в диссертации научных и практических положений.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах, вошедших в перечень ВАК РФ:

1. **Осипов, Д. С.** Разработка критерия выбора оптимального типа материнского вейвлета в задаче расчета активной и реактивной мощности систем электроснабжения [Текст] / Д. С. Осипов // Омский научный вестник. – 2018. – № 6 (162). – С. 71–75.

2. **Осипов, Д. С.** Расчет резонансных режимов систем электроснабжения и разработка мероприятий по фильтрации высших гармоник [Текст] / В.А. Ощепков, Д.С. Осипов, Д.В.Коваленко, Б.Ю.Киселёв // Промышленная энергетика. – 2018. – № 9. – С. 10–16.

3. **Осипов, Д. С.** Анализ режима однофазного замыкания на землю в сетях с комбинированным заземлением нейтрали с помощью вейвлет преобразования [Текст] / Д. С. Осипов, Н. Н. Долгих, Д. С. Сатпаев, Е. Г. Андреева // Омский научный вестник. – 2018. – № 5 (161). – С. 76–81.

4. **Осипов, Д. С.** Анализ дополнительных потерь от высших гармоник в сетях 380 В с помощью алгоритмов пакетного вейвлет преобразования [Текст] / Д. С. Осипов, Н. Н. Долгих, С.А. Горовой, В.Е. Поплавская // Омский научный вестник. – 2018. – № 6 (162). – С. 76–81.

5. **Осипов, Д. С.** Методы спектрального анализа в системе управления дугогасящего реактора [Текст] / А.Д. Дубкова, С.Ю. Долингер, Д.С. Осипов // Омский научный вестник. – 2018. – № 3 (159). – С. 43–47.

6. **Осипов, Д. С.** Разработка метода расчета потерь мощности в токоведущих частях при наличии интергармоник [Текст] / Д.С. Осипов, Д.В. Коваленко, Л.А. Файфер, Б.Ю. Киселёв, Н.Н. Долгих // Омский научный вестник. – 2017. – № 4 (154). – С. 60–65.

7. **Осипов, Д. С.** Применение пакетного вейвлет-преобразования для определения составляющих мощности при несинусоидальных режимах [Текст] / Л.А.Файфер, Д.С. Осипов, Е.Н. Ерёмин, Н.Н. Долгих // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2016. – № 8 (115). – С. 136–145.

8. **Осипов, Д. С.** Применение вейвлет-преобразования для частотной декомпозиции токов нулевой последовательности при однофазном замыкании на землю в сетях с изолированной нейтралью [Текст] / А.А. Ляшков, Д.С. Осипов, Д.С. Сатпаев, Н.Н. Долгих, А.Я. Бигун // Омский научный вестник. – 2016. – № 4 (148). – С. 56–61.

9. **Осипов, Д. С.** Разработка алгоритма автоматической настройки компенсации ёмкостных токов на основе существующих методов [Текст] / Д.С. Осипов, С.Ю. Долингер, Д.Г. Сафонов // Омский научный вестник. – 2016. – № 4 (148). – С. 79–84.

10. **Осипов, Д. С.** Расчет потерь энергии в кабельной линии электропередачи при наличии нелинейной нагрузки методом пакетного вейвлет-преобразования [Текст] / Д.С.

Осипов, Д.В. Коваленко, Б.Ю. Киселёв // Омский научный вестник. – 2016. – № 4 (148). – С. 84–89.

11. **Осипов, Д. С.** Определение коэффициентов искажения синусоидальности формы кривой тока по вейвлет коэффициентам [Электронный ресурс] / Н.Н. Долгих, Ф.В. Катеров, Д.С. Осипов, Е.В. Птицына, Л.А. Файфер // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2015. – № 113. – С. 814–825. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2015/09/pdf/60.pdf>.

12. **Осипов, Д. С.** Применение дискретного вейвлет преобразования для расчёта нестационарных режимов систем электроснабжения [Электронный ресурс] / Н.Н. Долгих, Е.Н. Ерёмин, Б.Ю. Киселёв, Д.С. Осипов, // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2015. – № 113. – С. 286–296. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2015/09/pdf/23.pdf>.

