

Омский государственный технический университет

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

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант:
Горюнов Владимир Николаевич,
доктор технических наук, профессор

ОМСК 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	6
1 ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ВЕЙВЛЕТ АНАЛИЗА	23
1.1 Обзор мирового опыта применения вейвлет преобразования для анализа режимов электроэнергетических систем	23
1.2 Непрерывное и дискретное вейвлет преобразование.....	30
1.3 Кратномасштабный анализ электрических сигналов.....	55
1.4 Алгоритмы разложения и реконструкции	56
1.5 Пакетное вейвлет преобразование	60
1.6 Амплитудно-частотные характеристики вейвлетов.....	67
1.7 Основные результаты и выводы	70
2. МОДЕРНИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И АЛГОРИТМОВ РАСЧЕТА РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТ АНАЛИЗА	72
2.1 Разработка критерия выбора оптимального типа материнского вейвлета для исследования качества электроэнергии.....	72
2.2 Методика расчета действующих значений токов и напряжений по вейвлет коэффициентам.....	75
2.3 Разработка рекурсивных моделей расчета переходных процессов в электрических цепях на основе вейвлет коэффициентов	81
2.3.1 Модель для анализа переходного процесса при трёхфазном коротком замыкании	81
2.3.2 Модель для анализа переходного процесса при коммутации в цепях постоянного тока.....	92
2.3.3 Модель для анализа переходного процесса при коммутации в цепях переменного тока	99

2.4 Методы анализа качества электроэнергии с помощью вейвлет преобразования.....	101
2.4.1 Анализ токов трехфазного короткого замыкания	101
2.4.2 Анализ коммутационных бросков тока	111
2.4.3 Анализ импульсных напряжений.....	118
2.4.4 Анализ несинусоидальности напряжения и тока	121
2.4.5 Анализ провалов и прерываний напряжения.....	129
2.5 Основные результаты и выводы	132
3 Разработка методов расчета высших гармоник и интергармоник по вейвлет коэффициентам.....	134
3.1 Анализ проблемы нормирования, анализа и обеспечения качества электроэнергии	134
3.2 Методика расчета составляющих мощности при несинусоидальных режимах на основе пакетного вейвлет преобразования.....	140
3.3 Экспериментальные исследования и анализ несинусоидальных режимов систем электроснабжения	146
3.4 Методика идентификации, анализа и расчета интергармонических составляющих в токах и напряжениях по вейвлет коэффициентам.....	158
3.5 Основные результаты и выводы	168
4 Анализ однофазных замыканий на землю алгоритмами пакетного и непрерывного вейвлет преобразования	170
4.1 Обзор алгоритмов и устройств защиты и сигнализации замыкания на землю, работающих на использовании высших гармоник	170
4.2 Анализ энергии спектра тока нулевой последовательности на основе вейвлет коэффициентов	178

4.3 Разработка алгоритма защиты и сигнализации ОЗЗ для цифровых устройств с применением алгоритмов вейвлет преобразования.....	182
4.4 Разработка способа управления дугогасящим реактором с применением алгоритмов вейвлет преобразования.....	185
4.5 Основные результаты и выводы.....	194
5 УЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТОКОВЕДУЩИХ ЧАСТЕЙ ПРИ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ РЕЖИМАХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ.....	196
5.1 Математическое моделирование учета температурной зависимости сопротивления при наличии высших гармоник.....	196
5.2 Анализ нестационарных несинусоидальных режимов систем электроснабжения с помощью вейвлет преобразования	199
5.3 Алгоритм расчета дополнительных потерь в токоведущих частях по вейвлет коэффициентам с учетом высших гармоник и зависимости сопротивления от температуры.....	202
5.4 Основные результаты и выводы.....	207
6 УСТОЙЧИВОСТЬ УЗЛОВ НАГРУЗОК СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРИ НАЛИЧИИ ВЫСШИХ ГАРМОНИК В СЕТЯХ	209
6.1 Методика анализа самозапуска асинхронных двигателей при несинусоидальном напряжении питающей сети	209
6.2 Анализ статической устойчивости узла нагрузок при наличии высших гармоник.....	217
6.3 Методика анализа резонансных перенапряжений в узлах нагрузки на основе вейвлет преобразования	239
6.4 Основные результаты и выводы.....	243
Заключение	245
Список сокращений (аббревиатур).....	250

Библиографический список.....	251
Приложение А. Акты внедрения	295
Приложение Б. Патент и свидетельства о регистрации программ	302

ВВЕДЕНИЕ

Стратегия развития электросетевого комплекса Российской Федерации (Постановление Правительства РФ от 3 апреля 2013 № 511-р) [206] на фоне ежегодного увеличения спроса на электрическую энергию отмечает необходимость внедрения новых технологий и повышения энергоэффективности энергетической отрасли.

Для решения поставленных задач необходимо широкое внедрение интеллектуальных способов управления электрическими сетями, развитие так называемых «умных сетей» (Smart Grid), в настоящее время уже применяющихся в электросетевых компаниях США, Канады, Японии, стран ЕС. Развитие технологии Smart Grid позволит увеличить надежность электроснабжения, сократить потери в токоведущих частях, что в конечном итоге снизит издержки на транспортировку электроэнергии до конечного потребителя, повысит энергоэффективность как отдельных сетей, так и энергетической отрасли в целом. Интеллектуальные инструменты управления электрическими сетями (с применением современных методов цифровой обработки сигналов) позволяют минимизировать погрешности и издержки связанные с техническими и, главным образом, коммерческими потерями в системах распределения и потребления. Внедрение элементов цифровой энергетики является одним из важнейших стратегических направлений развития электросетевого комплекса России [38].

Сказанное выше определяет актуальность проведения научных исследований по разработке новых и модернизации существующих методов и алгоритмов цифровой обработки сигналов, характеризующих нормальные, аварийные и послеаварийные режимы работы электроэнергетических систем. Требуется модификация методов, учитывающих нестационарность режимов в условиях неопределенности исходной информации, при изменении генерируемых и потребляемых мощностей, изменении конфигурации схемы электрических сетей. Требуется разработка новых программно-информационных продуктов, способных анализировать режимы работы электроэнергетических систем в

условиях изменения текущих параметров режима, при отклонении показателей качества электроэнергии от требуемых нормативов. Необходимо учитывать стратегические инициативы страны в части модернизации существующих сетей и строительства новых энергетических объектов с учетом возможности поддержания цифрового информационного обмена между элементами энергосистемы по стандарту МЭК 61850.

Возникает задача широкого внедрения современных инновационных технологий и создание «интеллектуальной энергетической системы с активно-адаптивной электрической сетью – энергосистемы нового поколения» [206].

В рамках реализации Энергетической стратегии России на период до 2030 года (ЭС-2030), утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 13 ноября 2009 года № 1715-р поставлены задачи развития и внедрения научно-технических достижений в области фундаментальных наук и отраслей, производящих топливно-энергетические ресурсы, энергопотребляющую и генерирующую технику и оборудование.

По итогам совещания кабинета министров РФ о проекте Энергетической стратегии России на период до 2035 года, которое состоялось 18 марта 2015 года, премьер-министр Д.А. Медведев отметил, что с учётом замедления внутреннего экономического роста, реалий посткризисного развития мировой и российской экономики и энергетики необходимо скорректировать действующую ЭС-2030, а также расширить временной горизонт Стратегии до 2035 года. Редакция проекта ЭС-2035 во многом совпадает с ЭС-2030, но стоит отметить и ряд значительных изменений. Новая редакция ЭС-2035 предполагает переориентацию от ресурсно-сырьевого варианта к ресурсно-инновационному развитию, определяя приоритетной задачей не количественное увеличение показателей, а качественное изменение структуры энергопотребления, повышение уровня энергетических услуг, модернизации и энергосбережения. Ставятся целевые показатели по «снижению потерь в электрических сетях и повышение эффективности передачи и распределения электроэнергии, в том числе за счет ... создания систем автоматизированного учета и регулирования в электрических сетях».

С учетом проекта Энергетической стратегии Российской Федерации до 2035 года был разработан и утверждён (распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 апреля 2018 г. №830-р) план мероприятий («Дорожная карта») Национальной технологической инициативы по направлению «Энерджинет» [173]. Одной из ключевых целей плана мероприятий со сроком выполнения до ноября 2021 года заявлено: «Определение особенностей применения модифицированных систем контроля и учета потребления (производства) электрической энергии (мощности) ... с применением алгоритмов сжатия и удалённого восстановления данных о потреблении (производстве) электрической энергии (мощности) в облачной среде» [173, с. 10096, п. 17]. Для достижения заявленных целей в паспорте программы указывается необходимость создания и развития интеллектуальных электрических сетей, повышение надёжности и качества электроснабжения потребителей, развитие интеллектуального учета электроэнергии, внедрение новых алгоритмов цифровой обработки данных и принятия решений.

Основные положения концепции интеллектуальной энергосистемы с активно-адаптивной сетью разработанные в 2011 году при участии ведущих ВУЗов и НИИ России (ОИВТ РАН, ИСЭМ СО РАН, ИНЭИ РАН, ИПУ РАН, МЭИ и др.) предусматривают достижение высоких уровней автоматизации в электроэнергетике, при котором обмен информацией между подстанциями и внешними системами осуществляется в цифровом виде [161]. Разработанные в [161] положения нашли отражение в отраслевых документах – в целях программы инновационного развития ПАО «ФСК ЕЭС» заявлено: выполнение исследований, необходимых для внедрения технологий стандарта «цифровая подстанция» [181, с. 82], построение и развитие системы управления качеством электроэнергии [181, с. 100].

В рамках развития технологии «цифровые подстанции» возникает необходимость получения, обработки, передачи цифровой информации о режиме работы, как отдельных элементов, так и электрической сети в целом, в соответствии с требованиями стандарта МЭК 61850 [67].

В этом отношении математический аппарат вейвлет преобразования представляется в более выгодном свете для гармонического анализа и контроля показателей качества электроэнергии в условиях динамики режимов и процессов в электроэнергетике.

В России продолжает накапливаться опыт внедрения и эксплуатации цифровых подстанций на различных предприятиях электроэнергетической отрасли (электрические станции [76], электросетевые компании [78], энергоснабжающие организации). В работе [76, с. 59] на основе опыта внедрения цифровой подстанции на Нижегородской ГЭС ПАО «РусГидро» специалисты отмечают, что при передаче цифровых данных возникла необходимость устранения шумов и выбросов в потоке данных. В настоящее время созданы фундаментальные основы применения математического аппарата вейвлет анализа для решения теоретической задачи определения линии тренда, очистки информационного потока от шумов и выбросов [32, 72, 135, 224]. Адаптация данных алгоритмов для решения прикладных задач цифровой обработки параметров режимов электрических станций и электроэнергетических систем позволит заложить основу для дальнейшего развития технологии «цифровая подстанция». Как отмечено в работе [76] предприятия и компании-разработчики готовы к созданию на объектах электроэнергетики принципиально новых интеллектуальных и информационных систем, однако при этом очевидна «необходимость дальнейшего развития применяемых устройств, технологий и инновационных алгоритмов ...» [76, с. 61].

В настоящее время к развитию энергетических систем на базе концепции «умные сети» (Smart Grid) приступило подавляющее большинство индустриально развитых стран. Технология Smart Grid с 2017 года успешно внедрена в сетевых компаниях таких городов как Казань, Набережные Челны и Нижнекамск [78]. На указанных объектах в соответствии цифровым стандартом [67] осуществляется цифровая обработка и передача данных с использованием оптических каналов, систем Wi-Fi, GPRS/3G, что позволило внедрить более 50 сценариев и алгоритмов быстрого и безопасного восстановления схем электроснабжения после

возникновения аварийных режимов. Основные положения развития концепции Smart Grid в России и за рубежом, методы и механизмы практической реализации, а также оценку возможностей и перспектив внедрения данной концепции представили в своей монографии Б. Б. Кобец и И.О. Волкова [113]. Ведутся работы по расширению смысла концепции Smart Grid – многоуровневой интеллектуальной холонической системы [139].

В книге, посвященной исследованию развития электроэнергетических систем [154], профессор Н.И. Воропай и др. сотрудники ИСЭМ СО РАН отмечают, что для реализации концепции Smart Grid следует использовать системы широкомасштабного мониторинга режимов (Wide Area Monitoring Systems – WAMS) [154, с. 32]. В части развития интеллектуальных электроэнергетических систем необходимо предусмотреть оснащение оборудования станций и электрических сетей современными средствами мониторинга, диагностики и управления [154].

В рамках реализации стратегии развития цифровых подстанций в настоящее время ведутся разработки теории адаптивного структурного анализа электрических сигналов и методических основ внедрения ее методов в современные приложения интеллектуальной электроэнергетики [22].

Актуальность темы.

В последние десятилетия для анализа и описания динамики сложных нелинейных процессов в электроэнергетике все чаще находит 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 ЭЭС, разработке алгоритмов релейной защиты, диагностике электрооборудования, прогнозирования нагрузки, электрических измерениях и т.д. Вейвлет преобразование (ВП) в отличие от преобразования Фурье обеспечивает трёхмерную 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, 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 отгоранию 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. Одним из целевых индикаторов Государственной Программы Российской Федерации «Энергоэффективность и развитие энергетики» (в ред. Постановлении Правительства № 371 от 30.03.2018) является «сокращение к 2020 году потерь электроэнергии при передаче до 8,8 процента» [68]. Как показывают многочисленные исследования [34; 112, с.65] добавочные потери от высших гармоник в сетях при транспортировке электроэнергии превышают значение 15%. Разработка методики оценки потерь при несинусоидальных нестационарных режимах электроэнергетических систем позволит повысить достоверность технико-экономических проектов по внедрению фильтрокомпенсирующих устройств для подавления высших

гармоник и сокращения потерь в токоведущих частях в соответствии с задачами, обозначенными в [68]. В целом, при анализе ПКЭ в части несинусоидальности, из проведённых 172-х испытаний на предприятиях различной сферы (промышленность, ЖКХ, гражданские объекты) авторы [70, с. 62] приводят статистику, согласно которой в 7% случаев суммарный коэффициент гармонического искажения K_u не соответствует требованиям ГОСТ [65], а в 40% случаев несоответствие обнаружено в отношении отдельных коэффициентов n -ной гармонической составляющей $K_{u(n)}$. В результате проведённых инструментальных исследований в системах электроснабжения ПАО «Газпром» нарушение ПКЭ по коэффициенту $K_{u(n)}$ возникает в 40-60% случаев [87, с. 2].

Кроме того, анализ действующей нормативной документации по несинусоидальности напряжения (в РФ с 01.07.2014 действует ГОСТ 32144-2013; в странах ЕС – EN 50160:210; в США – IEEE 519) показывает неоднозначность подхода к нормированию отдельных гармонических составляющих, в том числе интергармоник. Так, для сетей 6–35 кВ российский стандарт предъявляет более высокие требования, чем стандарт США. В то же время нормирование интергармоник в России на данный момент не осуществляется.

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, может повлиять на распространение гармоник в распределительных сетях 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 $3i_0$ и напряжения $3u_0$ разработаны и функционируют устройства защиты, позволяющие определить отходящую линию, где произошло ОЗЗ. Математический аппарат вейвлет анализа представляет исследователю возможность выделять высокочастотные компоненты, возникающие при переходном процессе в результате ОЗЗ, используя их для синтеза устройств защиты и определения места замыкания. Как показали исследования спектральной плотности тока замыкания (В.А. Шунин 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. Решена задача

анализа показателей качества электроэнергии с применением непрерывного и дискретного вейвлет преобразования.

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

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 позволяют 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 позволяют 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 «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». 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.

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.

3. 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.

4. 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.

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

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

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

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

Связь темы диссертации с общенаучными (государственными) и отраслевыми программами. Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках выполнения государственного контракта № 14.B37.21.0332 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 настоящей диссертационной работы, 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.

Степень достоверности 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 конференции «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 SIGRE «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 (ICIEAM Челябинск 2016, Москва 2018).

По теме докторской диссертации под научным руководством соискателя защищена одна диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук:

Планков, А. А. Учет несинусоидальности напряжения при исследовании устойчивости узлов систем электроснабжения с асинхронной нагрузкой: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Планков Александр Анатольевич. – Омск: Омский гос. техн. ун-т, 2013. – 125 с.

Публикации и личный вклад автора. Материал диссертации опубликован в 61 научном труде (включая 29 публикаций 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.

1 ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ВЕЙВЛЕТ АНАЛИЗА

1.1 Обзор мирового опыта применения вейвлет преобразования для анализа режимов электроэнергетических систем

Впервые терминология «вейвлет преобразование» была введена в конце 80-х годов прошлого века Гроссманом (Grossman) и Морле (Morlet) для анализа сейсмологической обстановки. Фундаментальные положения математического аппарата вейвлет преобразования были сформулированы И. Мейером (Y. Meyer), И. Добеши (I. Daubechies), и С.А. Малла (S.A. Mallat). Тезисы о применимости метода вейвлет преобразования 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 напряжения, отклонения и несинусоидальности напряжения.

Общий обзор зарубежных работ, посвященных применению ВП в электроэнергетике и электротехнике, приводится в статье А. М. Мисриханова [144]. Автор приходит к выводу, что ВП «может быть применено во многих значимых областях электроэнергетики, включая релейную защиту, анализ качества электрической энергии, анализ переходных процессов, прогнозирование нагрузки, электроизмерения, интернет-коммерцию электроэнергии и др.» [144, с. 19].

Для развития интеллектуальных активно-адаптивных сетей необходимо построение современной цифровой энергетики, где весь спектр процессов (нормальные, аварийные, послеаварийные) оценивается в режиме реального

времени. Применение ВП для решения этого круга задач становится все более актуальным среди зарубежных ученых [280, 300, 333, 334, 335].

В работе [1] автор производит разработку алгоритмов идентификации искажений показателей качества электроэнергии (в соответствии с действовавшим на момент публикации работы ГОСТ 13109-97) в режиме реального времени с использованием непрерывного и дискретного ВП.

Для анализа данных автоматизированной системы коммерческого учета электроэнергии (АСКУЭ) и специализированных систем мониторинга ПКЭ при наличии пропусков в потоке информационных данных при сбое оборудования и помехах в каналах передачи информации в работе [29] предложено использовать непрерывное вейвлет преобразование. Автором [29] исследован случай сбоя фазы синусоиды по спектральной плотности вейвлет преобразования. Дальнейшее развитие работы [29] получила в качестве разработки программы для анализа ПКЭ в статье [30].

Применение дискретного ВП предложено в работе [49] для гармонического анализа сигналов тока (напряжения) и выявления других отклонений ПКЭ. Однако, авторы, сообщая о детализирующих вейвлет коэффициентах, способных идентифицировать, например колебания напряжения и другие ПКЭ, сообщают лишь об уровне вейвлет разложения. Считаем данный подход не верным, поскольку информация об уровне разложения совместно с начальной частотой дискретизации (в соответствии с теоремой Котельникова) может служить в качестве достоверных сведений. В настоящей диссертационной работе будет сделан акцент на выбор типа вейвлет функции и глубину разложения в соответствии с искомой частотной компонентой.

Опыт применения нейронных сетей совместно с предварительной процедурой частотной декомпозиции параметров режима электроэнергетических систем для исследования и классификации искажений ПКЭ представлен в работах [275, 299, 325, 326]. Применение методов нечёткой логики и ВП рассмотрено для анализа стационарных и нестационарных искажений ПКЭ в статье [311].

Для интеграции системы мониторинга ПКЭ в концепцию Smart Grid, «цифровая подстанция» возникают дополнительные задачи сжатия данных при передаче на общий информационный сервер. Опыт применения дискретного ВП для сжатия большого объема измеренных значений ПКЭ с возможностью дальнейшего восстановления информации без потерь представлен в работе [284]. Задача «очистки» полезного сигнала от искажений, вносимых средствами измерений и устройствами передачи данных, также успешно решается с помощью аппарата ВП [270, 349].

Одним из главных отличий ВП от преобразования Фурье является возможность локализации кратковременных (импульсных) искажений или изменений исследуемого сигнала. В результате, за последнее десятилетие появилось большое количество научных работ, направленных на исследование искажений напряжения электроэнергетических систем с применением ВП. В работе [257] предложены методы и алгоритмы идентификации кратковременных (до 1 минуты) провалов напряжения, повторяющихся провалов напряжения малой длительности (т.н. просечки напряжения, вызванные коммутацией устройств силовой электроники) на основе ВП. Авторы [266, 321] предлагают использовать ВП для гармонического анализа формы кривой напряжения; идентификации перенапряжений, возникающих при коммутации ёмкостных элементов (БСК). Алгоритмы вейвлет преобразования хорошо зарекомендовали себя в задачах идентификации и анализа импульсных перенапряжений (внешние или внутренние перенапряжения), представляющие собой всплеск напряжения с коротким передним фронтом и экспоненциальным или колебательным спадом. В работе [261] с помощью ВП анализируются провалы напряжения, в работе [310] колебания напряжения и фликер. Для решения всех перечисленных задач преобразование Фурье в чистом виде не применимо, поскольку для выявления локальных особенностей сигналов необходимо отказаться от интегрирования по всей временной области (или в рамках окна для оконного преобразования Фурье). Применение пакетного ВП для разделения исследуемого сигнала несинусоидального напряжения по гармоническим группам в соответствии с

требованиями стандарта [292] предложено в работах [247, 249, 250]. В частности, в статье [247] ВП использовано для анализа высокочастотных компонент в диапазоне свыше 2 кГц. Анализ осциллирующих искажений напряжения, возникающих при коммутации БСК с помощью ВП предложен в статье [290].

Общий обзор зарубежных работ, посвященных применению ВП для анализа ПКЭ приводится в работе [242].

Задачи адаптации алгоритмов дискретного и пакетного ВП для расчета интегральных характеристик параметров режимов электроэнергетических систем (действующих значений токов, напряжений, мощности) при нестационарных несинусоидальных режимах сформулированы и решены в работах [312 – 316] сотрудников Университета Дэлхаузи (Галифакс, Канада).

Совмещение алгоритмов вейвлет преобразования, а также моделей авторегрессии и проинтегрированного скользящего среднего, позволило в работе [59] создать модель прогнозирования сигналов с импульсными помехами в системах электроснабжения промысловых судов. Для обеспечения качества электроэнергии в судовых системах электроснабжения предложены модели фильтрокомпенсирующих устройств с идентификацией параметров в ортогональном вейвлет-базисе [60, 61]. Вейвлет преобразование успешно применено в работе [124] для анализа напряжения питающей сети промысловых судов и построения активных фильтров для повышения качества электроэнергии.

Применение вейвлет преобразования для анализа графиков резкопеременных электрических нагрузок приводится в работах [91 – 94], где с помощью интегрированного блока MATLAB Wavelet Toolbox производится выделение высокочастотных и низкочастотных компонент. Моделирование параметров режима дуговой сталеплавильной печи с применением вейвлет преобразования проведено в диссертации [110]. Идея анализировать графики нагрузок с применением ВП для прогнозирования нагрузки была опубликована в работе В. З. Манусова [137], где предполагается сопоставлять временнóй и частотный спектры графиков потребляемой мощности и температуры окружающей среды. Для анализа и прогнозирования электрических нагрузок

было применено вейвлет преобразование с помощью вейвлета Хаара [137, с. 213]. Применение вейвлета Хаара также было использовано для первичной обработки временных рядов энергопотребления и метеоданных при прогнозировании электрических нагрузок в трёх энергорайонах Кубанского РДУ [149]. Погрешности прогнозирования для энергорайонов по предложенной методике не превысили 5%, а для энергосистемы составили не более 3% [149, с. 43].