13. **Осипов, Д. С.** Расчет потерь мощности в элементах системы электроснабжения с учётом высших гармоник и зависимости сопротивлений токоведущих частей от температуры [Текст] / Р.А. Гапиров, Д.С. Осипов // Промышленная энергетика. – 2015. – № 1. – С. 16–21.

14. **Осипов, Д. С.** Разработка методики расчёта нестационарных тепловых процессов при несинусоидальных режимах систем электроснабжения [Текст] / Р.А. Гапиров, Д.С. Осипов, Е.Н. Ерёмин // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2014. – № 1. – С. 35–40.

15. **Осипов, Д. С.** Обзор современных средств и методов компенсации ёмкостных токов в сетях 6–35 кВ с изолированной нейтралью [Электронный ресурс] / Д.С. Осипов, Б.Ю. Киселёв, А.А. Планков, А.Г. Янишевская // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. – С. 274. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/120-16666>.

16. **Осипов, Д. С.** Программное обеспечение для исследования динамической устойчивости узлов нагрузок систем электроснабжения [Электронный ресурс] / А.А. Планков, Д.С. Осипов, О.А. Сидоров // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5. – С. 275. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/119-15241>.

17. **Осипов, Д. С.** О необходимости учёта режима работы и импеданса системы электроснабжения при моделировании резонанса токов [Электронный ресурс] / С.С. Сиромаха, Д.С. Осипов, В.Т. Черемисин // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5. – С. 283. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/119-15252>.

18. **Осипов, Д. С.** Нормирование интергармоник как показателя качества электроэнергии в России и за рубежом [Электронный ресурс] / Р.А. Гапиров, Д.С. Осипов // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5. – С. 284. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/119-15253>.

19. **Осипов, Д. С.** Система управления уровнем напряжения на конденсаторах компенсирующего устройства в четырёхпроводной трехфазной сети для обеспечения качества электрической энергии [Текст] / С.Ю. Долингер, А.Г. Лютаевич, Д.С. Осипов // Омский научный вестник. – 2013. – № 1(117). – С. 159–163.

20. **Осипов, Д. С.** Моделирование критических режимов работы узлов электроэнергетических систем с асинхронной нагрузкой при исследовании статической устойчивости на промышленной частоте [Текст] / А.А. Планков, Д.С. Осипов, В.А. Планкова, В.Л. Юша // Омский научный вестник. – 2013. – № 1(117). – С. 173–178.

21. **Осипов, Д. С.** Учёт влияния высших гармоник тока и напряжения на критерии статической устойчивости узлов электроэнергетических систем с асинхронной нагрузкой [Текст] / Д.С. Осипов, А.А. Планков, А.Е. Бугреева, Н.Н. Долгих, Е.Н. Ерёмин // Омский научный вестник. – 2013. – № 2(120). – С. 218–221.

22. **Осипов, Д. С.** Исследование статической устойчивости при подключении нагрузок, искажающих синусоидальность напряжения [Текст] / А.А. Планков, Д.С. Осипов, А.Е. Бугреева, Н.Н. Долгих, А.А. Вырва // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2013. – № 1. – С. 296-300.

23. **Осипов, Д. С.** Моделирование несинусоидальных режимов систем электроснабжения с учётом нагрева токоведущих частей [Электронный ресурс] / Д.С. Осипов, А.А. Планков, А.Е. Бугреева, Н.Н. Долгих, Е.Н. Ерёмин // Современные проблемы науки и образования. – 2013 – № 4. – С. 78. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/110-9880>.

24. **Осипов, Д. С.** Анализ естественной освещённости при управлении системой электроснабжения осветительных установок [Текст] / И.Н. Краснокуцкий, А.В. Бубнов, Д.С. Осипов, Е.В. Петрова // Омский научный вестник. – 2012. – № 2(110). – С. 219-222.

25. **Осипов, Д. С.** Вопросы устойчивости технических средств обеспечения качества электроэнергии [Текст] / А.А. Планков, Д.С. Осипов, А.Г. Люতারевич, А.В. Дед // Омский научный вестник. – 2011. – № 1(97). – С. 126-130.

26. **Осипов, Д. С.** Влияние электроприёмников, искажающих синусоидальность формы кривой напряжения и тока, на значение критического напряжения при оценке устойчивости узла с асинхронной нагрузкой [Текст] / А.А. Планков, Д.С. Осипов, А.В. Бубнов, С.Ю. Долингер // Омский научный вестник. – 2011. – № 3(103). – С. 225-228.

27. **Осипов, Д. С.** Вейвлет-анализ параметров качества электрической энергии как альтернатива преобразованию Фурье [Текст] / С.С. Сиромеха, Д.С. Осипов, В.В. Харламов // Омский научный вестник. – 2011. – № 3(103). – С. 229-231.

28. **Осипов, Д. С.** Определение управляющего воздействия активного фильтра гармоник [Текст] / В.Н. Горюнов, Д.С. Осипов, А.Г. Люতারевич // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2009. – № 6. – С. 20-24.

29. **Осипов, Д. С.** Расчёт потерь мощности от влияния высших гармоник [Текст] / В.Н. Горюнов, Д.С. Осипов, А.Г. Люতারевич // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2009. – № 2. – С. 268-273.

Публикации в журналах, входящих в библиографическую базу Scopus

30. **Osipov, D.S.** Development of conductive parts power losses calculation method in case of interharmonics / D.S. Osipov, V.N. Goryunov, L.A. Faifer, B.Yu. Kisselyov, N.N. Dolgikh // Przegląd Elektrotechniczny, 2017, NR 6. P. 146-149 URL: <http://pe.org.pl/articles/2017/6/33.pdf> DOI: 10.15199/48.2017.06.33.

31. **Osipov, D.S.** Applications of wavelet transform for analysis of electrical transients in power systems: The Review / D.S. Osipov, A.G. Lyutarevich, R.A. Gapirov, V.N. Gorunov, A.A. Bubenchikov // Przegląd Elektrotechniczny, 2016, NR 4. P. 162-165 URL: <http://pe.org.pl/articles/2016/4/35.pdf> DOI:10.15199/48.2016.04.35.

Публикации в материалах конференций, входящих в библиографическую базу Web of Science

32. **Osipov, D.S.** Mode and climatic factors effect on energy losses in transient heat modes of transmission lines / A.Ya. Bigun , O.A. Sidorov , D.S. Osipov , S.S. Girshin, V N Goryunov, E V Petrova // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 944 (2018) pp. 1–10. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012016.

33. **Osipov, D.S.** The application of wavelet transform for identification of single phase to earth fault in power system / V.N. Goryunov, D.S. Osipov, N.N. Dolgikh // Industrial Engi-

neering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) (19–20 May, 2016) –IEEE International Conference Publications. Chelyabinsk, Russia. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7911436.

34. **Osipov, D.S.** Studies of dynamic stability of nodes of electric power systems with asynchronous loading taking into account higher harmonics / D.S. Osipov, A.A. Plankov, E.V. Rumyantseva// Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) (19–20 May, 2016) –IEEE International Conference Publications. Chelyabinsk, Russia. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7911468.

35. **Osipov, D.S.** Simulation of electrical loads for the steady-state regime calculation of electric grids with arc extinguish reactor / S.S. Girshin, V.N. Goryunov, E.A. Kuznetsov, E.V. Petrova, D.S. Osipov// 11th International Conference on ELEKTRO (May 16-18, 2016) –IEEE Conference Publications. Slovakia. – pp. 290-293. DOI: 10.1109/ELEKTRO.2016.7512083.

36. **Osipov, D.S.** Mathematical model of electric energy losses calculating in cross-linked four-wire polyethylene insulated (XLPE) aerial bundled cables / S.S. Girshin, A.A. Bubenichikov, T.V. Bubenichikova, V.N. Goryunov, D.S. Osipov // 11th International Conference on ELEKTRO (May 16-18, 2016) –IEEE Conference Publications. Slovakia. – pp. 294-298. DOI: 10.1109/ELEKTRO.2016.7512084.