При анализе электромеханических переходных процессов электроэнергетических систем для настройки оптимальных коэффициентов настройки АРВ и АРЧВ, с целью обеспечения необходимых уровней запаса устойчивости, в работе [37] был разработан генетический алгоритм с применением вейвлет преобразования. В предлагаемом алгоритме [37, с. 12] аппарат вейвлет преобразования использовался для выделения шума регулятора. Для анализа асинхронного режима генератора вследствие нарушения динамической устойчивости и возможных качаний генератора в работе [252] предложено использовать вейвлет преобразование. В работе [235] производится сравнение трех методов (преобразование Фурье, оконное преобразование Фурье и вейвлет преобразование) для модели, реализующей защиту синхронного генератора от субсинхронного резонанса.

Методы искусственного интеллекта и вейвлет преобразование положены в основу предложенного в работе [238] алгоритма классификации видов замыканий в локальной изолированной электрической сети (Micro Grid). Авторы исследуют шесть различных типов вейвлет функций (Добеши, симлет, койфлет, биортогональный вейвлет и др.) для анализа симметричного (трехфазного) и несимметричных видов (двухфазного, двухфазного на землю, однофазного) коротких замыканий. Для идентификации анализа коротких замыканий в сетях высокого напряжения (138 кВ, 230 кВ) в работе [342] используется энергия спектра вейвлет коэффициента и искусственные нейронные сети. Методы, основанные на совместном использовании ВП и искусственного интеллекта, находят широкое применение для анализа искажений ПКЭ, кратковременных и нестационарных возмущений в электроэнергетических системах [274, 286, 303,

324]. Для анализа ПКЭ применяются метод, модифицированный на основе ВП – курвлет преобразование [259]. Имеется опыт совместного применения ВП и скрытой марковской модели для исследования параметров качества электроэнергии [323].

Оригинальная идея использования дискретного ВП для идентификации и анализа последовательных дуговых замыканий (искрения) для сетей низкого напряжения (220 В), питаемых бытовую нагрузку предложена в статье [268].

Идея использовать ВП в особых случаях возникновения ОЗЗ (в англ. терминологии *high impedance fault*) – когда замыкание происходит через большое сопротивление (касание провода асфальта, сухого песка, обледеневшей земли и т.д.), при которых возможен отказ защиты, изложена в работах [277, 278, 287, 289].

Широкое применение непрерывное ВП нашло при решении актуальной задачи определения расстояния до места, где возникло ОЗЗ (поиск места замыкания) [260, 283, 297, 322] и отходящей линии, где возникло замыкание [269].

В статье [244] предложена модификация волнового метода определения места повреждения в воздушной линии высокого напряжения (американский класс напряжения 161 кВ). В качестве основного элемента частотного анализа использован алгоритм вейвлет разложения при помощи материнского вейвлета Добеши.

В работах [307, 332] предложено интегрировать аппарат ВП в алгоритмы работы РЗА для защиты линий от коротких замыканий. В качестве исследуемого сигнала применяются коэффициенты вейвлет разложения.

Алгоритмы ВП находят применение в практических разработках по созданию динамических компенсаторов напряжения [337].

В статье [276] описано практическое внедрение метода вейвлет анализа для создания прототипа устройства для измерения показателей качества электроэнергии. ВП в разработанном устройстве выполняет основную функцию предварительной фильтрации электрических величин, подлежащих анализу на

соответствие показателям качества электроэнергии и дополнительную функцию – сжатие полученных данных.

Диагностика электрических двигателей по вейвлет коэффициентам токов статоров предложена в статье [213]. Авторы предложили методику, позволяющую определять повреждения роторных цепей по вейвлет коэффициентам статорных токов. В качестве материнского вейвлета в работе [213] был применен вейвлет Хаара, а диагностический признак основывался на изменении детализирующих коэффициентов, определяющих высокочастотную составляющую тока статора.

Для решения широкого круга теоретических и прикладных задач методы вейвлет преобразования были успешно интегрированы в популярные математические программы MATLAB (Simulink) [79], Mathcad [80] и др.

Таким образом, можно заключить, что относительно новый математический инструмент от момента первого применения в области электроэнергетики (1994 г.) менее чем за 30 лет получил широкое распространение практически во всех актуальных направлениях развития электрических станций и электроэнергетических систем. Вейвлет преобразование нашло применение для разработки методов диагностики электрооборудования, при исследовании установившихся и переходных процессов электроэнергетических систем, разработке систем релейной защиты и автоматики, для анализа качества электроэнергии и т.д. Вейвлет преобразование широко применяется как альтернатива преобразованию Фурье, поскольку имеет ряд преимуществ при анализе нестационарных (непериодических, случайных) процессов. Вейвлет преобразование становится основным инструментом для обработки потока цифровой информации, поступающей с объектов электрических станций и сетей при реализации технологий Smart Grid и «цифровая подстанция». Задача интеллектуальных сетей – автоматически реагировать на изменение параметров режима в энергосистеме для обеспечения бесперебойного обеспечения потребителя электроэнергией с максимальной энергетической эффективностью. Большинство событий в электроэнергетике носят случайных характер – изменение мощности и характера нагрузок, изменение конфигурации сети,

аварийный выход из строя элементов электрических станций или сетей, короткие замыкания, нарушения устойчивости, ухудшение показателей качества электроэнергии, внутренние и внешние перенапряжения и т.д. Вейвлет преобразование является трехмерной интерпретацией гармонического анализа и позволяет выявлять все вышеперечисленные особенности нестационарных режимов в электроэнергетике.

В рамках развития программы «Энерджинет», «Цифровая подстанция», а также обеспечения соответствия МЭК 61850, перед службами, эксплуатирующими основное оборудование электрических станций и сетей, ставится задача получения, обработки и передачи цифровых данных о параметрах режима и состоянии электрооборудования на общий сервер диспетчерского управления. Вейвлет преобразование позволяет производить сжатие цифровых данных для передачи по сетям и достаточно точную реконструкцию исходного сигнала.

Разработка моделей и методов цифровой обработки параметров нормальных, аварийных, послеаварийных режимов электроэнергетических систем на основе вейвлет преобразования соответствует плану мероприятий по внедрению инновационных технологий в топливно-энергетический комплекс (утвержден распоряжением Правительства Российской Федерации от 3 июня 2014 г. № 1217-р) [172].

1.2 Непрерывное и дискретное вейвлет преобразование

Идея применения методов гармонического (частотного) анализа для изучения, моделирования и анализа переходных процессов, перенапряжений (внутренних и внешних), колебаний и медленных изменений напряжения, несинусоидальных режимов и т.д. не является новой. Традиционно для решения подобных задач применяется преобразование Фурье [200, с.19]:

$$F(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) e^{-ix\omega} dx. \quad (1.1)$$

Одним из недостатков преобразования Фурье является так называемый «эффект растекания спектра», характерный при анализе нестационарных сигналов. Проиллюстрируем сказанное – на рисунке 1.1 представлен анализируемый сигнал тока, который можно описать системой уравнений:

$$i(t) = \begin{cases} I_{m1} \sin(2\pi ft + \varphi_1) & 0 \leq t < 0,18; \\ I_{m1} \sin(2\pi ft + \varphi_1) + I_{m3} \sin(6\pi ft + \varphi_3) + I_{m5} \sin(10\pi ft + \varphi_3) & 0,18 \leq t < 0,34; \\ I_{m1} \sin(2\pi ft + \varphi_1) + I_{m5} \sin(10\pi ft + \varphi_3) & 0,34 \leq t \leq 0,5, \end{cases} \quad (1.2)$$

где $I_{m1}=I_{m2}=I_{m3}=1$ А, $f=50$ Гц.

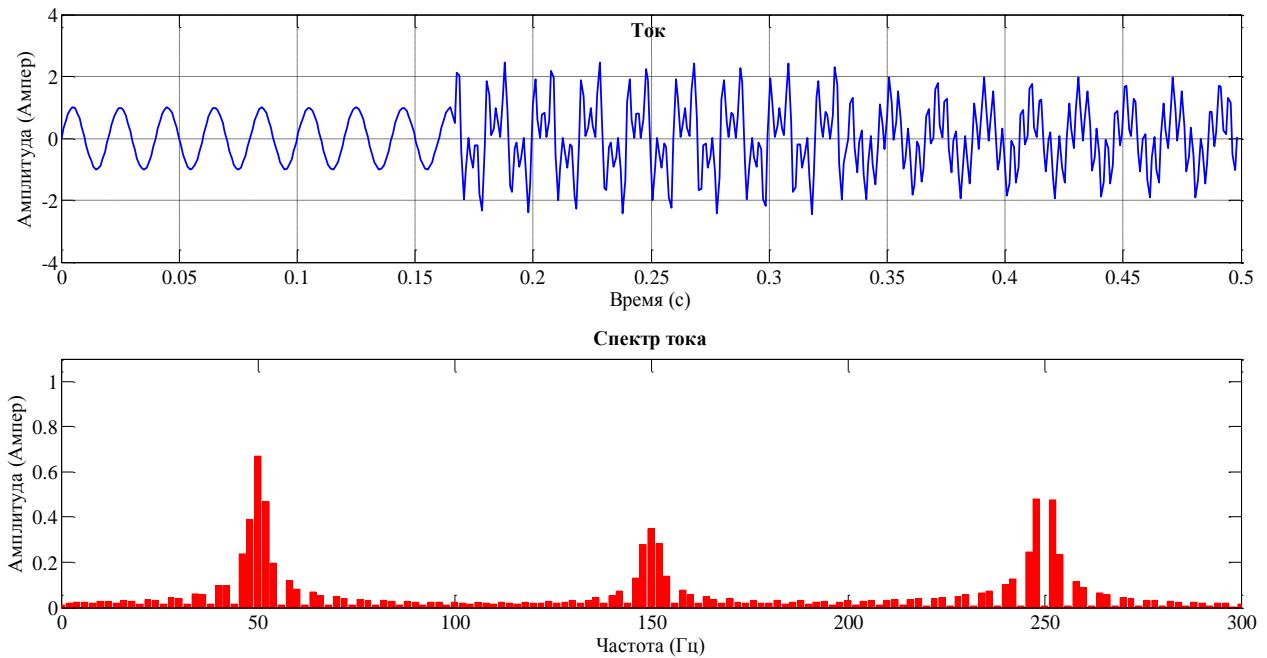


Рисунок 1.1 – Нестационарный несинусоидальный ток в узле нагрузки. Эффект растекания спектра при реализации преобразования Фурье

Если к исследуемому сигналу тока (выражение 1.2) применить преобразование Фурье (выражение 1.1) по всему отрезку времени, то в результате (рисунок 1.1) получаем информацию, что в сигнале действительно присутствуют частоты 50, 150 и 250 Гц. Однако при этом возникает погрешность в определении

амплитуд токов и теряется информация о времени (длительности) присутствия той или иной частотной компоненты в исследуемом сигнале тока.

Для устранения эффекта «растекания спектра» при анализе нестационарных несинусоидальных режимов электроэнергетических систем действующие нормативы [64] предполагают группирование гармоник по формуле:

$$Y_{g,h}^2 = \frac{1}{2} Y_{C,(Nh)-N/2}^2 + \sum_{k=(-N/2)+1}^{N/2-1} Y_{C,(Nh)+k}^2 + \frac{1}{2} Y_{C,(Nh)+N/2}^2, \quad (1.3)$$

где $Y_{C,(Nh)+N/2}$ – среднеквадратичное значение спектральной составляющей, соответствующей конкретной частотной позиции дискретного преобразования Фурье; $(Nh)+k$ – номер спектральной составляющей; $Y_{g,h}$ – результирующее среднеквадратичное значение гармонической группы.

Графически схему образования гармонических и интергармонических групп и подгрупп представляют рисунки (1.2, 1.3).

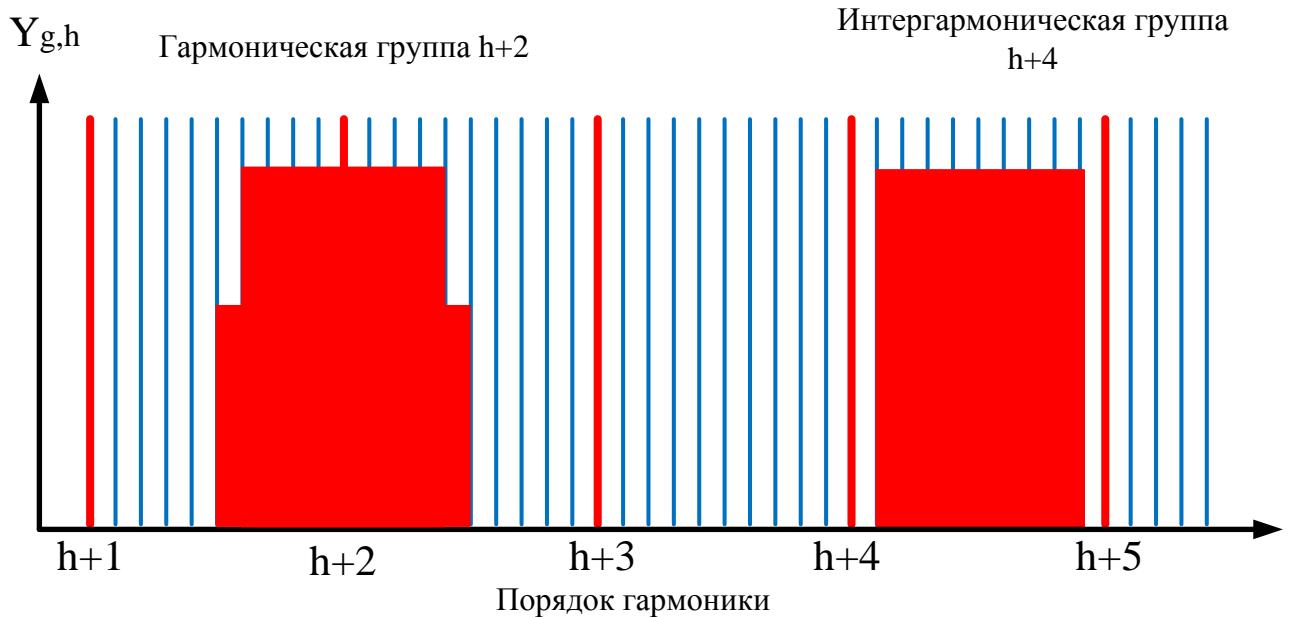


Рисунок 1.2 – Схема образования гармонических подгрупп и интергармонических групп для систем электроснабжения частотой 50 Гц (привод. по [64, с. 15])

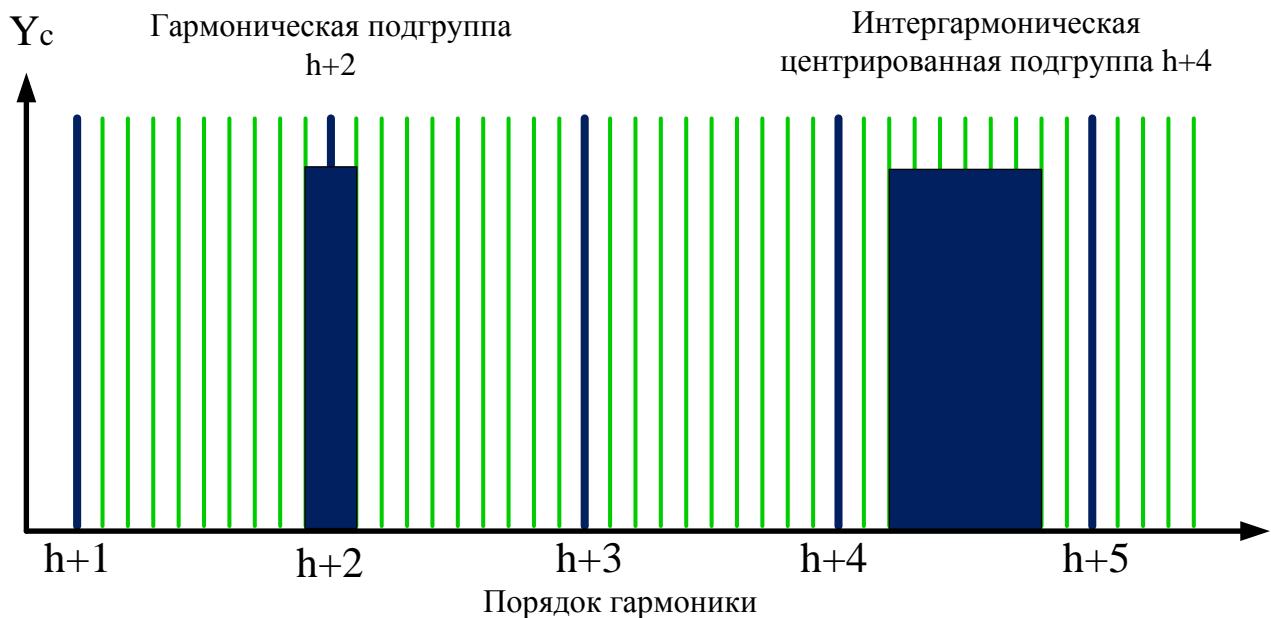


Рисунок 1.3 – Схема образования гармонических подгрупп и интергармонических центрированных подгрупп для систем электроснабжения частотой 50 Гц (привод. по 64, с. 17]

Преобразование Фурье является неэффективным инструментом для анализа интергармоник, как показателя качества электроэнергии. В настоящий момент, действующий в России стандарт в части интергармоник указывает: «Допустимые уровни интергармонических составляющих напряжения электропитания находятся на рассмотрении» [65, с. 9]. Связано это, прежде всего, с возникновением растекания спектра, если для идентификации интергармоник применять преобразование Фурье.

В качестве примера, представлена пара интергармоник 70 и 430 Гц (рисунок 1.4). Преобразование Фурье данного сигнала тока не позволяет четко определить наличие интергармоники 70 Гц (рисунок 1.5). Неэффективность применения преобразования Фурье в данном случае связана, прежде всего, с растеканием спектра и относительно небольшими значениями амплитуд интергармоник. Кроме того, действующий стандарт [63, с.7] для анализа интергармоник предписывает производить усреднение для интервалов длительностью 10 периодов. Налицо внутреннее противоречие существующих методов измерения и анализа. Усреднение результатов измерения показателей качества неизбежно приводит к растеканию спектра. Для минимизации этого негативного эффекта стандарт [64]

предписывает метод группирования гармоники и интергармоник (рисунки 1.2-1.3). Считаем, что это обстоятельство является сдерживающим фактором, не позволяющим ввести в России требования к нормированию интергармоник, как показателя качества электроэнергии в электрических сетях.

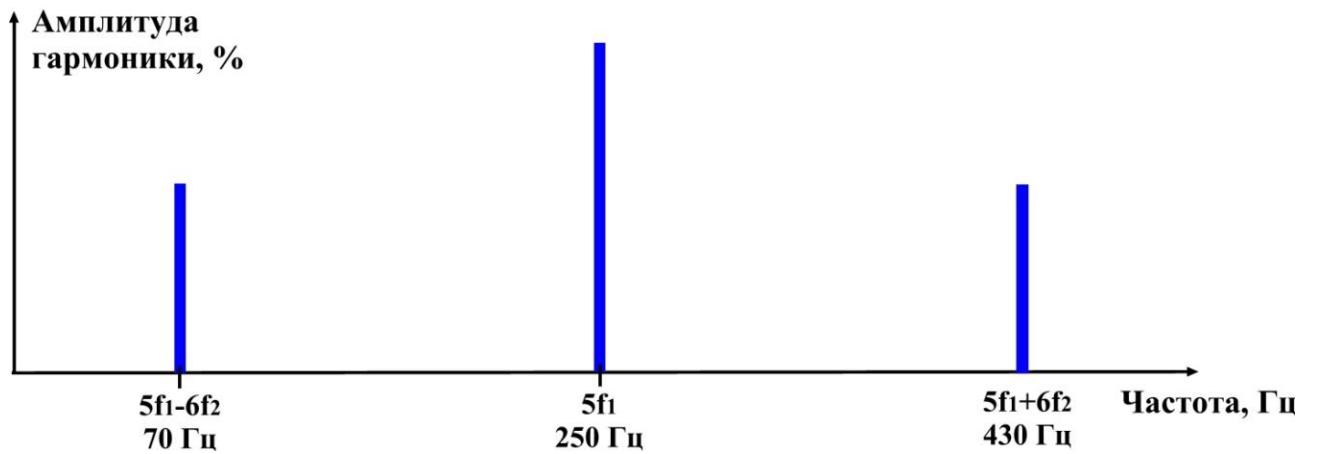


Рисунок 1.4 – Образование пары интергармоник

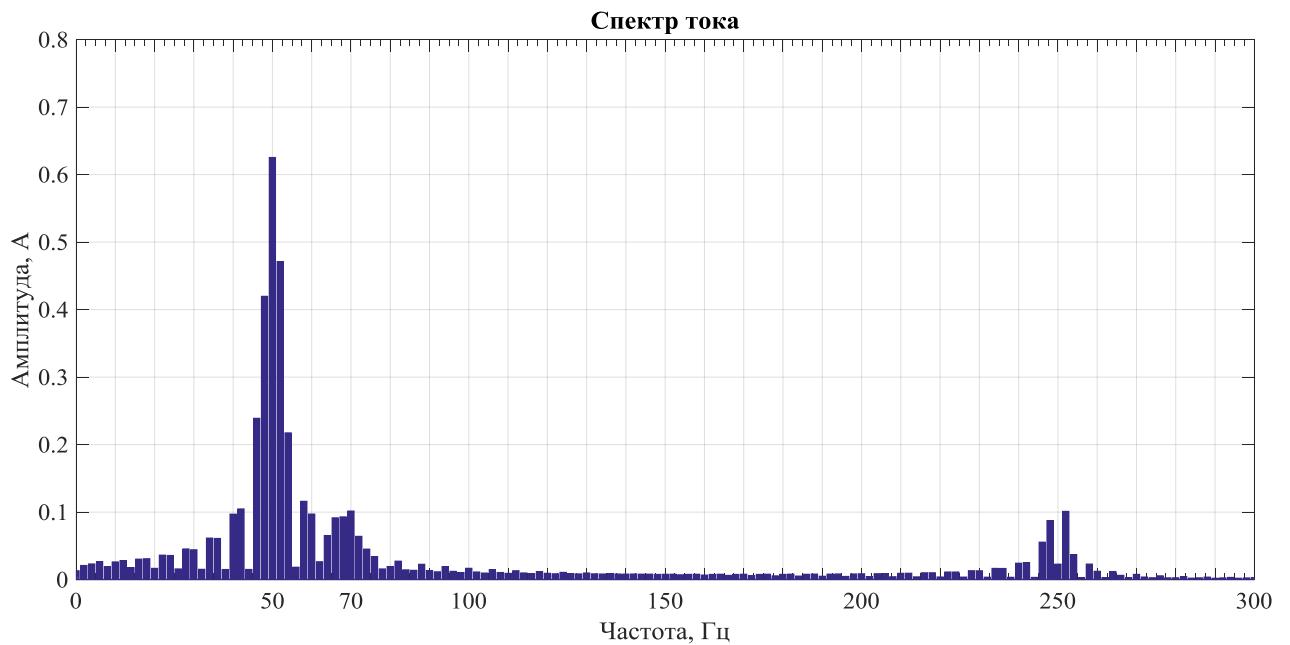


Рисунок 1.5 – Преобразование Фурье сигнала с интергармоникой 70 Гц

В странах Европейского Союза и в США уже действуют стандарты, в которых допустимые уровни интергармоник регламентированы.

Недостатки быстрого преобразования Фурье (БПФ) при измерении электрических сигналов подробно рассмотрены в работе [118]. Среди прочего

авторы отмечают не достаточный уровень расфильтровки измеряемого сигнала и сторонних воздействий, удовлетворительную точность измерения амплитуд гармоник (при несомненном преимуществе в скорости вычисления). Продолжаются дальнейшие исследования по разработке модифицированных методов на основе БПФ для повышения точности цифровой обработки сигналов. В работе [81] с целью повышения точности определения частоты для случаев, когда максимум БПФ не совпадает со спектром сигнала, предложен быстрый метод корреляционных функций.

Причиной возникновения эффекта растекания спектра является отсутствие локализации во времени функций синуса и косинуса, использующихся в рядах Фурье. Для улучшения локализации по времени применяется метод оконного преобразования Фурье [200, с. 28]:

$$F(f, x_0) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)g(x-x_0)e^{-ix\omega}dx. \quad (1.4)$$

Другими словами, исследуемый сигнал $f(x)$ умножается на локализованную функцию $g(x-x_0)$. В качестве оконных функций широко применяются функции Хэннинга, Блэкмена, Бохмана, Барлетта-Хэнна (рисунок 1.6) и др.

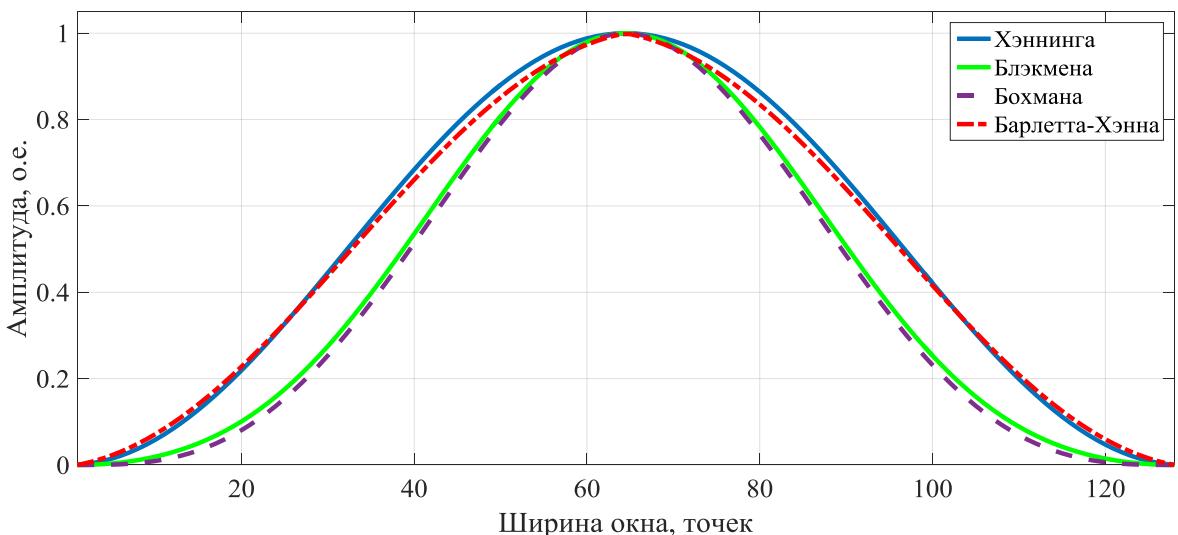


Рисунок 1.6 – Виды оконных функций, применяемых для оконного преобразования Фурье

Определяющую роль при реализации оконного преобразования Фурье играет задача выбора ширины окна. Для широкого окна достигается хорошее частотное разрешение, для узкого окна хорошее временнóе разрешение. Достичь одновременно высокого частотного временнóго разрешения не удаётся в силу принципа неопределённости Гейзенберга [80].

Рассмотрим следующий случай. В узле электрических нагрузок производится мониторинг показателей качества электроэнергии. Для оценки соответствия требованиям стандарта [65] производится анализ суммарного коэффициента гармонических искажений. В соответствии с требованиями [66] используются интервалы усреднения 10 минут. Предположим, что в момент времени $t=5$ секунд в узле изменяется характер электрических нагрузок – включается электроприёмник, являющийся источником третьей гармоники (выражение 1.5). На рисунке 1.7 представлена осциллограмма тока на интервале времени 10 периодов тока промышленной частоты ($4,9 \leq t \leq 5,1$ с.).

$$i(t) = \begin{cases} I_{m1} \sin(2\pi ft + \varphi_1) & 4,9 \leq t < 5; \\ I_{m1} \sin(2\pi ft + \varphi_1) + I_{m3} \sin(6\pi ft + \varphi_3) & 5 \leq t < 5,1. \end{cases} \quad (1.5)$$

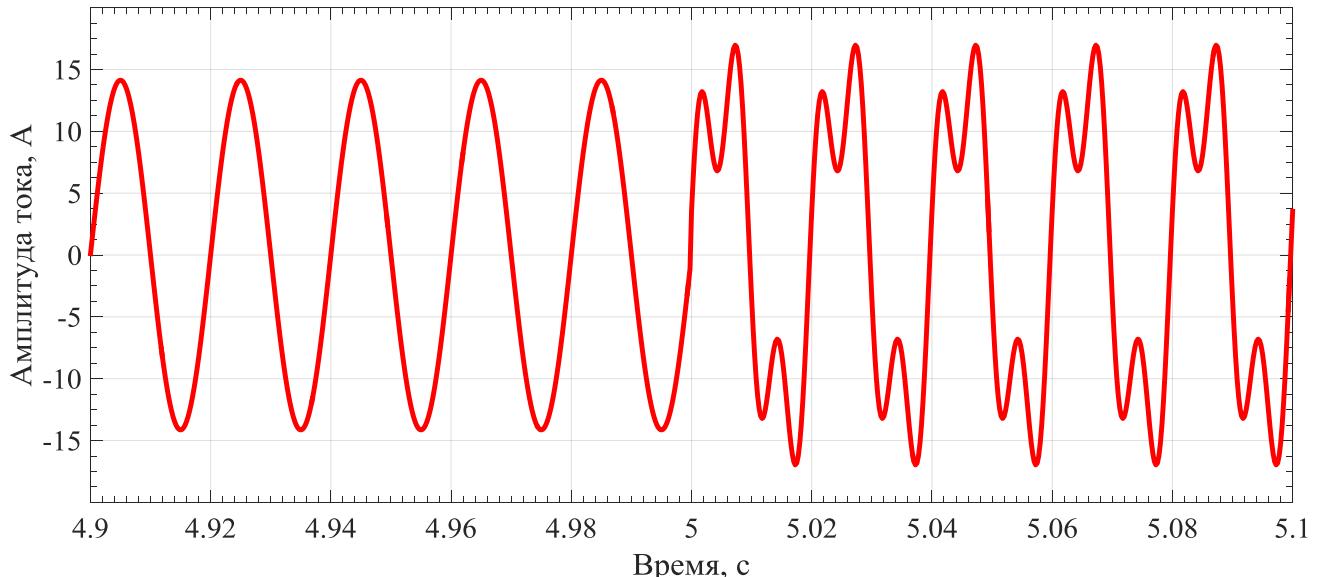


Рисунок 1.7 – Изменение функции тока при подключении нелинейной нагрузки

Проведём оконное преобразование Фурье с применением окна Хэннинга, приняв ширину окна 256 точек (рисунок 1.8). В результате преобразования

получаем информацию, что от начала измерений до момента времени $t=5$ секунд в сигнале тока присутствовала лишь основная гармоника (частота 50 Гц). В момент времени $t=5$ в спектре тока появляется третья гармоника (частота 150 Гц). В момент изменения режима наблюдается наложение спектров. Следует обратить внимание, что на рисунке 1.6 оба спектра представлены достаточно широкой линией – основная частота находится в диапазоне от 45 до 50 Гц, аналогично третья гармоника представлена сплошным спектром 145-155 Гц.

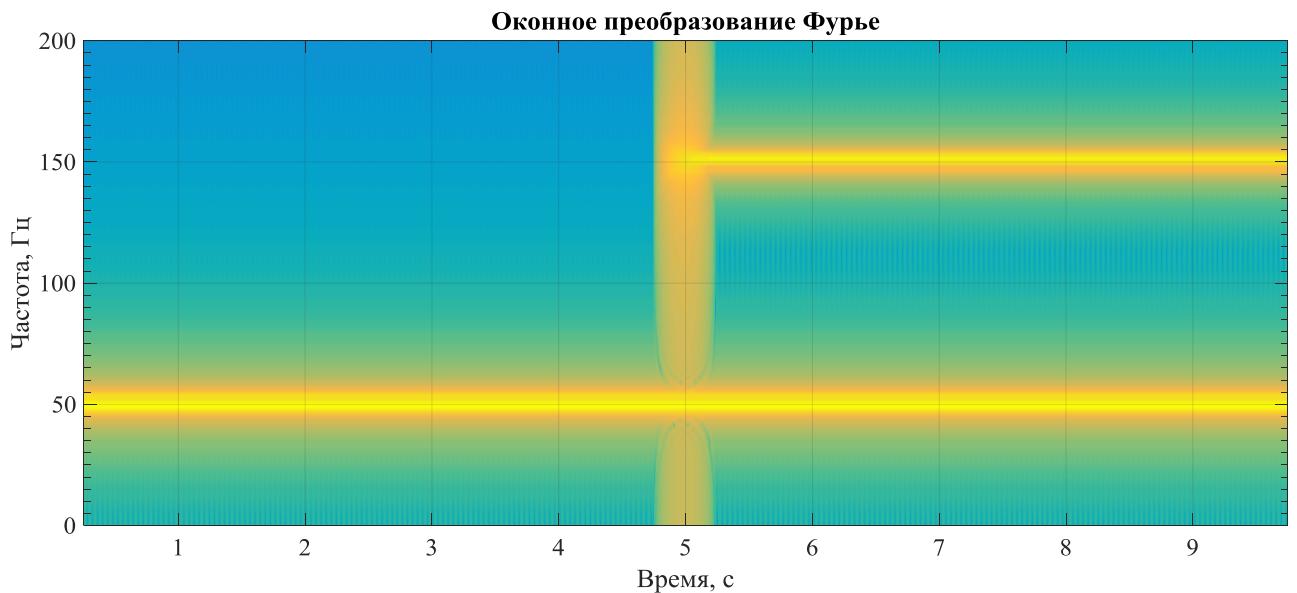


Рисунок 1.8 – Окноное преобразование Фурье (ширина окна Хеннинга – 256)

Для улучшения частотного разрешения увеличим ширину окна Хеннинга до 1024 точек (рисунок 1.9). В результате более точно определены частоты сигнала (50 и 150 Гц), однако нарушилась точность определения времени изменения режима.

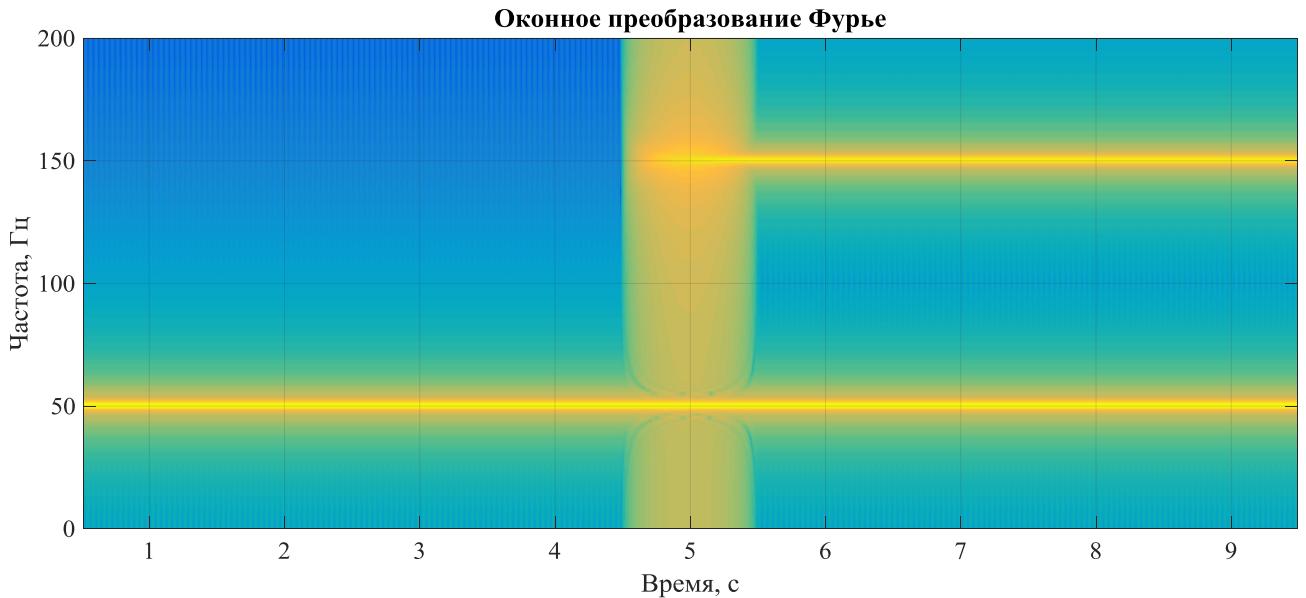


Рисунок 1.9 – Оконное преобразование Фурье (ширина окна Хеннинга – 1024)

При уменьшении ширины окна до 128 точек (рисунок 1.10) наблюдается прямо противоположный эффект – улучшение разрешения по времени с загрублением разрешения в частотной области. На рисунке 1.8 основная гармоника определена в интервале от 25 до 75 Гц.

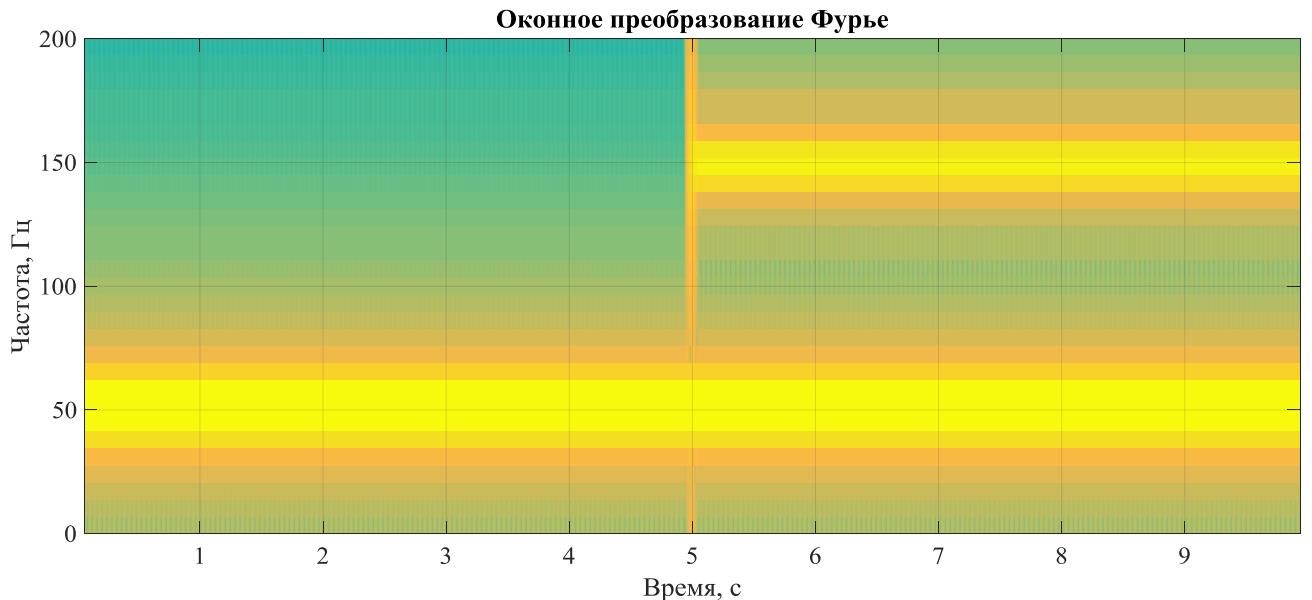


Рисунок 1.10 – Оконное преобразование Фурье (ширина окна Хеннинга – 128)

Тип окна может накладывать некоторые особенности на получаемый результат преобразования. На рисунке 1.11 представлено оконное преобразование Фурье с применением окна Блэкмена шириной 128 точек. Заметно различие с окном Хеннинга в плане растекания спектра.

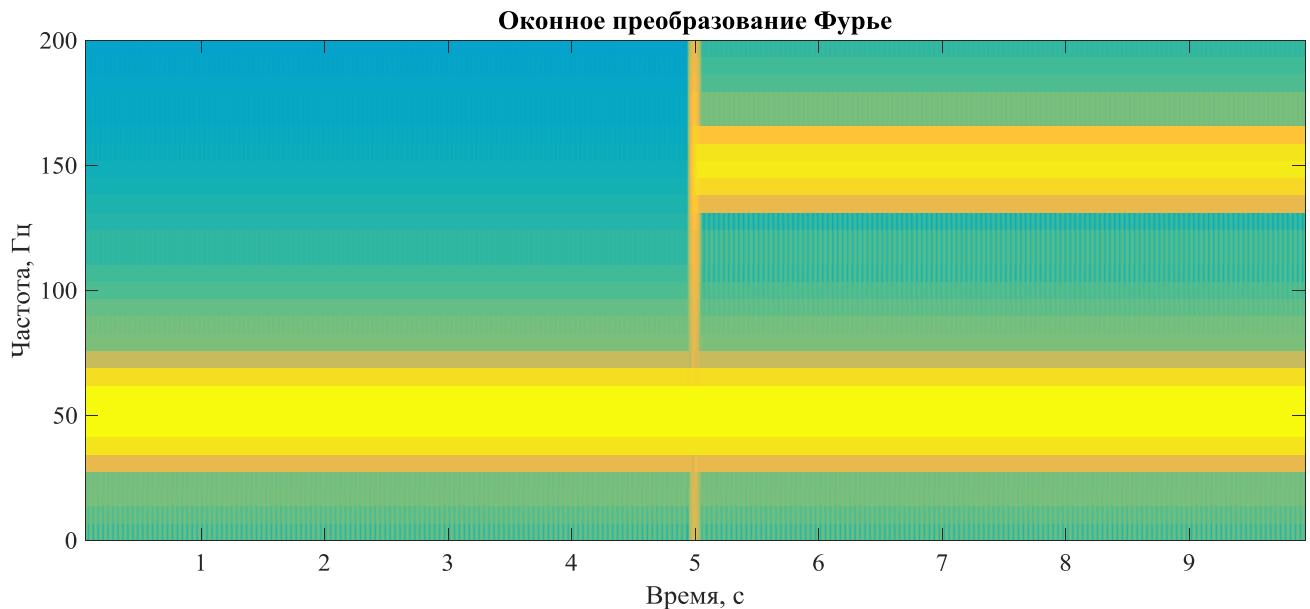


Рисунок 1.11 – Окноное преобразование Фурье (ширина окна Блэкмена – 128)

Одним из наиболее популярных у исследователей типов оконных функций для оконного преобразования Фурье (ОПФ) является Гауссовская функция. Такой вид ОПФ получил в зарубежной литературе собственное имя S-преобразование или преобразование Стоквелла (в англ. оригинале S-Transform). S-преобразование получило широкое применение [265, 309, 353] для анализа показателей качества электроэнергии (несинусоидальность, колебания напряжения, перенапряжения и др.). В работе [258] S-преобразование использовано совместно с методами нечеткой логики. В статье [341] предложено совместное использование алгоритмов преобразования Стоквелла и ВП для анализа показателей качества электроэнергии в электроэнергетических системах с нетрадиционными источниками (ветроэнергетические установки, гелиоэлектростанции и др.).

Представляет научный интерес модификация оконного преобразования Фурье, получившая название рекурсивное оконное преобразование Фурье (SWRDFT – англ. оригинал «the sliding window recursive discrete Fourier transform»). Названный метод в работе [285] использовался для определения частоты и амплитуды гармоник в сети 138 кВ.

В статье [288] для определения частотных составляющих тока на выходе промышленных частотных преобразователей и тока генератора при выпадении из синхронизма предложено использовать метод Прони, предполагающий

разделение одномерного сигнала тока в многомерный ряд. Авторы при оценке эффективности предложенного метода сравнивают гармонический состав полученных токов с результатами имитационного моделирования и результатами БПФ [228, с. 224]. Ведутся разработки моделей для анализа спектральных составляющих токов и напряжений методом корреляционных функций [183].

Для гармонического анализа крупных электроэнергетических систем (электрических сетей с большим количеством узлов) в статье [306] предлагается использовать метод диакоптики (метод Крона), подразумевающий разделение потока информации на три области: графы и матрицы, графы и уравнения, графы и диаграмма коммутаций. В результате разработанная методика позволяет проводить анализ ВГ в очень разветвленных электрических сетях – в качестве численного эксперимента авторы используют стандартную сеть IEEE состоящую из 118 шин [306, с. 680]. Однако, предложенный метод все же не позволяет получить информацию о времени появления в сети тех или иных гармонических или интергармонических составляющих.

Таким образом, на основании вышеизложенного можно заключить, что преобразование Фурье является неэффективным для гармонического анализа нестационарных сигналов. Возникающий эффект растекания спектра вносит погрешность при определении амплитуды гармонических составляющих, ухудшает локализацию частоты. Преобразование Фурье не позволяет достоверно определять время возникновения высокочастотных составляющих в сигналах токов и напряжений. Преобразование Фурье не позволяет идентифицировать наличие интергармоник в питающем напряжении. Является не эффективным инструментом для анализа кратковременных (импульсных) возмущений в электроэнергетических системах и сетях. Все вышеперечисленное не позволяет использовать преобразование Фурье для цифровой обработки параметров режимов электрических сетей в рамках стратегических инициатив развития цифровой и интеллектуальной электроэнергетики.

Преодолеть перечисленные недостатки преобразования Фурье и успешно решить поставленные задачи позволяет математический аппарат вейвлет преобразования.

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.

На рисунке 1.12 представлено непрерывное вейвлет преобразование осциллограммы тока (рисунок 1.7).

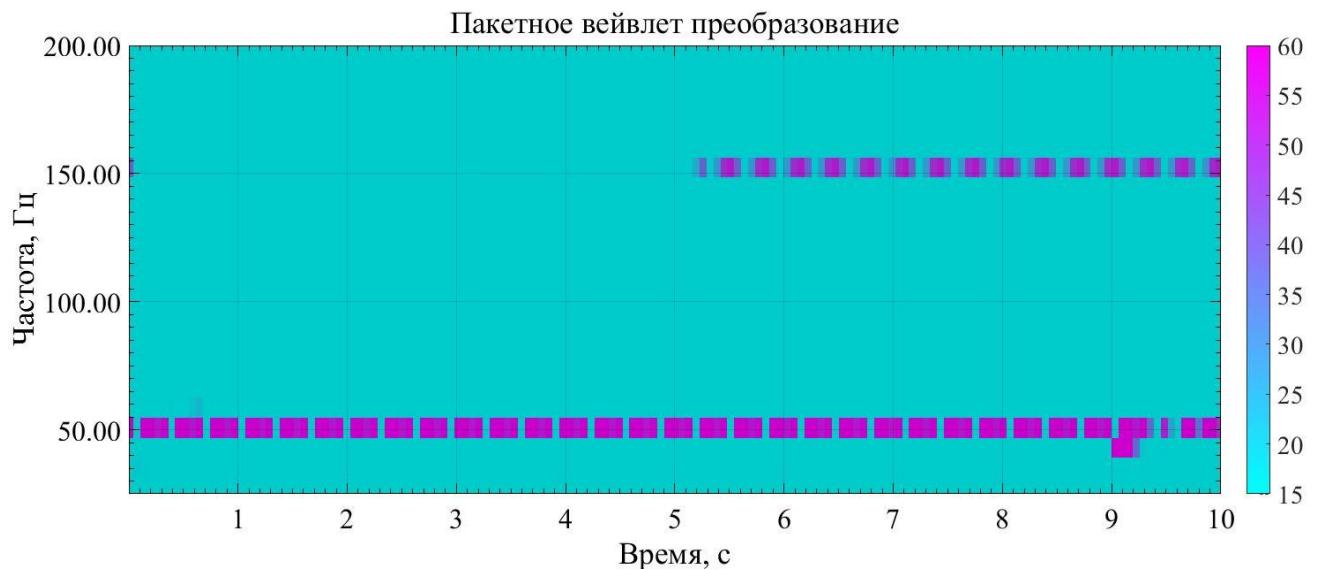


Рисунок 1.12 – Вейвлет преобразование исследуемого сигнала (вейвлет Добеши db24, уровень разложения – 6)

В научно-технической литературе принято различать непрерывное (1.6), дискретное (1.7) и пакетное ВП [200]:

$$\hat{F}(a, b) = |a|^{-1/2} \int f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (1.6)$$

$$\hat{F}_{m,n} = a_0^{-m/2} \int f(t) \psi\left(a_0^{-m}t - nb_0\right) dt. \quad (1.7)$$

где $\psi_{j,k}(t)$ – функция материнского вейвлета. Формула (1.7) получается из (1.6), если учесть, что a и b принимают только дискретные значения: $a = a_0^m$, $b = nb_0a_0^m$, а $m, n \in \mathbb{Z}$ [200].