37. **Osipov, D.S.** Wavelet Transform - A New Tool for Analysis of Harmonics in Power Systems / D.S. Osipov, V.N. Gorunov, A.A. Bubenichikov, P.V. Katerov // 3rd International Conference on Manufacturing and Industrial Technologies, ICMIT 2016 (May 25-27, 2016) – Istanbul, Turkey. DOI: 10.1051/mateconf/20167010009

Публикации в материалах конференций, входящих в библиографическую базу Scopus

38. **Osipov, D.S.** Calculation of currents resonance at higher harmonics in power supply systems based on wavelet packet transform / D.S. Osipov, D.V. Kovalenko, N.N. Dolgikh, // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics) (14–16 Nov, 2017) –IEEE Conference Publications. Omsk, Russia. DOI: 10.1109/Dynamics.2017.8239492.

39. **Osipov, D.S.** Algorithms of packet wavelet transform for power determination under nonsinusoidal modes / D.S. Osipov, N.N. Dolgikh, V.N. Goryunov, D.V. Kovalenko // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics) (15–17 Nov, 2016) –IEEE Conference Publications. Omsk, Russia. DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7819059.

40. **Osipov, D.S.** Development of rotor position sensor for permanent magnet motor / A.G. Lyutarevich, D.S. Osipov, S.Y. Dolinger, A.A. Plankov// Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics) (15–17 Nov, 2016) –IEEE Conference Publications. Omsk, Russia. DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7819042.

41. **Osipov, D.S.** Basic approaches to the implementation of Petersen Coil control system using wavelet denoising / S.Y. Dolinger, A.G. Lyutarevich, D.S. Osipov, A.A. Plankov // 11th International Conference on ELEKTRO (May 16-18, 2016) –IEEE Conference Publications. Slovakia. – pp. 278-283. DOI: 10.1109/ELEKTRO.2016.7512081.

42. **Osipov, D.S.** Development of torque vector control system of permanent magnet motor / A.G. Lyutarevich, V.N. Goryunov, E.A. Lokhman, S.Y. Dolinger, D.S. Osipov // International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2016 – Proceedings (May 12-14, 2016) –Moscow. – pp. 1-5. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491663.

43. **Osipov, D.S.** Basic approaches to the implementation of Petersen coil control system / Dolinger Y Stanislav, Lyutarevich G Alexander, Osipov S Dmitry // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. – Omsk: Omsk State Technical University. Russia, Omsk, May 21–23, 2015. IEEE Catalog Number: CFP15794-CDR.

44. **Osipov, D.S.** Selecting parameters of power circuit of electric power quality assurance device / Dolinger Y Stanislav, Lyutarevich G Alexander, Osipov S Dmitry // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. – Omsk: Omsk State Technical University. Russia, Omsk, May 21–23, 2015. IEEE Catalog Number: CFP15794-CDR.

Другие работы автора, индексируемые в РИНЦ:

45. **Осипов, Д. С.** Идентификация колебаний напряжения в электроэнергетических системах на основе пакетного вейвлет преобразования [Текст] / Н.Н. Долгих, Б.Ю. Киселёв, Д.С. Осипов, С.А. Горовой // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 12-2. – С. 190-195.

46. **Осипов, Д. С.** Частотная декомпозиция на основе вейвлет преобразования для исследования несинусоидальных режимов систем электроснабжения [Текст] / Д.С. Осипов, Н.Н. Долгих, С.А. Горовой // Технические науки – от теории к практике. – 2016. – № 57. – С. 171-177.

47. **Осипов, Д. С.** Определение частоты свободных колебаний контура нулевой последовательности методом Уэлча [Текст] / Д.С. Осипов, Н.Н. Долгих, С.А. Горовой // Технические науки – от теории к практике. – 2015. – № 52. – С. 108-114.

48. **Осипов, Д. С.** Применение вейвлет преобразования для расчета мощности в системах электроснабжения при нестационарных режимах работы [Текст] / Д.С. Осипов, Д.В. Коваленко, Л.А. Файфер // Инновации в науке. – 2015. – № 51-1. – С. 126-142.