Вейвлет преобразование для нестационарных режимов СЭС позволяет избежать эффекта растекания спектра (рисунок 1.1), что возможно при реализации преобразования Фурье при недостаточном внимании к выбору ширины окна (рисунок 1.12, 1.13).

Обратное непрерывное ВП (реконструкция) может быть выполнено по формуле [200, с.187]:

$$f(t) = C_{\psi}^{-1} \iint \hat{F}(a, b) \psi_{ab}(t) \frac{dadb}{a^2}. \quad (1.8)$$

Вейвлет преобразование позволяет получить трехмерную интерпретацию сигнала в осях амплитуда – частота – время (рисунок 1.13 – 1.14).

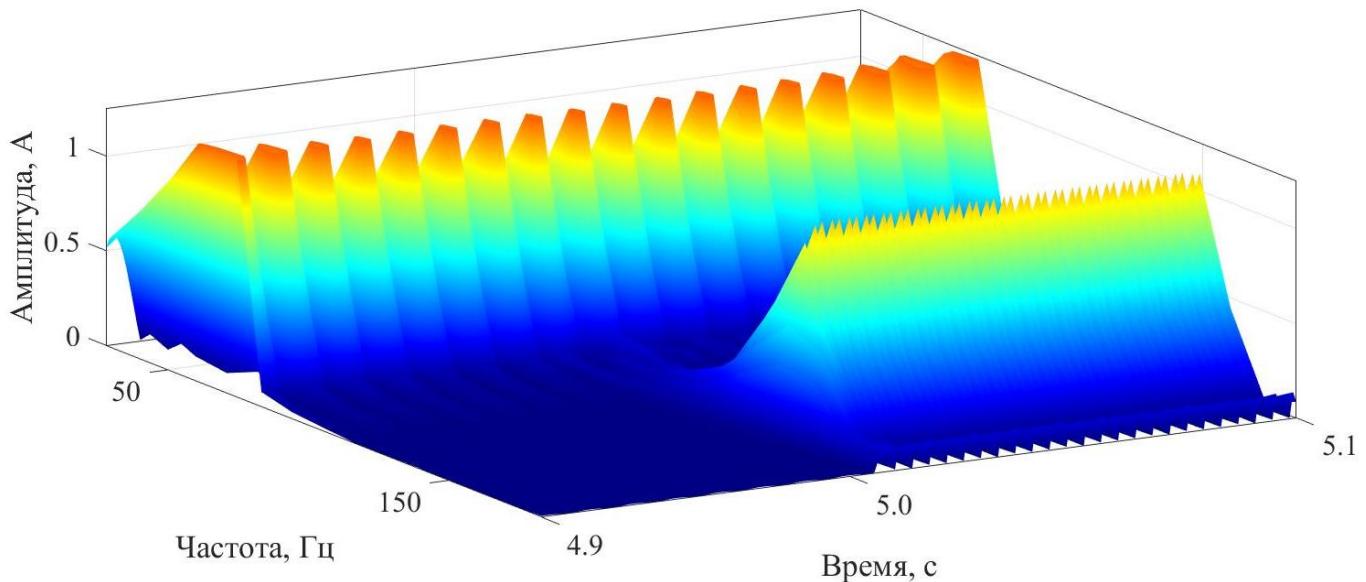


Рисунок 1.13 – Непрерывное вейвлет преобразование сигнала тока (уравнение 1.5)

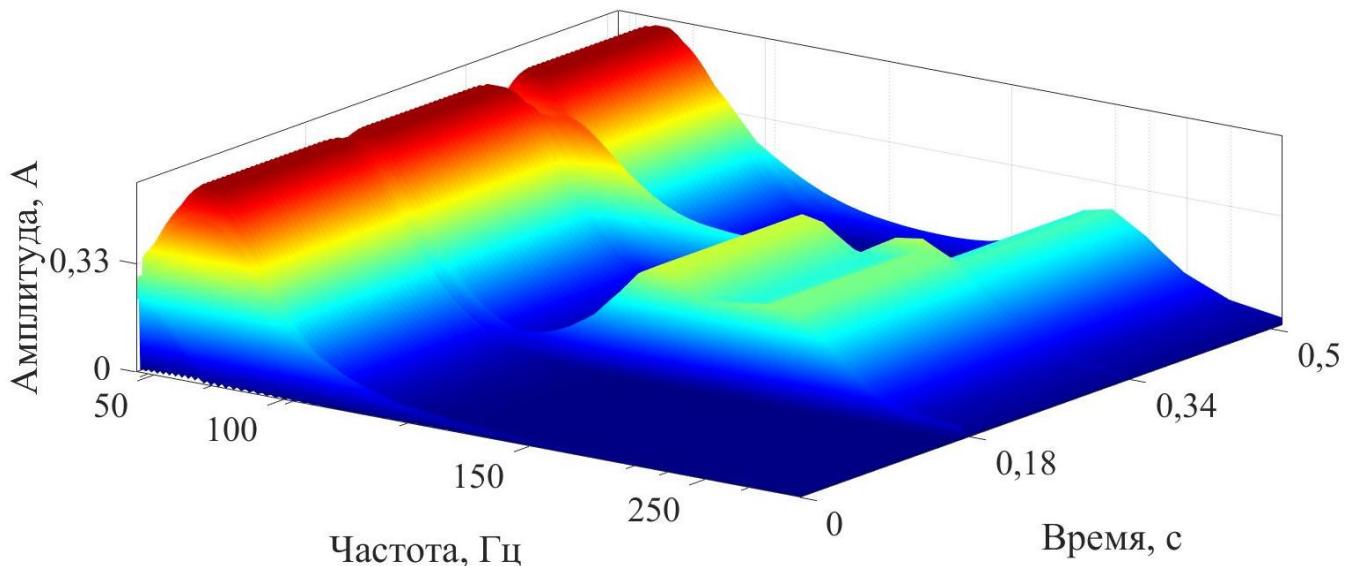


Рисунок 1.14 – Непрерывное вейвлет преобразование сигнала тока (уравнение 1.2)

В работе [75] авторы предлагают использовать непрерывное ВП для анализа показателей качества электроэнергии. Однако, необходимо заметить, что для решения ряда прикладных задач, в том числе для анализа несинусоидальных режимов СЭС непрерывное ВП, зачастую оказывается избыточным. Так, например, для расчета ВГ и коэффициента гармонических искажений (THD) в настоящей работе предлагается использовать дискретное ВП (рисунки 1.15–1.17).

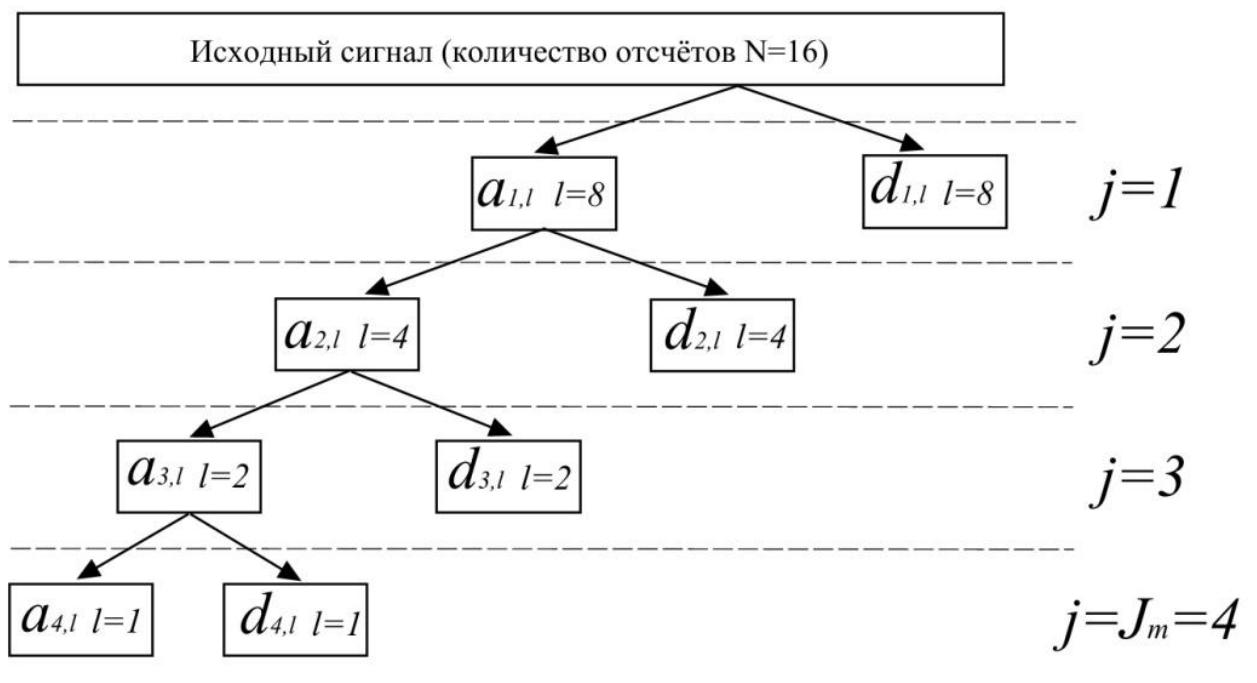


Рисунок 1.15 – Схема дискретного вейвлет преобразования

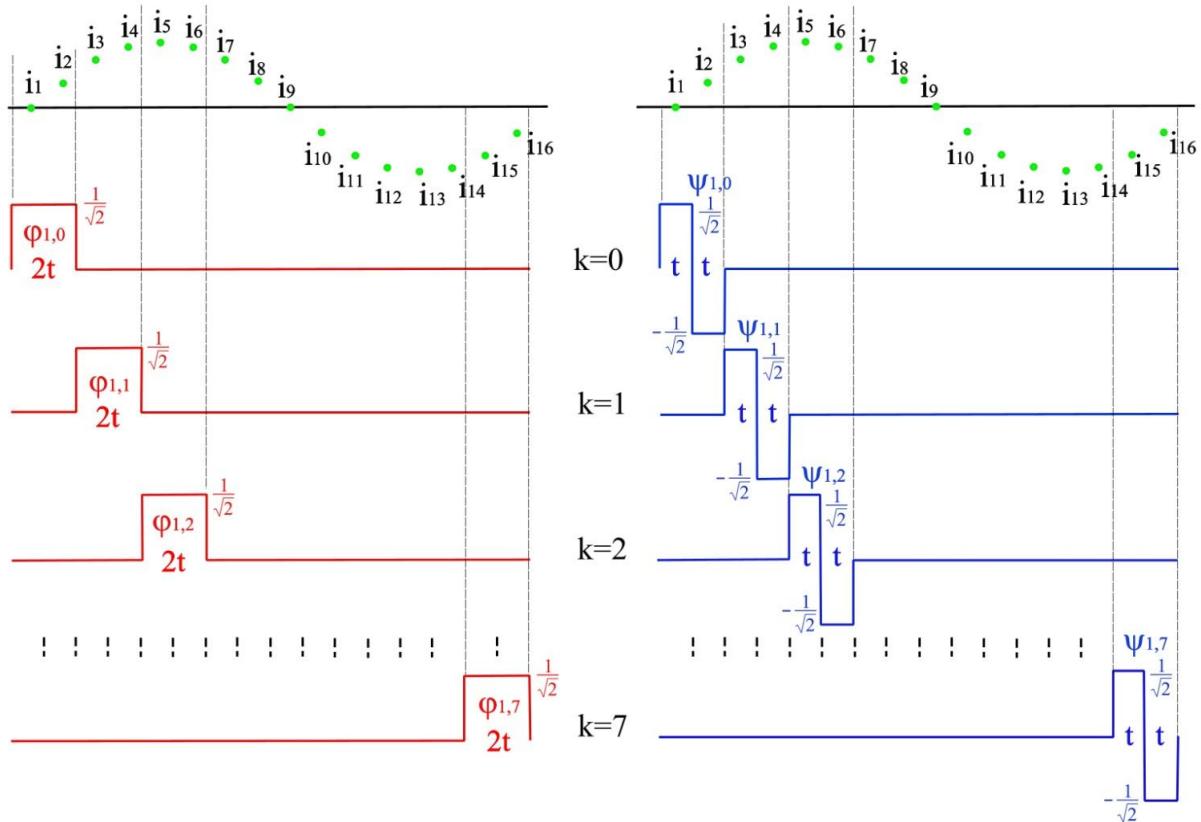


Рисунок 1.16 – Дискретное ВП вейвлетом Хаара на первом уровне разложения

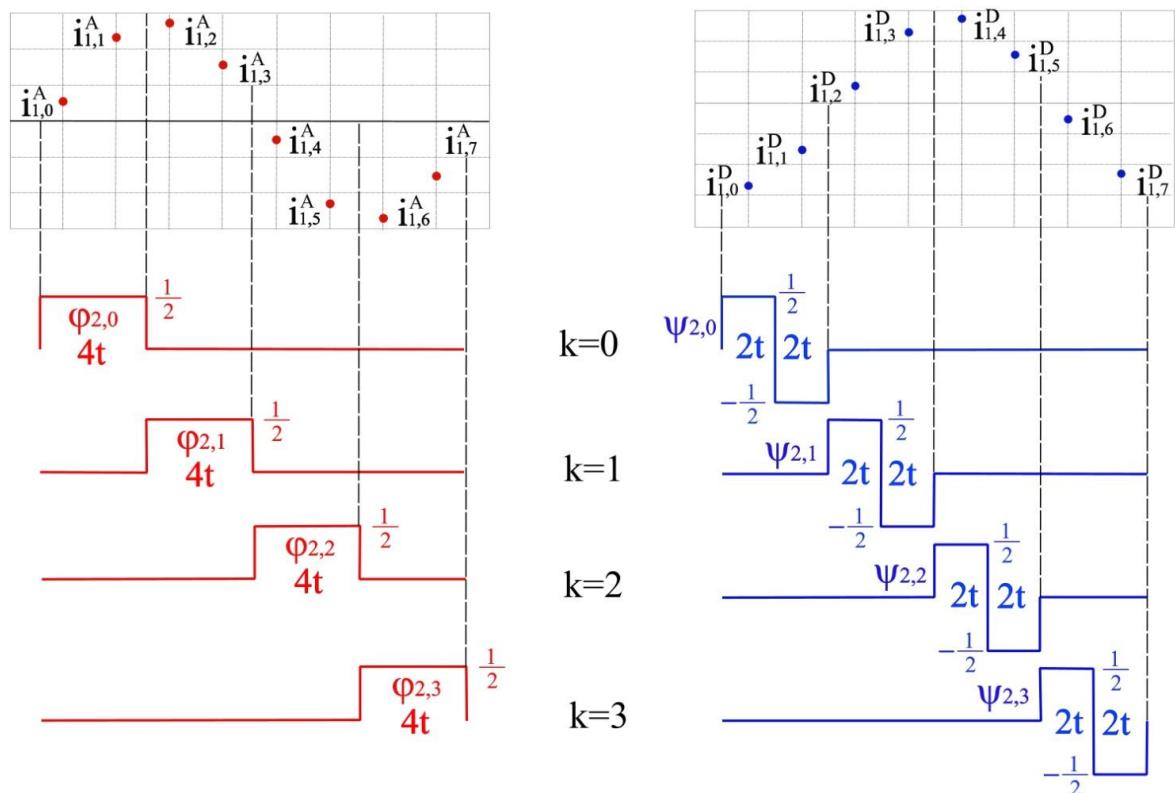


Рисунок 1.17 – Дискретное ВП вейвлетом Хаара на втором уровне разложения

Для дискретного ВП характерна «однобокая» схема, когда последующему разложению подвергаются только аппроксимирующие коэффициенты. При широком спектральном составе гармоник необходимо применение пакетного вейвлет преобразования (рисунок 1.18). В отличие от дискретного, пакетное ВП подразумевает последовательное разложение как аппроксимирующей, так и детализирующей ветви дерева.

Ветвь разложения $a_{i,j}$ принято называть «аппроксимирующими коэффициентами» (рисунок 1.13), 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.

Первый уровень дискретного ВП на основе простейшего вейвлета Хаара (рисунок 1.16) получается перемножением исходного дискретный сигнала тока с масштабирующей функцией $\varphi(t)$, сдвигаемой по оси времени, так чтобы $\varphi(t)$ полностью покрыла сигнал тока. В результате, получаем аппроксимирующие коэффициенты первого уровня разложения $i_{1,k}^A$. Аналогичным образом, производя, перемножение с вейвлетом Хаара $\psi(t)$, получаем детализирующие коэффициенты $i_{1,k}^D$. Для второго (рисунок 1.17) и последующего уровней разложения необходимо получить новое семейство отмасштабированных и сдвинутых функций $\varphi(t)$ и $\psi(t)$

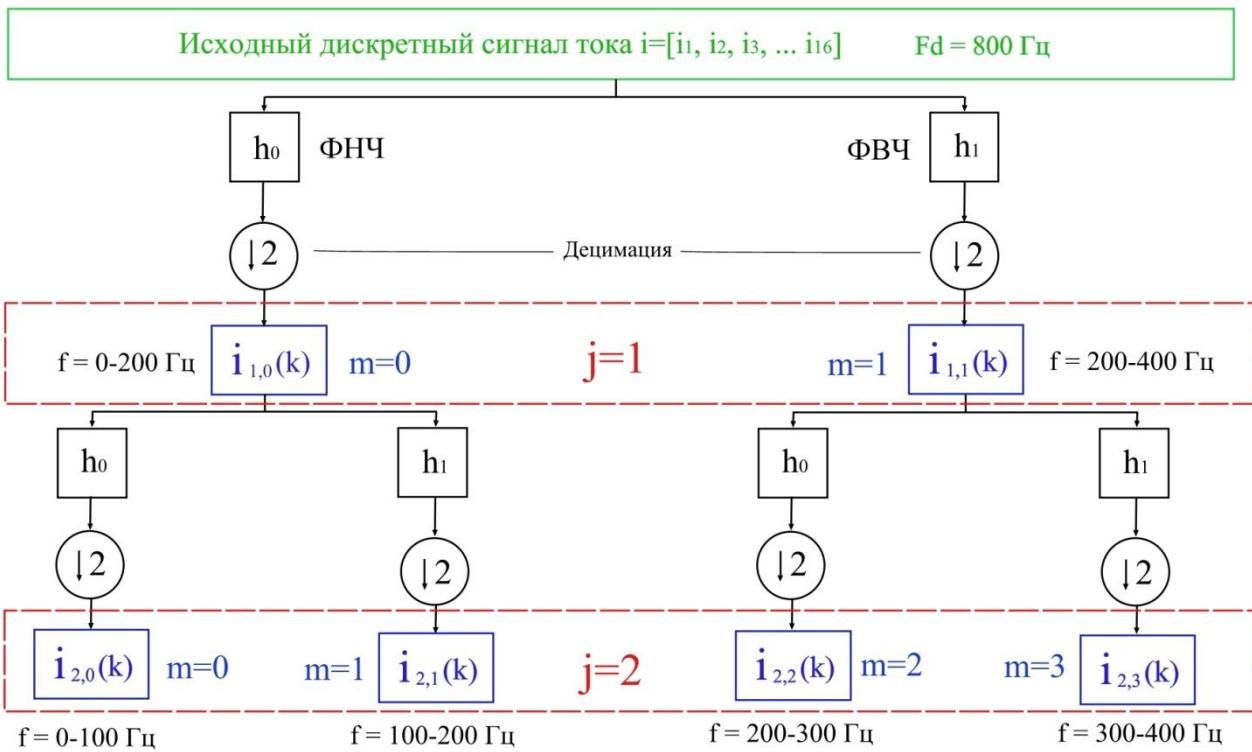


Рисунок 1.18 – Схема пакетного ВП при частоте дискретизации сигнала 800 Гц

В статье [344] приводится сравнение БПФ, оконного преобразования Фурье где в качестве окна выбрана функция Гаусса (S-преобразование) и так называемый метод обобщенного вейвлет преобразования (англ. оригинал «generalized empirical wavelet transform»), являющийся модификацией ВП. В работе приводится сравнение результатов обработки показателей качества электроэнергии тремя заявленными методами. Авторы отмечают положительный аспект применения ВП для анализа нестационарных сигналов, характеризующих ПКЭ [344, с. 108].

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

$$i(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} i_{j,k}^A \varphi_{j,k}(t) + \sum_{j=J}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} i_{j,k}^D \psi_{j,k}(t) . \quad (1.9)$$

Формула (1.9) отражает принцип формирования сигнала по отдельным вейвлет коэффициентам. На рисунке 1.19 представлена схема вейвлет разложения

исходного сигнала x до третьего уровня. В соответствии с формулой (1.9) сигнал x может быть представлен суммой аппроксимирующего s_3 и трех детализирующих коэффициентов (d_3, d_2, d_1).

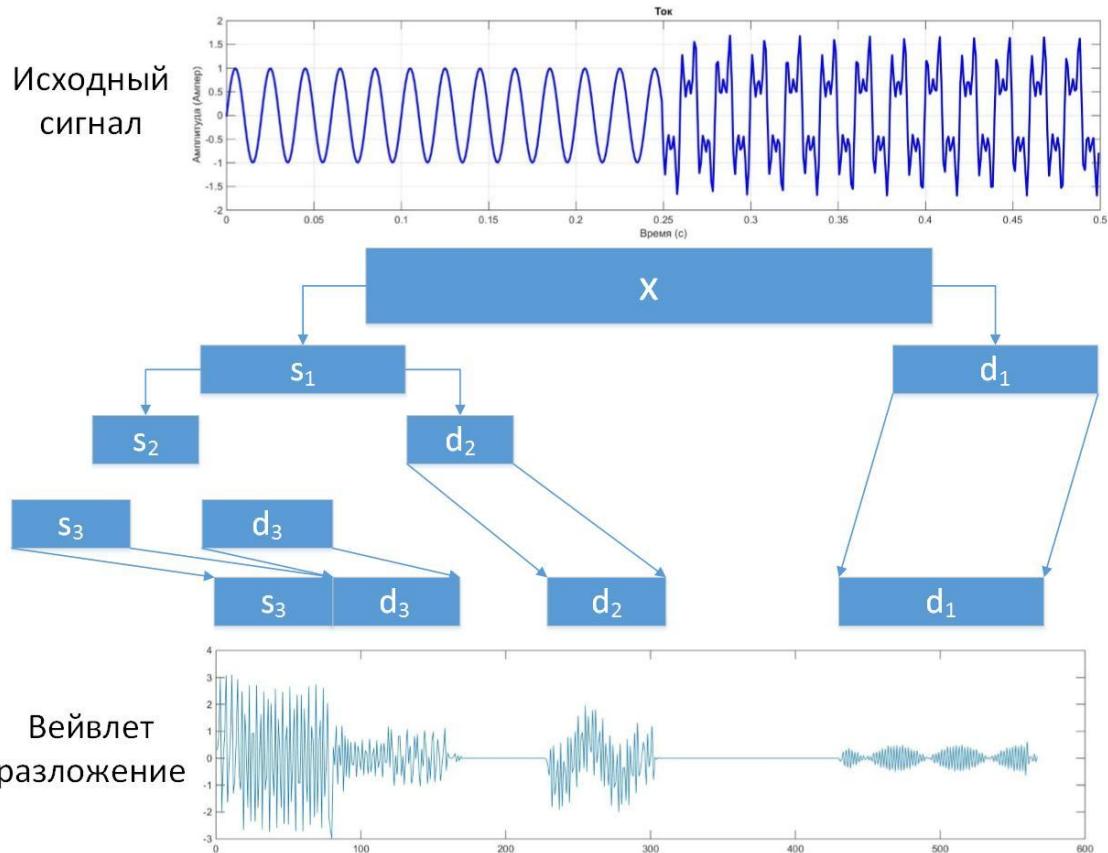


Рисунок 1.19 – Вейвлет коэффициенты третьего уровня разложения исходного сигнала

Максимально возможный уровень вейвлет разложения J_m определяется количеством отсчётов сигнала N :

$$J_m = \log_2 N. \quad (1.10)$$

Как показано на рисунке 3 каждый аппроксимирующий или детализирующий коэффициент определяет полосу частотного разрешения сигнала. Часто для решения практических задач необходимо определить вейвлет коэффициенты на уровнях разложения меньших, чем максимальный. Для решения таких задач в настоящей работе будем обозначать рассматриваемый (текущий) уровень вейвлет разложения как уровень j . Количество коэффициентов l на каждом j -м уровне разложения определяется по формуле:

$$l = 2^{J_m - j}. \quad (1.11)$$

В основе дискретного ВП лежит скалярное произведение. Скалярным произведением двух кусочно-непрерывных функций f и φ на отрезке $[a,b]$, при ($a < b$) называется интеграл [212, с. 93].

$$\langle f | \varphi \rangle = \int_a^b f(x) \varphi(x) dx. \quad (1.12)$$

Любая кусочно-непрерывная функция (или сигнал) $v(t)$ (рисунок 1.18) может быть представлена суммированием нескольких векторов $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ со скалярными коэффициентами $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$.

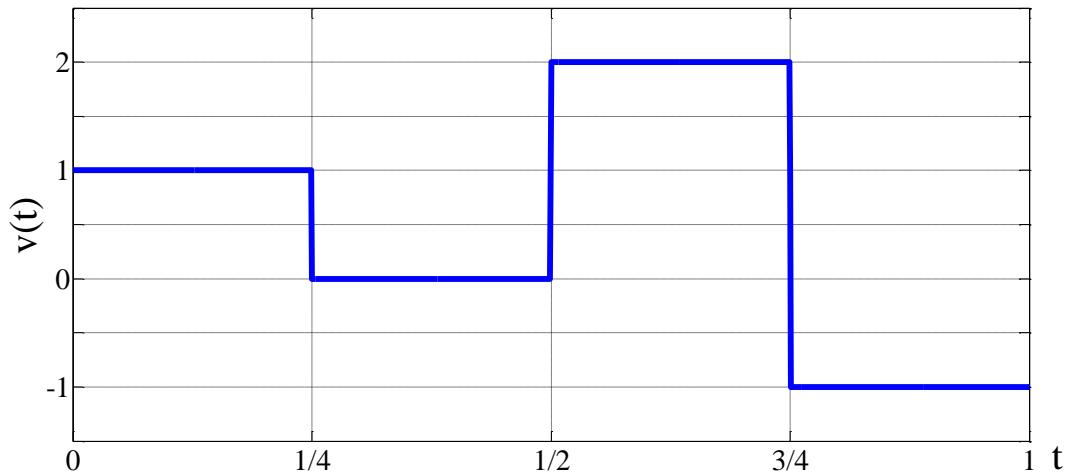


Рисунок 1.20 – Кусочно-непрерывная функция $v(t)$

Разложим функцию (сигнал) $v(t)$ в базисе векторов $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$, представленных на рисунке 1.21.

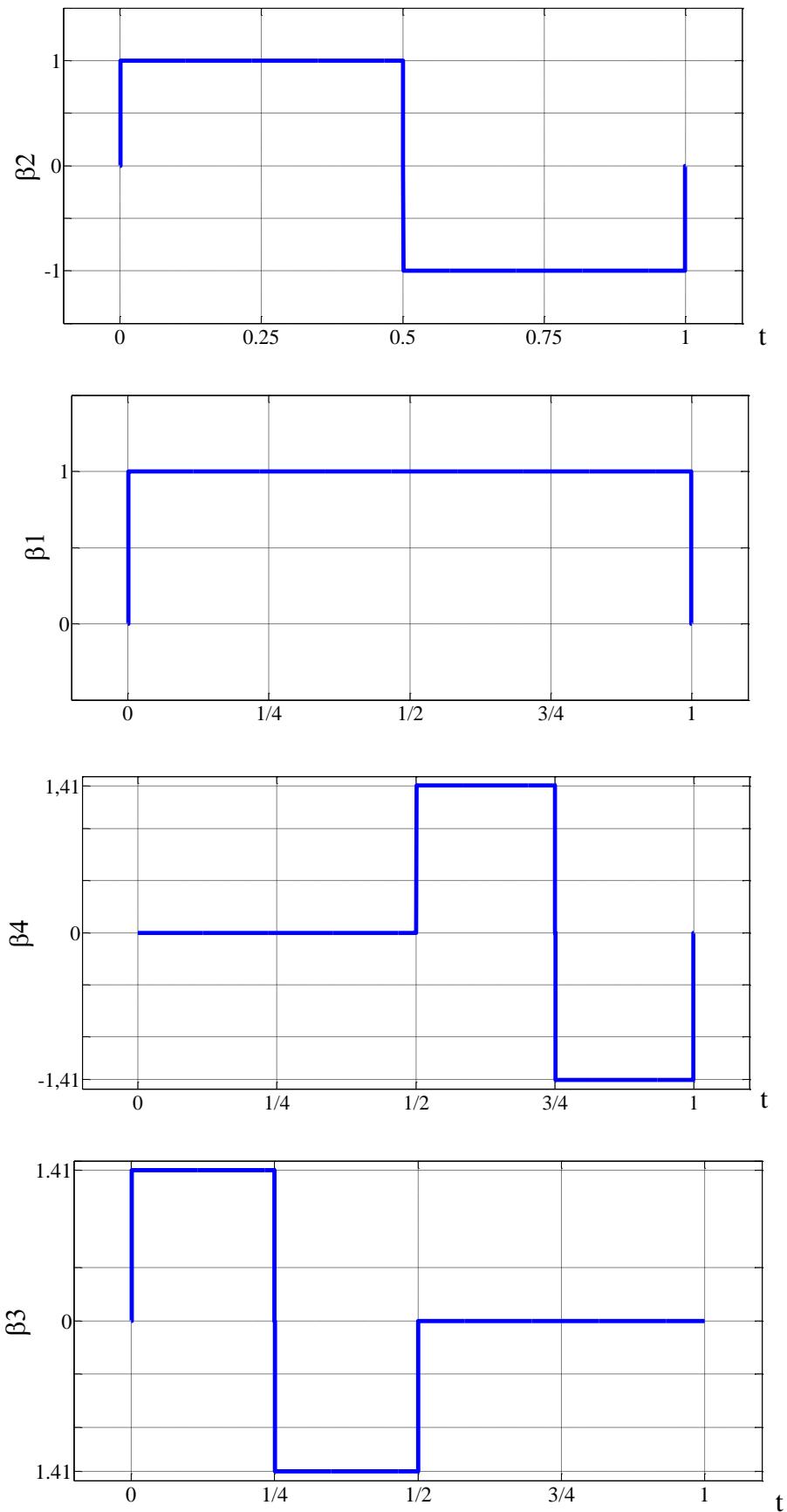


Рисунок 1.21 – Базисы $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$.

$$v(t) = \alpha_1 \cdot \beta_1(t) + \alpha_2 \cdot \beta_2(t) + \alpha_3 \cdot \beta_3(t) + \alpha_4 \cdot \beta_4(t) \quad (1.13)$$

Для нахождения неизвестных скалярных коэффициентов $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ необходимо составить четыре уравнения и найти скалярное произведение с каждым базисным вектором.

Коэффициент α_1 может быть определен из выражения:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= (v(e), \beta_1) = \int_0^1 v(t) \beta_1(t) dt = \int_0^{1/4} (1 \cdot 1) dt + \int_{1/4}^{1/2} (0 \cdot 1) dt + \int_{1/2}^{3/4} (2 \cdot 1) dt + \int_{3/4}^1 (-1 \cdot 1) dt = \\ &= \int_0^{1/4} dt + 2 \int_{1/2}^{3/4} dt - \int_{3/4}^1 dt = \frac{1}{4} - 0 + 2 \cdot \frac{3}{4} - 2 \cdot \frac{1}{2} - 1 + \frac{3}{4} = \frac{1}{2} \end{aligned} \quad (1.14)$$

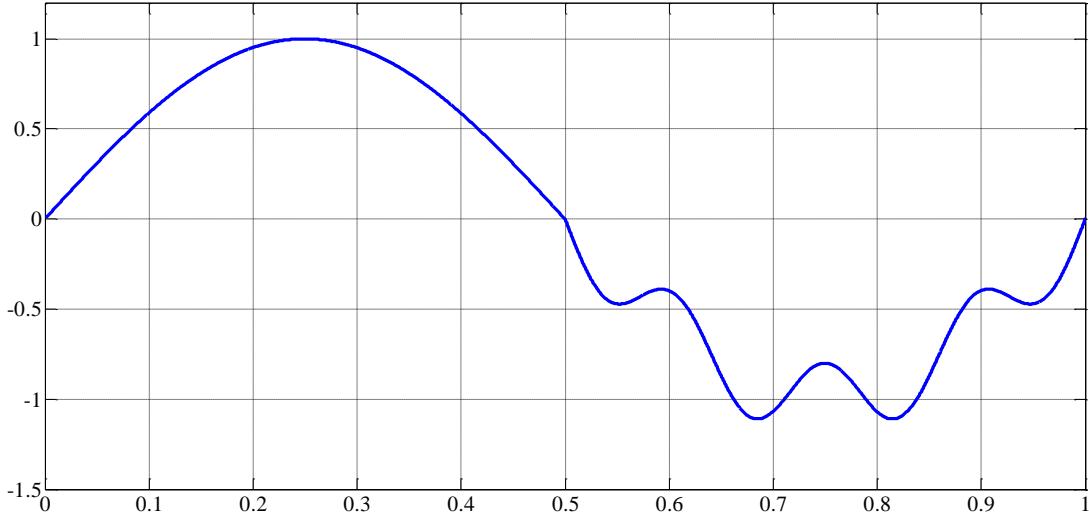
$$\alpha_3 = (v(e), \beta_3) = \int_0^1 v(t) \beta_3(t) dt = \int_0^{1/4} (1 \cdot \sqrt{2}) dt + \int_{1/4}^{1/2} (0 \cdot \sqrt{2}) dt + \int_{1/2}^{3/4} (2 \cdot 0) dt + \int_{3/4}^1 (-1 \cdot 0) dt = \sqrt{2} \int_0^{1/4} dt = \frac{\sqrt{2}}{4} \quad (1.15)$$

$$\begin{aligned} \alpha_4 &= (v(e), \beta_4) = \int_0^1 v(t) \beta_4(t) dt = \int_0^{1/4} (1 \cdot 0) dt + \int_{1/4}^{1/2} (0 \cdot 0) dt + \int_{1/2}^{3/4} (2 \cdot \sqrt{2}) dt + \int_{3/4}^1 (-1 \cdot (-\sqrt{2})) dt = \\ &= 2\sqrt{2} \int_{1/2}^{3/4} dt + \sqrt{2} \int_{3/4}^1 dt = \frac{6\sqrt{2}}{4} - \frac{2\sqrt{2}}{2} + \sqrt{2} - \frac{3\sqrt{2}}{4} = \frac{3\sqrt{2}}{4} \end{aligned} \quad (1.16)$$

Получаем функцию (сигнал) $v(t)$ в базисе векторов $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$.

$$[v]_{\beta} = \begin{bmatrix} 1/2 \\ 0 \\ \sqrt{2}/4 \\ 3\sqrt{2}/4 \end{bmatrix} \quad (1.17)$$

Правомерность выражения (1.9) проиллюстрируем на примере разложения функции $v=f(t)$, представленной на рисунке 1.22. В качестве материнского вейвлета применим простейший вейвлет Хаара.

Рисунок 1.22 – Функция напряжения $v=f(t)$

Определим аппроксимирующий коэффициент первого уровня разложения:

$$\begin{aligned}
 c_{00} &= \int_0^1 u(t)\varphi_{00}(t)dt = \int_0^1 u_1(t)\varphi_{00}(t)dt + \int_{1/2}^1 u_2(t)\varphi_{00}(t)dt = \int_0^1 \sin(2\pi t)dt + \frac{1}{5} \int_{1/2}^1 \sin(7 \cdot 2\pi t)dt = \\
 &= \frac{1}{2\pi} [-\cos(2\pi \cdot 1) + \cos(2\pi \cdot 0)] + \frac{1}{5 \cdot 7 \cdot 2\pi} \left[-\cos 7 \cdot (2\pi \cdot 1) + \cos 7 \cdot \left(\frac{2\pi}{2} \right) \right] = \\
 &= \frac{1}{2\pi} [\cos 0 - \cos 2\pi] + \frac{1}{70\pi} [\cos 7\pi - \cos 14\pi] = \frac{1}{2\pi} [1 - 1] + \frac{1}{70\pi} [\cos \pi - \cos 2\pi] = \\
 &= \frac{1}{70\pi} [-1 - 1] = -\frac{2}{70\pi} = -\frac{1}{35\pi} \approx -0,0091
 \end{aligned}$$

Детализирующий коэффициент первого уровня:

$$\begin{aligned}
d_{00} &= \int_0^1 u(t) \psi_{00}(t) dt = \int_0^1 u_1(t) \psi_{00}(t) dt + \int_{1/2}^1 u_2(t) \psi_{00}(t) dt = \\
&= \int_0^{1/2} [\sin(2\pi t) \cdot 1] dt + \int_0^{1/2} [\sin(2\pi t) \cdot (-1)] dt - \frac{1}{5} \int_{1/2}^1 [\sin(7 \cdot 2\pi t) \cdot (-1)] dt = \\
&= \int_0^{1/2} \sin(2\pi t) dt - \int_0^{1/2} \sin(2\pi t) dt - \frac{1}{5} \int_{1/2}^1 \sin(7 \cdot 2\pi t) dt = \\
&= \frac{1}{2\pi} \left[-\cos\left(\frac{2\pi}{2}\right) + \cos(2\pi \cdot 0) \right] - \frac{1}{2\pi} \left[-\cos(2\pi \cdot 1) + \cos\left(\frac{2\pi}{2}\right) \right] - \frac{1}{5 \cdot 7 \cdot 2\pi} \left[-\cos(7 \cdot 2\pi \cdot 1) + \cos\left(\frac{7 \cdot 2\pi}{2}\right) \right] = \\
&= \frac{1}{2\pi} [\cos 0 - \cos \pi] - \frac{1}{2\pi} [\cos \pi - \cos 2\pi] - \frac{1}{70\pi} [\cos 7\pi - \cos 14\pi] = \\
&= \frac{1}{2\pi} [1+1] - \frac{1}{2\pi} [-1-1] - \frac{1}{70\pi} [-1-1] = \\
&= \frac{2}{2\pi} + \frac{2}{2\pi} + \frac{2}{70\pi} = \frac{71}{35\pi} \approx 0,6457
\end{aligned}$$

Второй уровень разложения будет представлен коэффициентами c_{10} , c_{11} , d_{10} ,

d_{11} :

$$\begin{aligned}
c_{10} &= \int_0^{1/2} u(t) \varphi_{10}(t) dt = \int_0^{1/2} u_1(t) \varphi_{10}(t) dt = \int_0^{1/2} [\sin(2\pi t) \cdot \sqrt{2}] dt = \sqrt{2} \int_0^{1/2} \sin(2\pi t) dt = \\
&= \frac{\sqrt{2}}{2\pi} \left[-\cos\left(\frac{2\pi}{2}\right) + \cos(2\pi \cdot 0) \right] = \frac{\sqrt{2}}{2\pi} [\cos 0 - \cos \pi] = \frac{\sqrt{2}}{2\pi} [1 - (-1)] = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \approx 0.4502
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
c_{11} &= \int_{1/2}^1 u(t) \varphi_{11}(t) dt = \int_{1/2}^1 u_1(t) \varphi_{11}(t) dt + \int_{1/2}^1 u_2(t) \varphi_{11}(t) dt = \\
&= \int_{1/2}^1 [\sin(2\pi t) \cdot \sqrt{2}] dt + \frac{1}{5} \int_{1/2}^1 [\sin(7 \cdot 2\pi t) \cdot \sqrt{2}] dt = \\
&= \sqrt{2} \int_{1/2}^1 \sin(2\pi t) dt + \frac{\sqrt{2}}{5} \int_{1/2}^1 \sin(7 \cdot 2\pi t) dt = \\
&= \frac{\sqrt{2}}{2\pi} [-\cos(2\pi) + \cos \pi] + \frac{\sqrt{2}}{70\pi} \left[-\cos(7 \cdot 2\pi \cdot 1) + \cos\left(\frac{7 \cdot 2\pi}{2}\right) \right] = \\
&= \frac{\sqrt{2}}{2\pi} [\cos \pi - \cos 2\pi] + \frac{\sqrt{2}}{70\pi} [\cos \pi - \cos 2\pi] = -\frac{2\sqrt{2}}{2\pi} - \frac{2\sqrt{2}}{70\pi} = -\frac{72\sqrt{2}}{70\pi} \approx -0.4630
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
d_{10} &= \int_0^{1/2} u(t)\psi(t)dt = \int_0^{1/2} u_1(t)\psi(t)dt = \int_0^{1/4} [\sin(2\pi t) \cdot \sqrt{2}]dt + \int_{1/4}^{1/2} [\sin(2\pi t) \cdot (-\sqrt{2})]dt = \\
&= \frac{\sqrt{2}}{2\pi} \left[-\cos\left(\frac{2\pi}{4}\right) + \cos(2\pi \cdot 0) \right] - \frac{\sqrt{2}}{2\pi} \left[-\cos\left(\frac{2\pi}{2}\right) + \cos\left(2\pi \cdot \frac{1}{4}\right) \right] = \\
&= \frac{\sqrt{2}}{2\pi} \left[\cos 0 + \cos \frac{\pi}{2} \right] - \frac{\sqrt{2}}{2\pi} \left[\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) - \cos \pi \right] = \frac{\sqrt{2}}{2\pi} [1 - 0] - \frac{\sqrt{2}}{2\pi} [0 - (-1)] = \frac{\sqrt{2}}{2\pi} - \frac{\sqrt{2}}{2\pi} = 0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
d_{11} \int_{1/2}^1 u(t)\psi(t)dt &= \int_{1/2}^{3/4} \sqrt{2} [u_1(t) + u_2(t)]dt + \int_{1/2}^{3/4} (-\sqrt{2}) [u_1(t) + u_2(t)]dt = \\
&= \sqrt{2} \int_{1/2}^{3/4} u_1(t)dt + \sqrt{2} \int_{1/2}^{3/4} u_2(t)dt - \sqrt{2} \int_{3/4}^1 u_1(t)dt - \sqrt{2} \int_{3/4}^1 u_2(t)dt = \\
&= \frac{\sqrt{2}}{2\pi} \left[-\cos \frac{2\pi \cdot 3}{4} + \cos \frac{2\pi}{2} \right] + \frac{\sqrt{2}}{7 \cdot 5 \cdot 2\pi} \left[-\cos \frac{7 \cdot 2\pi \cdot 3}{4} + \cos \frac{7 \cdot 2\pi}{2} \right] - \\
&\quad - \frac{\sqrt{2}}{2\pi} \left[-\cos 2\pi \cdot 1 + \cos \frac{2\pi \cdot 3}{4} \right] - \frac{\sqrt{2}}{70\pi} \left[-\cos 7 \cdot 2\pi \cdot 1 + \cos \frac{7 \cdot 2\pi \cdot 3}{4} \right] = \\
&= \frac{\sqrt{2}}{2\pi} \left[\cos \pi - \cos \frac{3\pi}{2} \right] + \frac{\sqrt{2}}{70\pi} \left[\cos 7\pi - \cos \frac{7 \cdot 3\pi}{2} \right] - \\
&\quad - \frac{\sqrt{2}}{2\pi} \left[\cos \frac{3\pi}{2} - \cos 2\pi \right] - \frac{\sqrt{2}}{70\pi} \left[\cos \frac{7 \cdot 3\pi}{2} - \cos 7 \cdot 2\pi \right] = \\
&= \frac{\sqrt{2}}{2\pi} [-1 - 0] + \frac{\sqrt{2}}{70\pi} [-1 - 0] - \frac{\sqrt{2}}{2\pi} [0 - 1] - \frac{\sqrt{2}}{70\pi} [0 - 1] = -\frac{\sqrt{2}}{2\pi} - \frac{\sqrt{2}}{70\pi} + \frac{\sqrt{2}}{2\pi} + \frac{\sqrt{2}}{70\pi} = 0
\end{aligned}$$

Продолжая вычисления аналогичным образом на втором уровне разложения при $j=2$ получаем следующие коэффициенты:

$$c_{2k} = \begin{vmatrix} 0.3183 \\ 0.3183 \\ -0.3274 \\ -0.3274 \end{vmatrix} \quad d_{2k} = \begin{vmatrix} -0.1319 \\ 0.1318 \\ 0.1356 \\ 0.1356 \end{vmatrix} \quad (1.18)$$

При $j=3$

$$c_{3k} = \begin{vmatrix} 0.1318 \\ 0.3183 \\ 0.3183 \\ 0.1319 \\ -0.1356 \\ -0.3274 \\ -0.3274 \\ -0.1356 \end{vmatrix} \quad d_{3k} = \begin{vmatrix} -0.0633 \\ -0.0262 \\ 0.0262 \\ 0.0633 \\ 0.0176 \\ 0.0073 \\ -0.0073 \\ -0.0176 \end{vmatrix} \quad (1.19)$$

Аппроксимация функции напряжения $u = f(t)$ при уровне разложения вейвлетом Хаара $j=3$ может быть реализована следующим образом:

$$u_{haar} \cong c_{00}\phi_{00} + d_{00}\psi_{00} + d_{10}\psi_{10} + d_{11}\psi_{11} + d_{20}\psi_{20} + d_{21}\psi_{21} + d_{22}\psi_{22} + d_{23}\psi_{23} + d_{30}\psi_{30} + d_{31}\psi_{31} + d_{32}\psi_{32} + d_{33}\psi_{33} + d_{34}\psi_{34} + d_{35}\psi_{35} + d_{36}\psi_{36} + d_{37}\psi_{37} \quad (1.20)$$

Аппроксимирующая функция представлена на рисунке 1.23

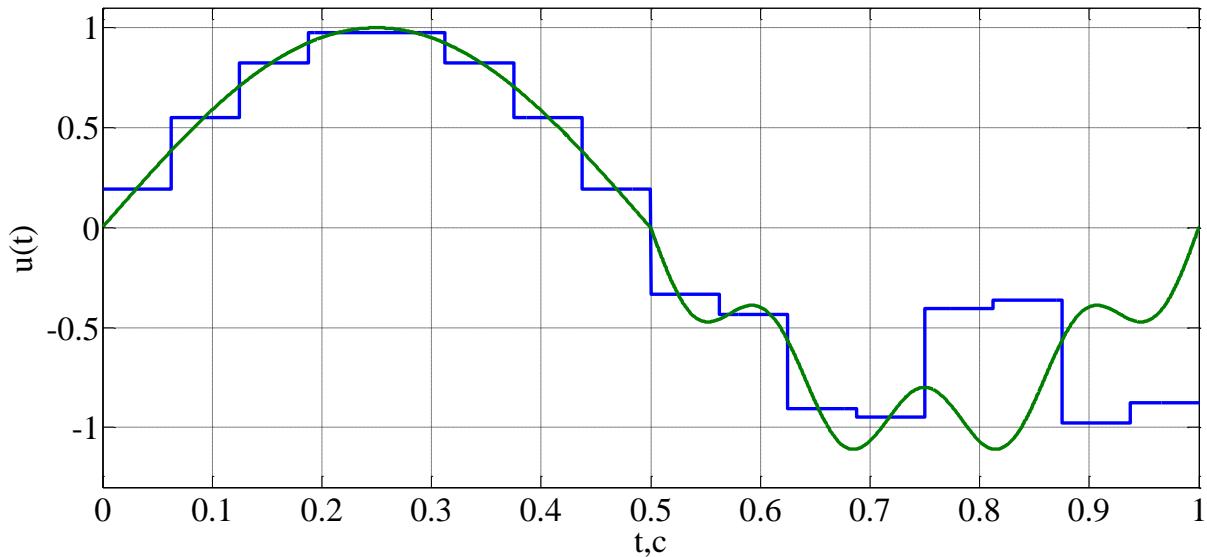


Рисунок 1.23 – Аппроксимация функции напряжения $u = f(t)$ вейвлетом Хаара

На основании вышеизложенного можно заключить.