49. **Осипов, Д. С.** Применение быстрого вейвлет преобразования для решения переходных процессов в электрических цепях [Текст] / Б.Ю. Киселёв, Д.С. Осипов // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность! – 2015. – № 1. – С. 194-198.

50. **Осипов, Д. С.** Потери мощности в кабеле и трансформаторе с учётом температуры токоведущих частей и несинусоидальности формы кривой тока [Текст] / Д.С. Осипов, Д.В. Мохова, Б.Ю. Киселёв, Д.С. Сатпаев // Технические науки – от теории к практике. – 2014 – № 41. – С. 66-77.

51. **Осипов, Д. С.** Расчёт нестационарных тепловых процессов при несинусоидальных режимах СЭС с учётом нагрева токоведущих частей [Текст] / Р.А. Гапиров, Д.С. Осипов // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность! – 2013. – № 2. – С. 221-222.

52. **Осипов, Д. С.** Методы вейвлет-анализа при исследовании несинусоидальных режимов СЭС [Текст] / С.С. Сиромеха, Д.С. Осипов, Ю.В. Сиромеха, Е.О. Тарасевич // Научные труды SWorld. – 2013. – Т. 7. № 2. – С. 56-61.

53. **Осипов, Д. С.** Алгоритм расчёта основных параметров устройства для обеспечения качества электроэнергии [Текст] / С.Ю. Долингер, А.Г. Люtareвич, Д.С. Осипов // Динамика систем, механизмов и машин. – 2012. – № 1. – С. 127-130.

54. **Осипов, Д. С.** Определение временных пусковых параметров электродвигателей для адаптивной блокировки его защит [Текст] / Д.Е. Маруськин, К.И. Никитин, А.А. Планков, Д.С. Осипов // Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем: аннотации докладов 4-ой Международной научно-технической конференции SIGRE. – Екатеринбург, 2013.

55. **Осипов, Д. С.** Оценка дополнительных потерь мощности от высших гармоник в элементах систем электроснабжения [Текст] / А.Г. Люtareвич, А.А. Вырва, С.Ю. Долингер, Д.С. Осипов, И.Н. Четверик // Омский научный вестник. – 2009. – № 1(77). – С. 109-113.

Авторские свидетельства, дипломы, патенты, лицензии:

56. Пат. № RUS 2644582 , МПК H02H 3/18. Способ настройки компенсации емкостных токов замыкания на землю в электрических сетях / Осипов Д.С., Лютаревич А.Г., Долингер С.Ю. Заявка № 2016145361; Опубл. 18.11.2016.

57. Свидетельство о регистрации электронного ресурса № 21771. Алгоритм автоматической подстройки дугогасящего реактора / С.Ю. Долингер, Д.С. Осипов, Д.Г. Сафонов. Зарегистрировано 14.04.2016.

58. Свидетельство об официальной регистрации программ № 18926. Программа для анализа устойчивости узлов нагрузки / Д.С. Осипов, А.А. Планков, В.А. Планкова. М.: ОФЭРНиО ФГНУ ИНИПИ РАО, 2013.

59. Свидетельство о регистрации электронного ресурса № 18490. Алгоритм определения управляющего воздействия компенсирующего устройства / С.Ю. Долингер, А.Г. Лютаревич, Д.С. Осипов. М.: ОФЭРНиО ФГНУ ИНИПИ РАО, 2012.

60. Свидетельство о регистрации электронного ресурса №15630. Программа «Расчет потерь мощности от высших гармоник (версия 2)». / С.Ю. Долингер, А.Г. Лютаревич, Д.С. Осипов. М.: ОФЭРНиО ИИО РАО, 2010.

61. Свидетельство о регистрации электронного ресурса № 14229. Алгоритм определения управляющего воздействия активного фильтра гармоник / С.Ю. Долингер, А.Г. Лютаревич, Д.С. Осипов. М.: ОФЭРНиО ИИО РАО, 2009.