1. Вейвлет преобразование может быть использовано для гармонического анализа электрических величин (токов, напряжений).
2. ВП позволяет получать информацию в трехмерном пространстве – амплитуда, частота, время. Данное обстоятельство качественно отличает ВП от

преобразования Фурье. При этом отсутствует необходимость подбора ширины окна, как в оконном преобразовании Фурье.

1.3 Кратномасштабный анализ электрических сигналов

Кратномасштабный (мультиразрешающий) анализ формулируется на основании трех положений [32, с. 142]:

1) последовательность $(V_j \mid j \in \mathbb{Z})$ замкнутых подпространств L^2 , которые упорядочены по включению:

$$\dots \subset V_2 \subset V_1 \subset V_0 \subset \dots \subset V_j \subset V_{j-1} \subset \dots L^2, \quad (1.21)$$

при выполнении следующих условий: [32, с. 143]:

$$\bigcap_j V_j = \{0\}. \quad (1.22)$$

$$\overline{\bigcup_j V_j} = L^2; \quad (1.23)$$

2) связь подпространств V_j друг с другом осуществляется в соответствии с жестким масштабирующим свойством:

$$V_{j+1} = D_2(V_j) \quad \forall j \in \mathbb{Z}; \quad (1.24)$$

3) существует такая масштабирующая функция, что её сдвиги $(\varphi(t-k) \mid k \in \mathbb{Z})$ образуют ортонормированный базис V_0 [32].

Ортонормированной называется система функций $\{\varphi_{0,n}(t)\}, n \in \mathbb{Z}$, удовлетворяющая условиям [51, с. 23]:

$$\langle \varphi_{0,n}, \varphi_{0,m} \rangle = \begin{cases} 1 & n = m; \\ 0 & n \neq m. \end{cases} \quad (1.25)$$

Для реализации кратномасштабного анализа как отмечено в [72], кроме условий (1.21-1.24) должно выполняться дополнительное требование – пространства V_j должны быть масштабированными версиями центрального пространства V_0 :

$$f \in V_j \Leftrightarrow f(2^i \cdot) \in V_0. \quad (1.26)$$

В качестве примера такого пространства автор приводит следующее [72, с. 187]:

$$V_j = \left\{ f \in L^2(\mathbb{R}); \forall k \in \mathbb{Z}: f|_{[2^j k, 2^j (k+1)]} = \text{const} \right\}. \quad (1.27)$$

Опыт применения кратномасштабного анализа на базе вейвлета Хаара представлен в работе [134]. Авторы в заключении особо отмечают, что «кратномасштабный анализ обеспечивает дешумизацию обрабатываемого процесса без предварительного его разделения на стационарные участки» [134, с. 143].

1.4 Алгоритмы разложения и реконструкции

Для успешной реконструкции (восстановления) сложного нестационарного сигнала, являющегося характеристикой режима электроэнергетической системы необходимо принимать во внимание связь между локальными изменениями сигнала и величинами вейвлет коэффициентов в данной локальной области. Характеристикой локальности вейвлета является угол влияния [119]. Угол влияния определяет подпространство вейвлет преобразования, которое необходимо учитывать для реализации алгоритма реконструкции. Так, например, если материнский вейвлет локализован в интервале ΔT для начального масштаба (уровня разложения), то набор вейвлет коэффициентов, определяющих спектр для исследуемого момента времени t' будут находиться в пространстве, ограниченном

конусом угла влияния. Угол влияния, в свою очередь, будет определяться двумя прямыми [119, с. 24]

$$s = \begin{cases} t - \frac{t' \Delta T}{2}; \\ t + \frac{t' \Delta T}{2}. \end{cases} \quad (1.28)$$

Диапазон, ограниченный углом влияния расширяется при увеличении масштаба s . Если исследуемый сигнал параметра режима электроэнергетической системы (тока, напряжения, мгновенной мощности и т.д.) содержит сингулярность, то в её окрестности значения вейвлет коэффициентов возрастают. Если при вейвлет преобразовании при расчете отдельных коэффициентах были допущены ошибки, то они окажут влияние на восстанавливаемый сигнал только вблизи возмущения. В свою очередь преобразование Фурье распространит ошибки вдоль всего реконструируемого сигнала.

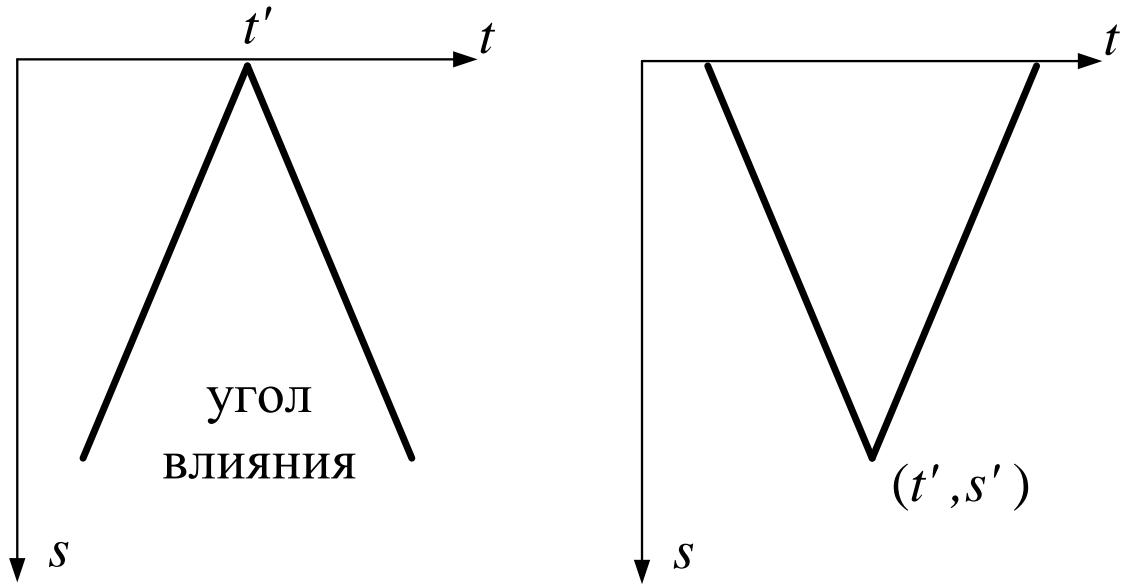


Рисунок 1.24 – Угол влияния вейвлет преобразования (привод. по [119, с. 24])

Фиксированное количество коэффициентов $h_0(k)$ и $h_1(k)$ связывают масштабирующую функцию и вейвлет одного разрешения с масштабирующей функцией на следующем более низком разрешении [1.2]:

$$\varphi(t) = \sum_k h_0(k) \sqrt{2} \varphi(2t - k), \quad (1.29)$$

$$\psi(t) = \sum_k h_1(k) \sqrt{2} \varphi(2t - k). \quad (1.30)$$

Проиллюстрируем данное утверждение [200]:

Даны две функции $\varphi(2t)$ и $\varphi(2t - 1)$, а также заданы коэффициенты фильтра

h_0 и h_1 в виде

$$h_0(k) = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}, \quad (1.31)$$

$$h_1(k) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}. \quad (1.32)$$

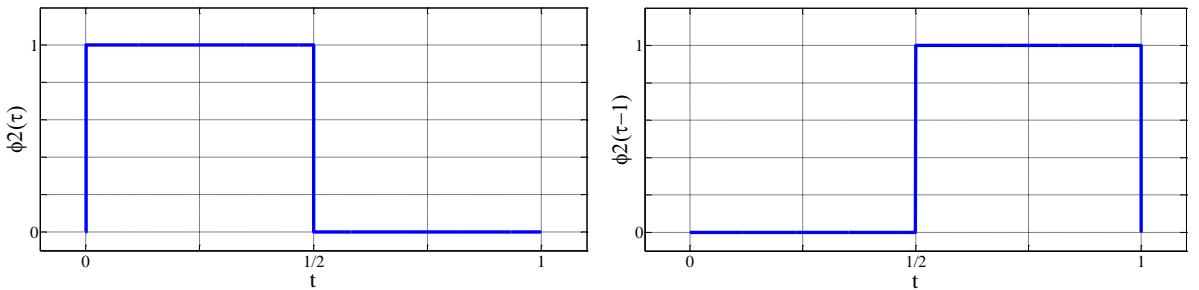


Рисунок 1.25 – Функции $\varphi(2t)$ и $\varphi(2t - 1)$

Используя выражения 1.31 и 1.32 становится возможным найти масштабирующую функцию $\varphi(t)$ и «материнский вейвлет» $\psi(t)$.

$$\varphi(t) = \sum_k h_0(k) \sqrt{2} \varphi(2t - k) = \underbrace{\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{2} \varphi(2t)}_{k=0} + \underbrace{\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{2} \varphi(2t - 1)}_{k=1} = \varphi(2t) + \varphi(2t - 1) \quad (1.33)$$

$$\psi(t) = \sum_k h_1(k) \sqrt{2} \varphi(2t - k) = \underbrace{\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{2} \varphi(2t)}_{k=0} - \underbrace{\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{2} \varphi(2t - 1)}_{k=1} = \varphi(2t) - \varphi(2t - 1) \quad (1.34)$$

Ингрид Добеши доказала, что можно создать семейство фильтров (в настоящее время его принято называть «семейство вейвлетов Добеши») так, что для каждого члена этого семейства достаточно указать только коэффициенты фильтра низких частот h . Коэффициенты верхних частот g могут быть вычислены по [224, с. 73]:

$$g_k = (-1)^k h_{1-k}. \quad (1.35)$$

Аналогично И. Добеши было показано, что достаточно определить только масштабирующую функцию φ , поскольку функция ψ связана с ней равенством [224, с. 73]:

$$\psi(t) = \sqrt{2} \sum_k g_k \varphi(2t - k). \quad (1.36)$$

Для реализации алгоритмов разложения и реконструкции можно воспользоваться теоремой Малла (Mallat) [135, с. 277]:

- при разложении

$$\begin{aligned} a_{j+1}[p] &= \sum_{n=-\infty}^{+\infty} h[n-2p] a_j[n], \\ d_{j+1}[p] &= \sum_{n=-\infty}^{+\infty} g[n-2p] a_j[n]. \end{aligned} \quad (1.37)$$

- при реконструкции

$$a_j[p] = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} h[p-2n] a_{j+1}[n] + \sum_{n=-\infty}^{+\infty} g[p-2n] d_{j+1}[n]. \quad (1.38)$$

Формулы 1.37-1.38 применяются для реализации быстрого вейвлет преобразования. Количество операций для анализа и синтеза сигналов в базисе вейвлетов не превышает числа операций для быстрого преобразования Фурье.

1.5 Пакетное вейвлет преобразование

В соответствии со схемой дискретного вейвлет преобразования (рисунок 1.13) разложение исходного сигнала (пространство V_0) на первом уровне происходит на два подпространства ($V_{1,0}=a_{1,1}$ и $V_{1,1}=d_{1,1}$). Нетрудно убедиться, что:

$$V_0 = V_{1,0} \oplus V_{1,1}. \quad (1.39)$$

На втором уровне декомпозиции сигнала разложению подвергается только пространство $V_{1,0}$, что дает возможность представить исходное пространство V_0 в виде:

$$V_0 = V_{2,0} \oplus V_{2,1} \oplus V_{1,1}. \quad (1.40)$$

Другими словами, вместо пространства $V_{1,0}$ = соответствующего набору аппроксимирующих вейвлет коэффициентов $a_{1,1}$ получаем два подпространства $V_{2,0}=a_{2,1}$ и $V_{2,1}=d_{2,1}$, каждое размерностью вдвое меньше, чем исходное. Одновременно с этим также уменьшается вдвое частотная локализация исследуемого сигнала. Для решения ряда практических задач такая «однобокая» ветка разложения не всегда является приемлемой. В частности, для анализа несинусоидальных режимов, если спектральный состав гармоник нагрузки представлен широким диапазоном частот. Так, например, если по схеме, представленной на рисунке 1.13, производится вейвлет разложение сигнала, содержащего 17-ю (850 Гц) и 19-ю (950 Гц) гармоники, то коэффициент D1 будет содержать в себе совместные сведения по обеим гармоникам. Увеличение частоты дискретизации для построения дерева дискретного вейвлет преобразования таким образом, чтобы удалось локализовать и 17-ю и 19-ю гармонику каждую отдельным коэффициентом, зачастую не возможно из-за технического ограничения средств измерения. Как следствие, возникает задача построения дерева вейвлет преобразования таким образом, чтобы каждое последующее подпространство было разделено на два одинаковых по размеру

подпространства. Количество подпространств на каждом последующем уровне разложения равнялось бы степени двойки (первый уровень разложения $j=1$ – количество подпространств $2^j=2$, второй уровень разложения $j=2$ – $2^j=4$ подпространства и т.д.).

В результате для обеспечения равномерной локализации частот исследуемого сигнала следует применять пакетное вейвлет преобразование выполняемое по схеме, представленной на рисунке 1.26. При разложении сигнала до третьего уровня получаем:

$$V_0 = V_{2,0} \oplus V_{2,1} \oplus V_{2,2} \oplus V_{2,3}, \quad (1.41)$$

$$V_0 = V_{3,0} \oplus V_{3,1} \oplus V_{3,2} \oplus V_{3,3} \oplus V_{3,4} \oplus V_{3,5} \oplus V_{3,6} \oplus V_{3,7}. \quad (1.42)$$

При реализации пакетного вейвлет преобразования с целью сокращения количества передаваемых данных (для дальнейшего интегрирования предлагаемой системы в технологии Smart Grid) может быть решена задача выбора оптимального дерева вейвлета. Объемы передаваемой неоперативной информации (например данные о показателях качества электроэнергии) энергообъектов регулируется отраслевым стандартом [205].

Мера оптимальности определяется минимальным количеством узлов вейвлет преобразования, необходимых для реконструкции (восстановления) сигнала с заданным уровнем точности. В качестве критерия для выбора оптимального дерева вейвлета применяется условие минимальности энтропии [200, с. 128]. В качестве примера, может быть применена энтропия Шеннона:

$$E(s) = -\sum s_i^2 \log_2(s_i^2). \quad (1.43)$$

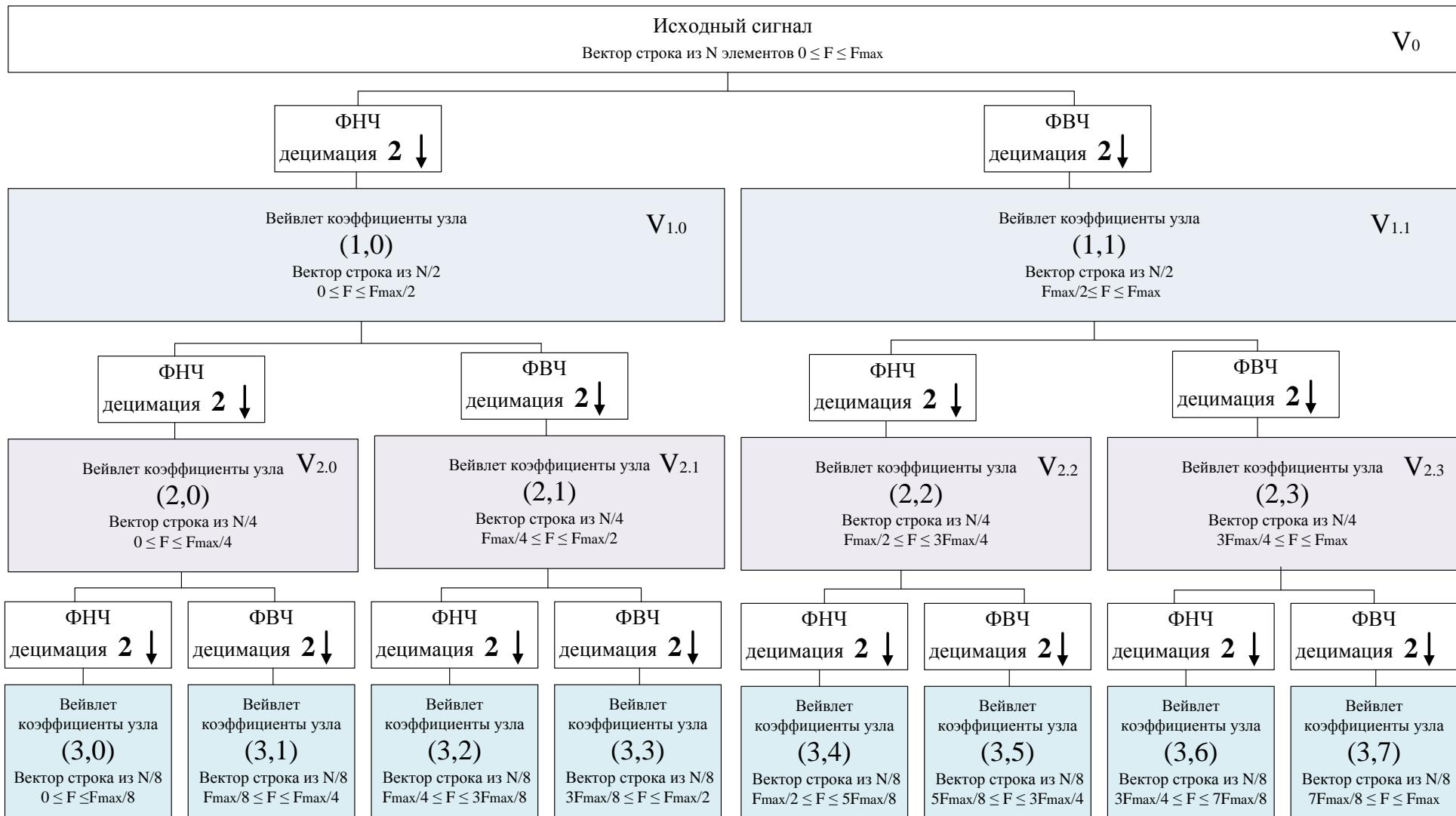


Рисунок 1.26 – Схема пакетного вейвлет преобразования

Если при проведении вейвлет разложения сумма энтропий узла дерева пакетного ВП меньше, чем энтропия коэффициентов в исходном узле, то вейвлет разложение имеет смысл. В противном случае, узел можно оставить без разложения.

Пакетное ВП, обеспечивая равномерную локализацию по частоте, может успешно интегрироваться в систему мониторинга качества электроэнергии, поскольку достаточно просто обеспечить соответствие частотных коридоров и гармонических групп, указанных в ГОСТ 308804.4.7–2013. Фактически при изменении частоты дискретизации, глубины вейвлет разложения, можно добиться совпадения частотных диапазонов отдельных узлов пакетного ВП (рисунок 1.26) и гармонических групп, указанных в ГОСТ (рисунки 1.2–1.3) [64].

Продемонстрируем алгоритм пакетного ВП при исследовании сигнала, заданного в соответствии с системой уравнений:

$$i(t) = \begin{cases} 10 \sin(2\pi ft) + 3 \sin(14\pi ft) & \leq t < 0,15; \\ 5 \sin(2\pi ft) + 2 \sin(22\pi ft) & 0,15 \leq t < 0,3. \end{cases} \quad (1.44)$$

График мгновенных значений тока, записанного системой 1.44, представлен на рисунке 1.27. Частота дискретизации исследуемого сигнала $F_d=3,2$ кГц.

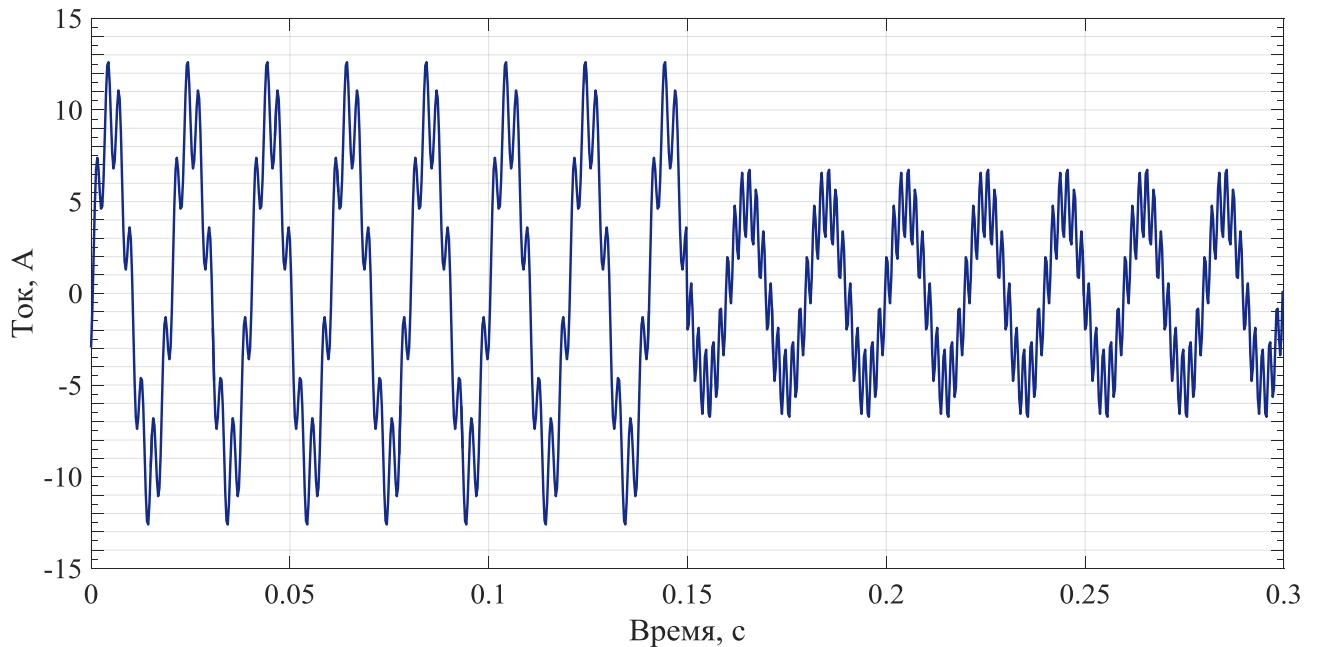


Рисунок 1.27 – График мгновенных значений исследуемого тока

В соответствии со схемой пакетного ВП (рисунок 1.26) произведем вейвлет разложение сигнала до 3 уровня. Вейвлет коэффициенты узла (3,0) будут обеспечивать локализацию сигнала по частоте в диапазоне от 0 до 200 Гц. График вейвлет коэффициентов узла (3,0) представлен на рисунке 1.28. При частоте дискретизации 3,2 кГц исходный сигнал на интервале времени 0,3 секунды будет состоять из 960 точек. Согласно схеме (рисунок 1.26) каждый узел пакетного ВП будет содержать последовательность (вектор строку), состоящую из $960/8=120$ точек.

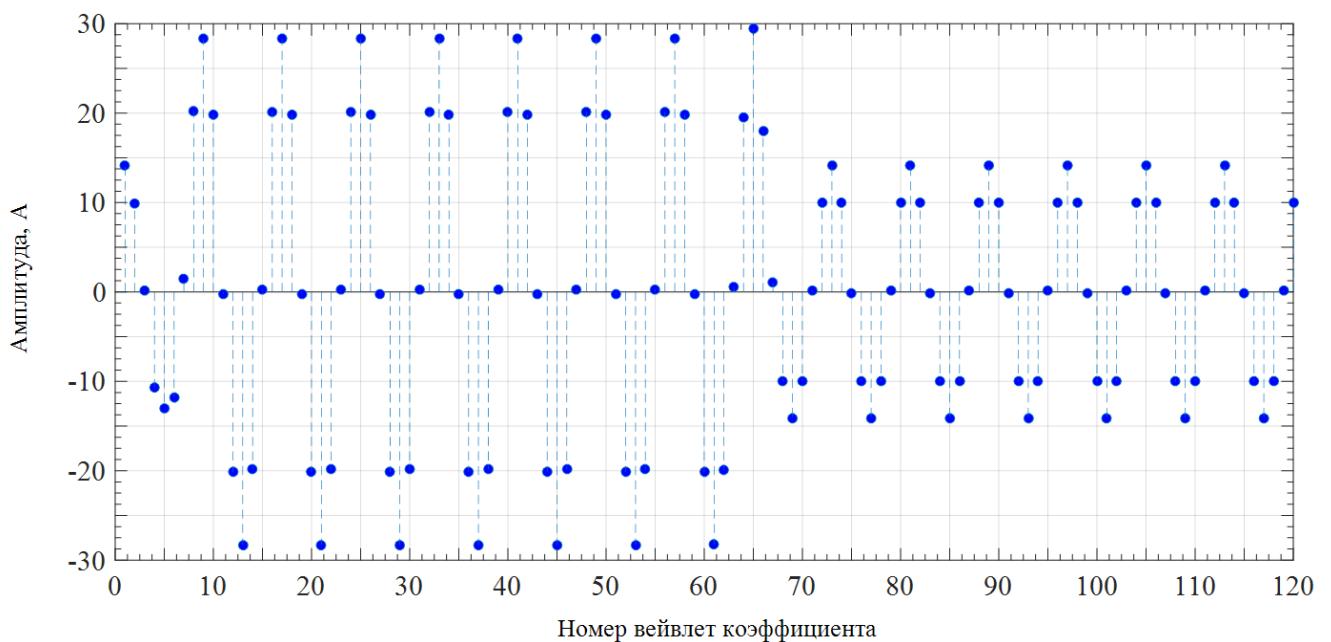


Рисунок 1.28 – График вейвлет коэффициентов узла (3,0) пакетного ВП

Нетрудно заметить, что вейвлет коэффициенты (рисунок 1.28) отражают уменьшение амплитуды основной гармоники (50 Гц) в середине рассматриваемого интервала времени.

Исходный сигнал тока, согласно выражению (1.43) содержит 7-ю и 11-ю гармоники, присутствующие ровно на половине исследуемого промежутка времени. В соответствии с схемой пакетного ВП за частоту 350 Гц (7-я гармоника) отвечает вейвлет коэффициент узла (3,1), за частоту 550 Гц (11-я гармоника) коэффициент узла (3,3). Здесь необходимо отметить, что в программном комплексе MATLAB принята несколько отличная нумерация узлов пакетного ВП.

На рисунках 1.29 и 1.30 представлены графики вейвлет коэффициентов для узлов (3.1) и (3.3) соответственно.

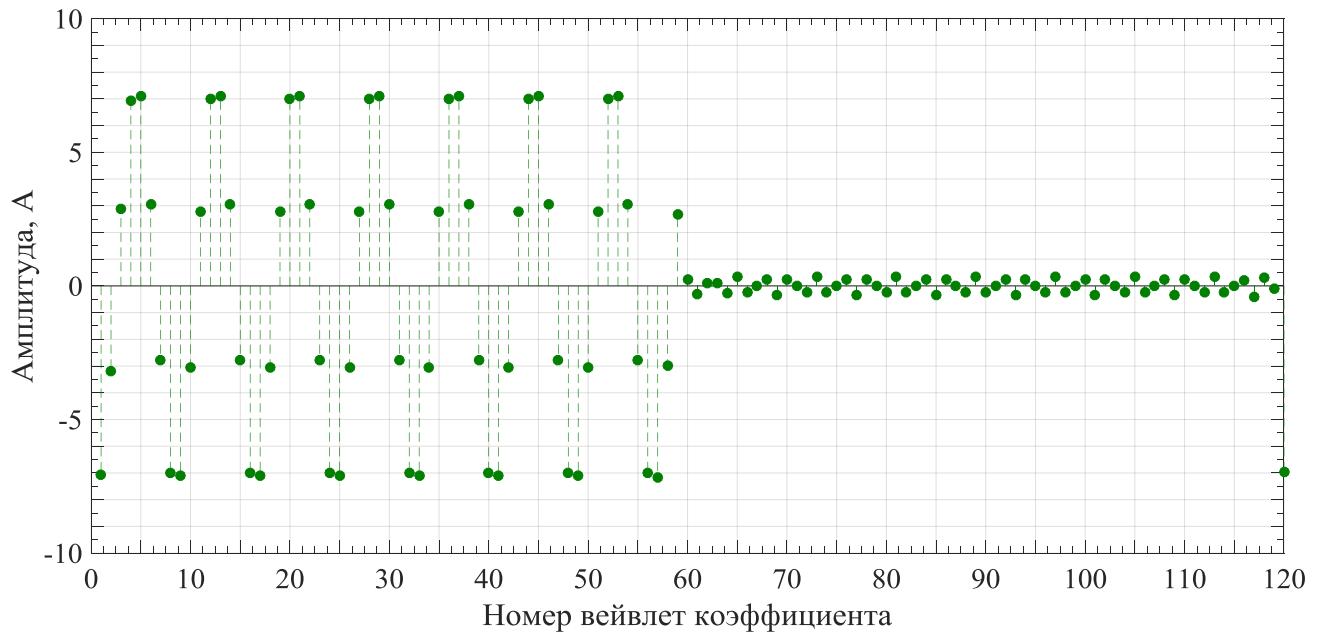


Рисунок 1.29 – Вейвлет коэффициенты узла (3,1) пакетного ВП

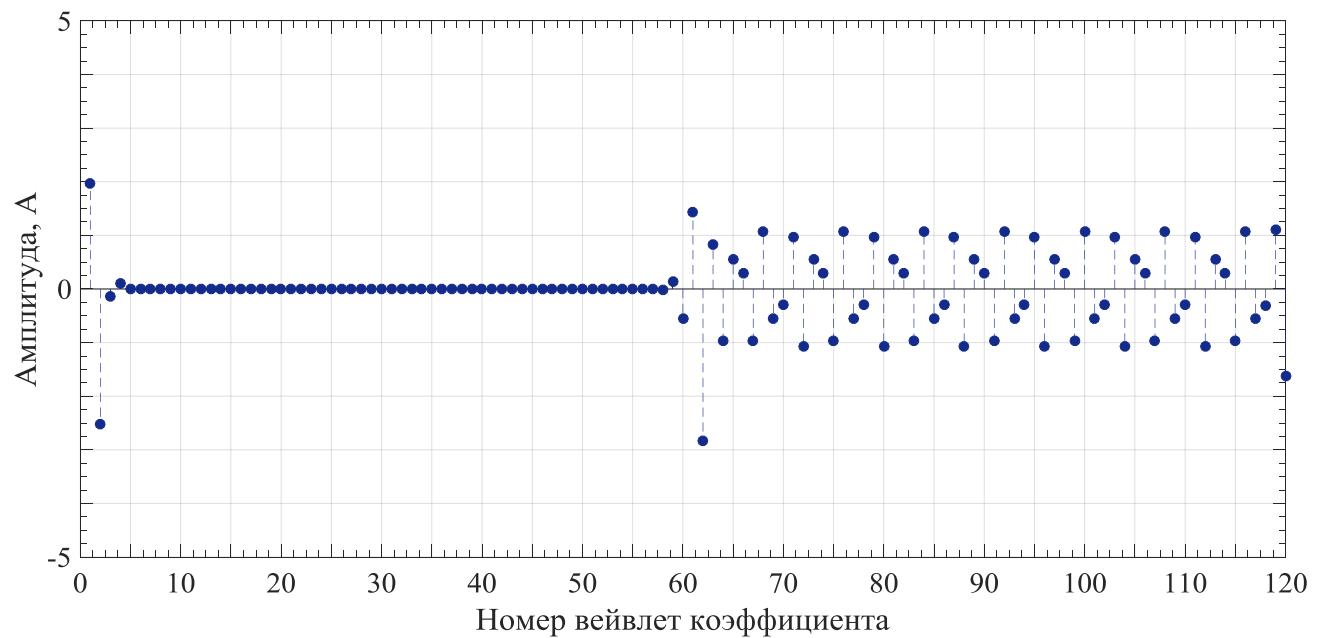


Рисунок 1.30 – Вейвлет коэффициенты узла (3,3) пакетного ВП

Амплитуды вейвлет коэффициентов наглядно демонстрируют, когда отдельная гармоника присутствовала в сигнале тока, а когда нет.

В качестве дополнительного примера приведем график вейвлет коэффициента узла (3,7), обеспечивающим локализацию частотного коридора от

1400 до 1600 Гц. По условию задачи (уравнение 1.43) такой группы частот в сигнале нет. В результате имеем (рисунок 1.31) значения вейвлет коэффициентов узла (3,7) близки к нулю, наблюдается лишь небольшой всплеск при изменении режима в середине интервала. Эта особенность вейвлет коэффициентов будем использовать в дальнейшем при определении времени изменения режима электрической сети.

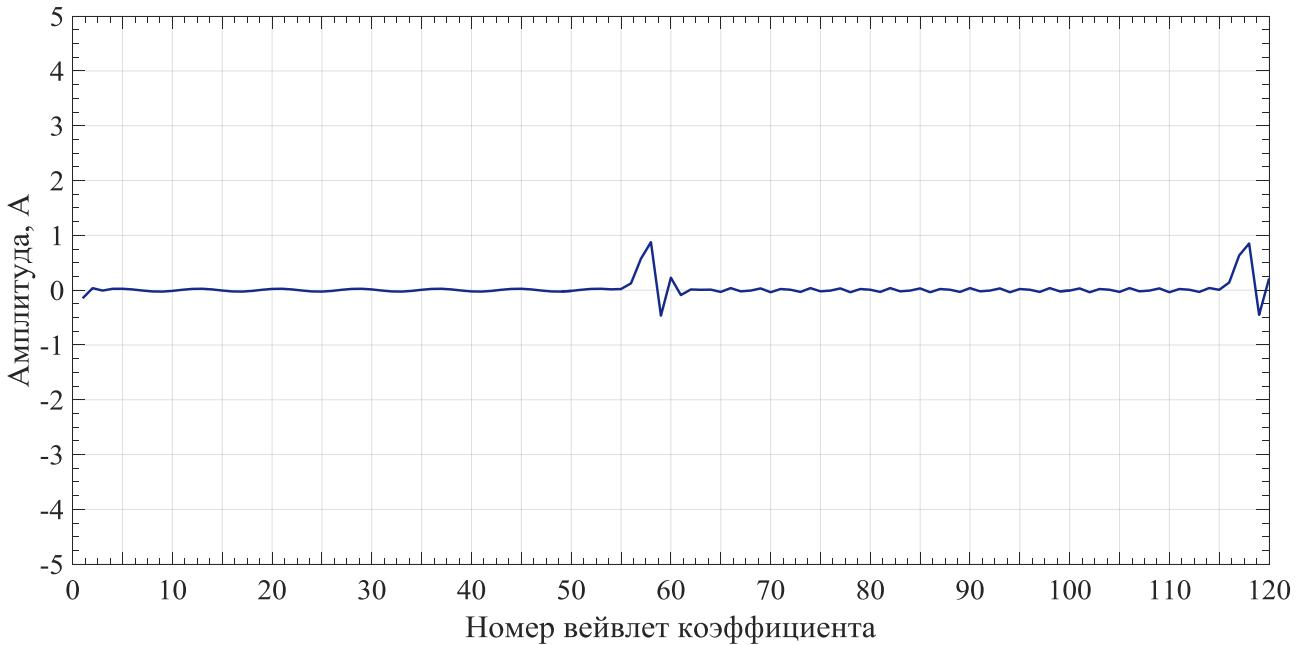


Рисунок 1.31 – Вейвлет коэффициенты узла (3,7) пакетного ВП

В работе [58] в качестве условия выбора оптимального базиса предлагается условие минимизации погрешности аппроксимации. Для матрицы мгновенных значений тока при выбранном обозначении j – уровень разложения, k – номер узла (набора коэффициентов) пакетного ВП условие выбора оптимального дерева разложения может быть записано [58, с. 549]:

$$O_{j,k} = \begin{cases} \left\{ \Psi_{j,k}(2^j t - n) \right\}_{n \in \mathbb{Z}}, & \text{если } \sum |\langle i, \Psi_{j,k}(n) \rangle|^2 \geq \sum |\langle i, \Psi_{j+1,2k}(n) \rangle|^2 + \sum |\langle i, \Psi_{j+1,2k+1}(n) \rangle|^2; \\ \left\{ \Psi_{j+1,2k} \right\}_{n \in \mathbb{Z}} \cup \left\{ \Psi_{j+1,2k+1} \right\}_{n \in \mathbb{Z}}, & \text{если } \sum |\langle i, \Psi_{j,k}(n) \rangle|^2 < \sum |\langle i, \Psi_{j+1,2k}(n) \rangle|^2 + \sum |\langle i, \Psi_{j+1,2k+1}(n) \rangle|^2. \end{cases} \quad (1.44)$$

На основании вышеизложенного можно заключить, что пакетное ВП, 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. При этом возникает необходимость совмещения спектра, локализованного узлами пакетного ВП и так называемых гармонических групп (определенны ГОСТ 308804.4.7–2013 [64]). К сожалению, как показывает практика, не все типы вейвлет функций обеспечивают четкую локализацию частот в соответствии со схемой (рисунок 1.26).

1.6 Амплитудно-частотные характеристики вейвлетов

Как показали результаты имитационного моделирования и физических измерений, исследователь при решении данной задачи сталкивается с серьёзной проблемой выбора типа материнского вейвлета и масштабирующей функции. В настоящей работе была произведена оценка точности вычисления действующих значений отдельных гармонических составляющих с применением различных типов вейвлетов, интегрированных в систему MATLAB. Результат показал, что точность таких расчетов колеблется от 0,05% до 25%. Возникает необходимость разработать и математически сформулировать критерий выбора оптимального типа материнского вейвлета для анализа несинусоидальных режимов ЭЭС [160].

Вейвлет функция является цифровым фильтром, имеющим амплитудно-частотную характеристику (АЧХ), которая определяется типом вейвлета и глубиной вейвлет разложения при решении конкретной задачи. Вейвлет функция может быть представлена полосой пропускания и полосой заграждения. Идеальный фильтр нижних частот (ФНЧ) пропускает без искажений все частоты ниже ω_0 и полностью подавляет все частоты выше ω_0 , но на практике это не реализуемо. Реальные ФНЧ вносят искажения в полосе пропускания и не до конца подавляют частоты в полосе заграждения. АЧХ вейвлета Хаара (Haar) представлена на рисунке 1.32.

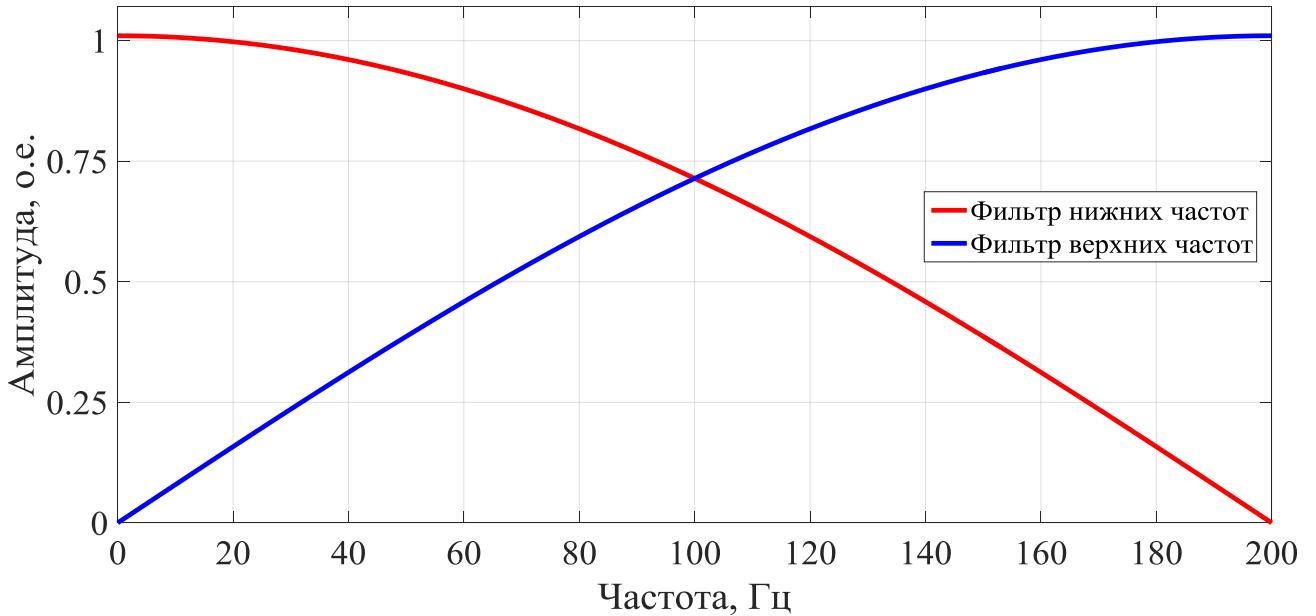


Рисунок 1.32 – Амплитудно-частотная характеристика вейвлета Хаара

Вейвлет Хаара, несомненно, обладает рядом преимуществ – простота задания коэффициентов фильтра, наглядная интерпретация идей ВП, простейшая форма материнского вейвлета и масштабирующей функции. Анализ АЧХ вейвлета Хаара позволяет сделать вывод о неэффективности использования этой функции для задач частотной локализации сигналов. Причиной является значительное перекрытие полос пропускания фильтров нижних и верхних частот (рисунок 1.32).

АЧХ вейвлетов Добеши 10 (пунктирная линия) и 44 порядков (сплошная линия) представлены на рисунке 1.33.

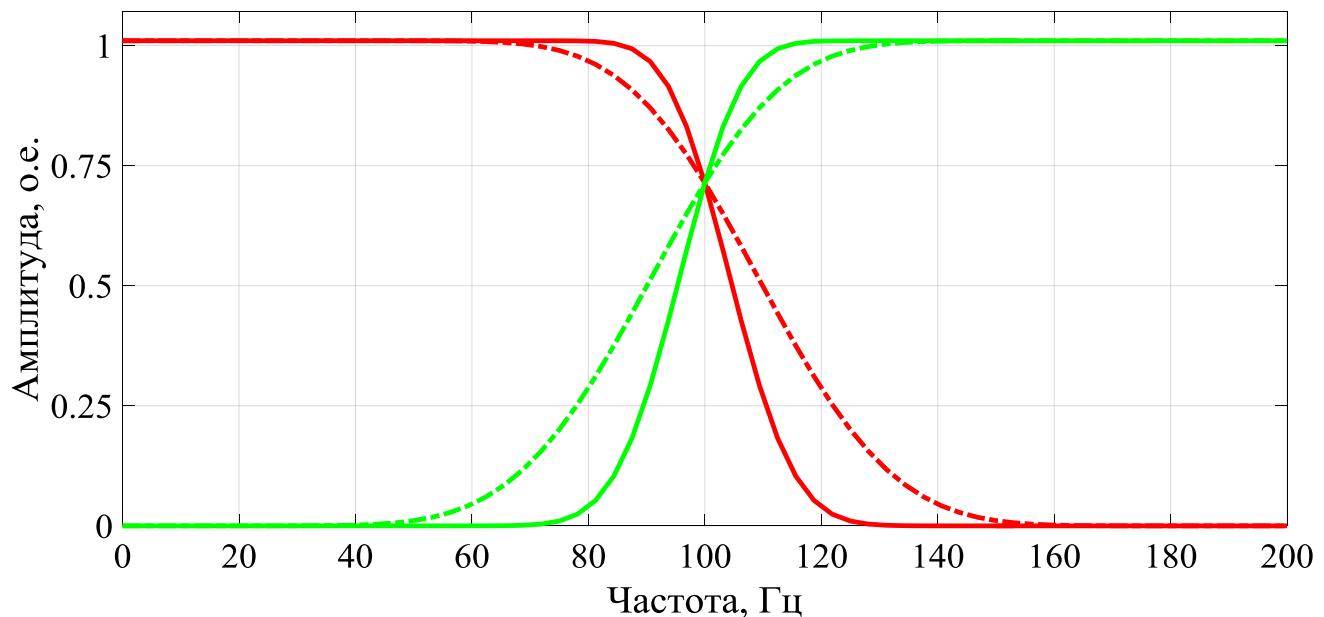


Рисунок 1.33 – Амплитудно-частотная характеристика вейвлетов Добеши 10 и 44 порядков

Для эффективного применения вейвлет преобразования при разложении несинусоидальных токов и напряжений, необходимо на основе АЧХ конкретных функций разработать перечень условий для оптимального выбора типа вейвлета. Применяемая в настоящий момент группировка гармоник и интергармоник, в соответствии с ГОСТ 30804.4.30–2013, должна быть сохранена при внедрении алгоритмов вейвлет преобразования в теорию гармонического анализа режимов электроэнергетических систем. Совмещение полосы пропускания АЧХ вейвлет функции и гармонической (интергармонической) группы позволяет обеспечить четкую частотную локализацию и повысит точность определения интегральных характеристик несинусоидальных режимов электрических сетей. При этом, внедрение вейвлет преобразования позволит изменить подходы к усреднению результатов измерения показателей качества электроэнергии. Математический аппарат вейвлет преобразования изначально позволяет изменять ширину окна – узкие окна для высокочастотных сигналов и широкие окна для низкочастотных составляющих.

1.7 Основные результаты и выводы

1. Доказана неэффективность применения преобразования Фурье для решения задач цифровизации электрических сетей, развития технологий Smart Grid и «цифровая подстанция». При анализе нестационарных режимов с помощью преобразования Фурье возникает эффект растекания спектра, который вносит погрешность при определении амплитуды и частоты исследуемых высокочастотных компонент. Возникает дополнительная задача в выборе ширины окна. Преобразование Фурье не позволяет достоверно идентифицировать локальные особенности мгновенных значений токов и напряжений в электрических сетях.

2. Доказано существование внутренних противоречий существующих методов анализа интергармоник с помощью преобразования Фурье. 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.

3. Доказана перспективность использования математического аппарата вейвлет преобразования для анализа нестационарных несинусоидальных режимов электрических сетей и систем. 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 случайных характер (изменение

мощности и характера нагрузок, изменение конфигурации схемы, короткие замыкания, внутренние и внешние перенапряжения и др.).

4. Представлено обоснование интеграции алгоритмов пакетного вейвлет преобразования в систему мониторинга качества электроэнергии с группировкой гармоник и интергармоник в соответствии с действующим ГОСТ 30804.4.7–2013.

5. Доказана перспективность применения алгоритмов вейвлет преобразования для анализа режимов электроэнергетических систем, где необходима фиксация локальных особенностей нестационарных сигналов (внутренние и внешние перенапряжения, коммутационные броски тока и др.). Алгоритмы вейвлет преобразования позволяют учитывать локальные изменения сигналов и нести информацию в трёхмерном формате – амплитуда, частота, время.

6. Доказана эффективность внедрения вейвлет преобразования для развития систем контроля у учета электропотребления с применением алгоритмов сжатия и удалённого восстановления данных сформулированы в плане мероприятий национальной технологической инициативы «Энерджинет» (распоряжение Правительства РФ от 28.04.2018 № 830-р, ст. 2803). Вейвлет преобразование мгновенных значений параметров режима (токов, напряжений, мощности) с применением алгоритма Малла (кратномасштабный анализ) позволяет сжимать данные при передаче цифрового потока сигнала и с достаточной степенью точности реконструировать исходный поток данных.

7. Сформулированы методические основы непрерывного, дискретного и пакетного вейвлет преобразования. Представлены методические рекомендации для эффективного использования вейвлет преобразования для решения актуальных задач электроэнергетики. Определены пределы и перспективы практического использования вейвлет преобразования при расчете переходных процессов, организации алгоритмов релейной защиты, анализа показателей качества электроэнергии.

2. МОДЕРНИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И АЛГОРИТМОВ РАСЧЕТА РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТ АНАЛИЗА

2.1 Разработка критерия выбора оптимального типа материнского вейвлета для исследования качества электроэнергии

Выбор типа вейвлета является определяющим фактором для исследователя, поскольку это оказывает влияние на процедуру разложения, восстановления (реконструкции) и, главным образом, на значения энергии спектров, используемых при решении широкого круга задач электроэнергетики [320].

Для разработки критерия выбора оптимального типа вейвлета для анализа несинусоидальных режимов в ЭЭС в настоящей работе были проанализированы наиболее часто применяемых вейвлет функций (в том числе представленных в программе MATLAB).

Проведённые исследования показали, что для определения действующих значений несинусоидальных величин при расчете режимов работы ЭЭС наиболее оптимальные результаты показывают вейвлеты семейства Добеши высоких порядков. На рисунке 1.26 сплошной линией показана АЧХ вейвлета Добеши 44 порядка, наиболее близкая к идеальному фильтру.

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 2.1). 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

$h+1$ (рисунок 2.6). Вейвлет коэффициенты, отвечающие за локализацию других гармонических групп, должны быть исключены из расчета.

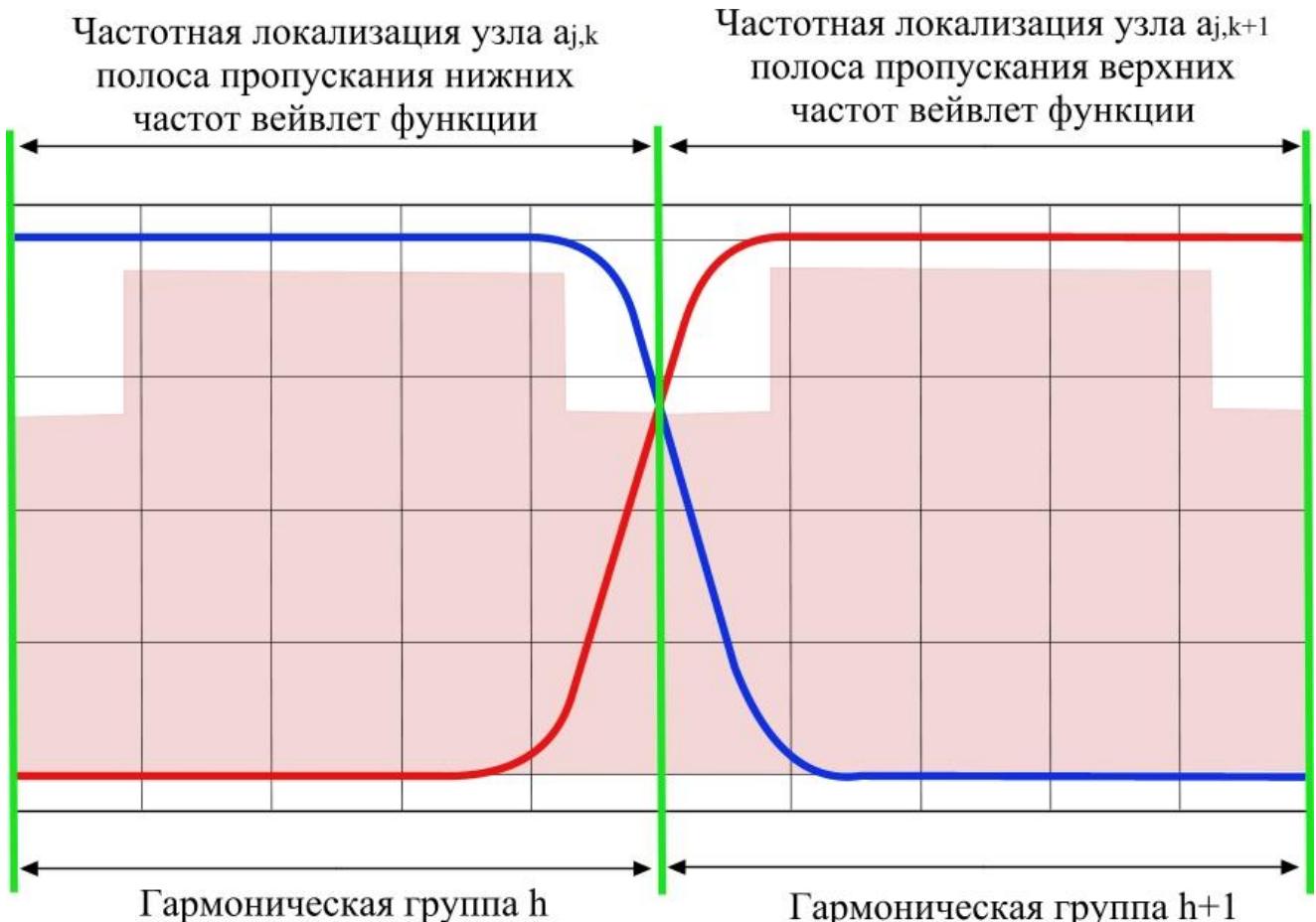


Рисунок 2.1 – Совмещение частотной локализации вейвлета и гармонических групп по ГОСТ 30804.4.30–2013 [63].

С учетом вышеизложенного в диссертации был сформулирован критерий оптимального выбора материнского вейвлета (2.1) – 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:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (i_k - \hat{i}_k)^2}{\sum_{k=1}^n i_k^2}} \rightarrow \min; \\ \Delta_{En} = \frac{E_n}{E_{\Sigma}} \frac{\sum_{k=n}^{\infty} |i_{j,k}^A|^2 + \sum_{k=n}^{\infty} |i_{j,k}^D|^2}{\sum_{k=-\infty}^{\infty} |i_{j,k}^A|^2 + \sum_{j=J}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} |i_{j,k}^D|^2} \rightarrow \max. \end{array} \right. \quad (2.1)$$

Возможные искажения в полосе пропускания в алгоритмах ВП принято изображать наложением частотных коридоров вейвлет коэффициентов (рисунок 4.11).

Существенное значение приобретает так называемая длина фильтра вейвлета, или количество коэффициентов, поскольку этот параметр определяет скорость вычисления вейвлет преобразования. Для расчета одного коэффициента разложения при проведении вейвлет преобразования необходимо совершить следующее количество операций N_{on} [1 с. 65]:

$$N_{on} = \sum_{k=1}^i m^{i-1} (2m-1). \quad (2.2)$$

Анализ взаимосвязи среднеквадратичного отклонения и длины фильтра после процедуры прямого и обратного преобразования проводится в работе [1], где автор для тестового сигнала производит расчет для 54 типов вейвлетов, рассматриваемых в [1]. На основании представленных сравнений производится вывод: «более длинный фильтр лучше восстанавливает сигнал, ..., эти фильтры имеют АЧХ более близкую к идеальной» [1 с. 68].

2.2 Методика расчета действующих значений токов и напряжений по вейвлет коэффициентам

Действующее значение тока (напряжения, Э.Д.С.) может быть определено по общезвестной формуле:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} \quad . \quad (2.3)$$

если функция тока $i(t)$ задана набором дискретных значений с частотой дискретизации f_δ

$$f_\delta = \frac{N}{T} . \quad (2.4)$$

где T – исследуемый период времени,

N – количество точек отсчета

то действующее значение тока определяется по общезвестной формуле:

$$I = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N i_k^2} . \quad (2.5)$$

Для экспресс оценки суммарного коэффициента гармонического искажения по дискретным цифровым значениям напряжения в статье [169] предложено использовать формулу:

$$K_U = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^N [U_i - U_{(1)i}]^2}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^N U_{(1)i}^2}} . \quad (2.6)$$

где U_i – мгновенное значение напряжения на i -м отсчете, $U_{(1)i}$ – напряжение основной частоты на i -м отсчете.

Как справедливо отмечают авторы [169], данный метод предполагает преобразование Фурье с целью выделения основной гармоники из общего сигнала. В настоящей диссертационной работе продолжим развитие этой идеи с учетом способности ВП производить декомпозицию сигнала по частотным компонентам с сохранением информации о времени и теореме Парсеваля. Предложим возможность расчета интегральных характеристик параметров режимов электроэнергетических систем (действующих значений токов и напряжений) по вейвлет коэффициентам.

Если исследуемая функция тока задана вейвлет коэффициентами:

$$i(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} i_{j,k}^A \varphi_{j,k}(t) + \sum_{j=J}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} i_{j,k}^D \psi_{j,k}(t). \quad (2.7)$$

то, для ортогональных вейвлетов, действующее значение может быть определено по формуле:

$$I = N^{-\frac{1}{2}} \sqrt{\sum_{k \in Z} (i_{J_0, k}^A)^2 + \sum_{k \in Z} \sum_{j=J_0}^{J-1} (i_{j, k}^D)^2}. \quad (2.8)$$

Поясним данное выражение следующим расчетом.

Рассмотрим период тока промышленной частоты $T = 0.02\text{c}$. Ток задан своими дискретными значениями с частотой дискретизации

$$f_\delta = \frac{N}{T} = \frac{64}{0.02} = 3.2 \text{ кГц}$$

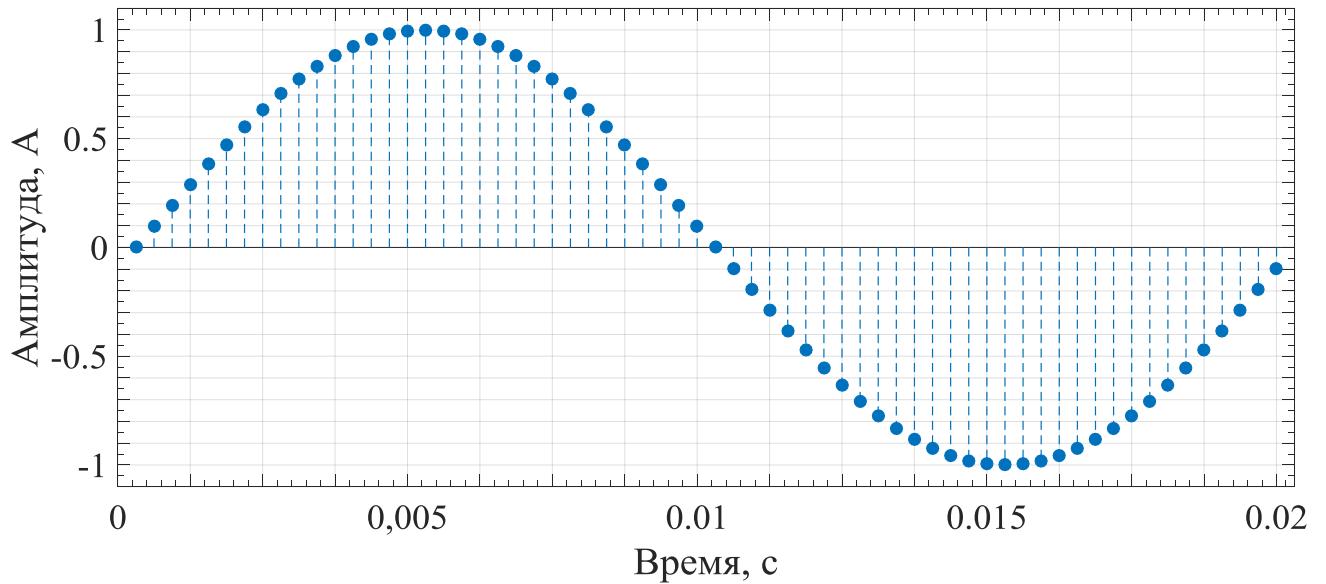


Рисунок 2.2 – Дискретный сигнал тока

Таким образом, ток представлен вектор-строкой, состоящей из 64 элементов (рисунок 2.2) $i = [i_1 \ i_2 \ i_3 \ \dots \ i_{64}]$. Допустим, что данный вектор строка (матрица дискретных значений тока), учитывая, что $64=2^6$, и есть коэффициенты нулевого уровня, тогда максимальный уровень разложения для данного сигнала – пятый уровень. Используя коэффициенты вейвлета Хаара h_0, h_1 (значения приведены в выражениях 1.30–1.31), применяя алгоритмы разложения, получим вейвлет коэффициенты следующих уровней:

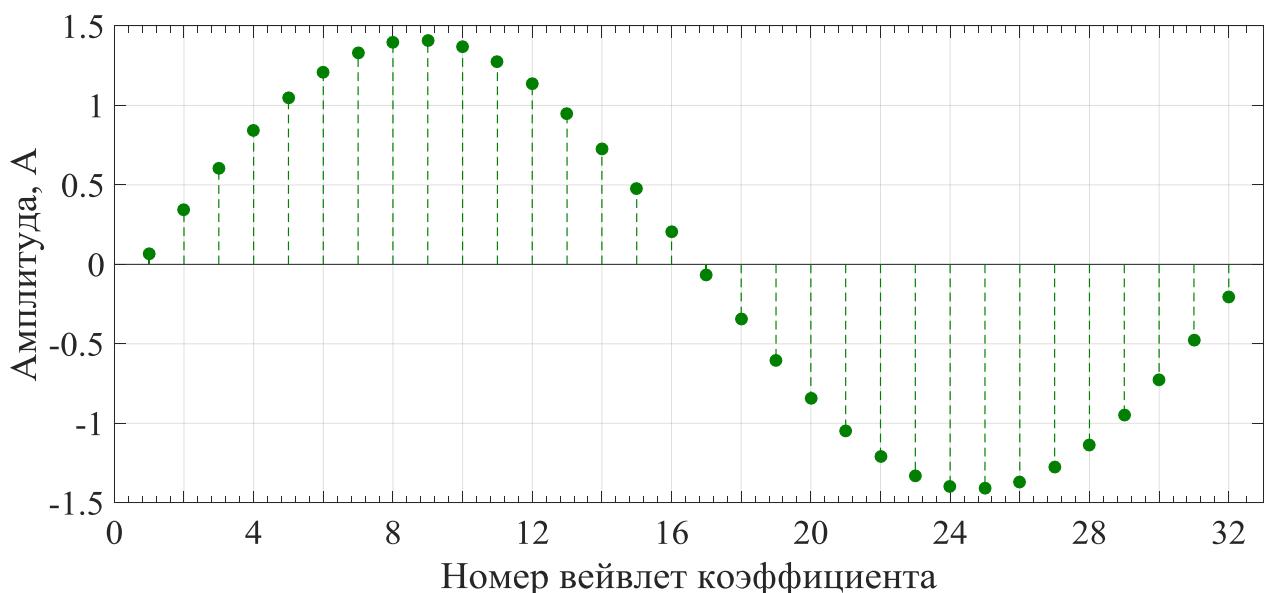


Рисунок 2.3 – Аппроксимирующие вейвлет коэффициенты первого уровня разложения

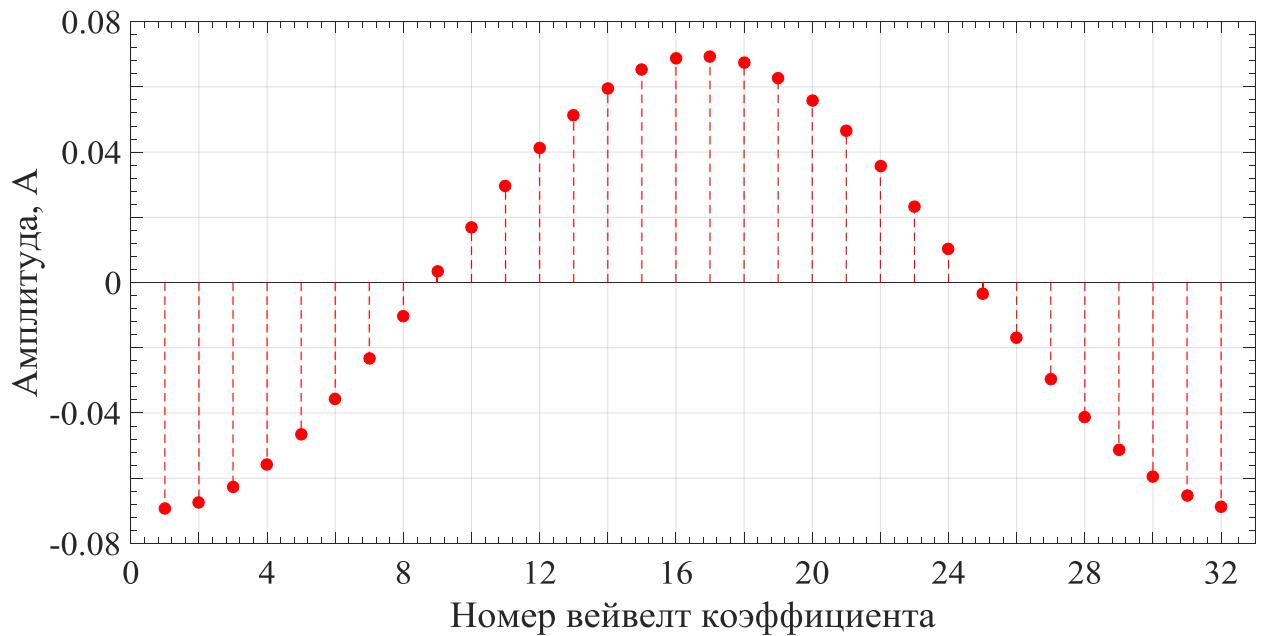


Рисунок 2.4 – Детализирующие вейвлет коэффициенты первого уровня разложения

В соответствии с принципами разложения, размерность матрицы коэффициентов аппроксимации уровня разложения $j=1$ $i_{4,k}^A = [i_{4,1}^A \ i_{4,2}^A \ i_{4,3}^A \ \dots \ i_{4,32}^A]$ и детализации $i_{4,k}^D = [i_{4,1}^D \ i_{4,2}^D \ i_{4,3}^D \ \dots \ i_{4,32}^D]$ стала меньше в 2 раза по отношению к исходной матрице токов $i = [i_1 \ i_2 \ i_3 \ \dots \ i_{64}]$.

На основании полученных вейвлет коэффициентов можно рассчитать действующее значение тока:

$$I = N^{-\frac{1}{2}} \sqrt{\sum_{k \in Z} (i_{J_0, k}^A)^2 + \sum_{k \in Z} \sum_{j=J_0}^{J-1} (i_{j, k}^D)^2} = 64^{-\frac{1}{2}} \sqrt{\sum_{k=32} (i_{4, k}^A)^2 + \sum_{k=32} \sum (i_{5, k}^D)^2} = 0.70710678$$

Произведя разложение до уровня $j=2$ получаем строковые матрицы коэффициентов аппроксимации и детализации, состоящие из 16 элементов каждая:

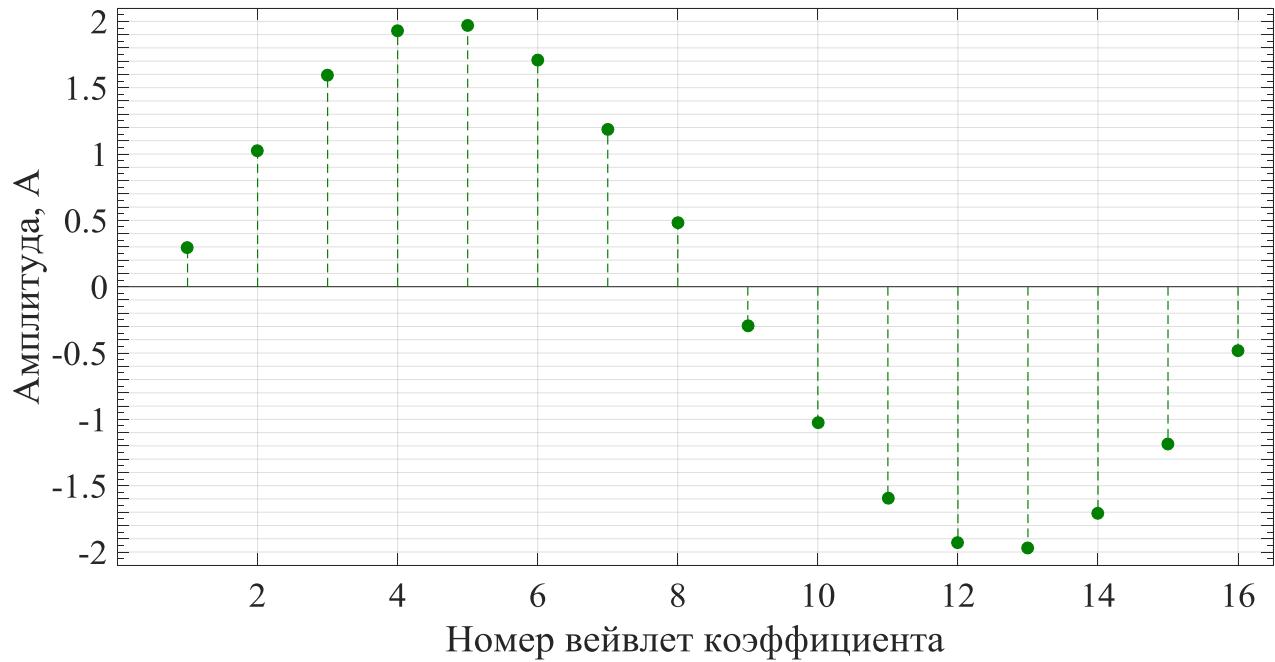


Рисунок 2.5 – Аппроксимирующие вейвлет коэффициенты второго уровня разложения

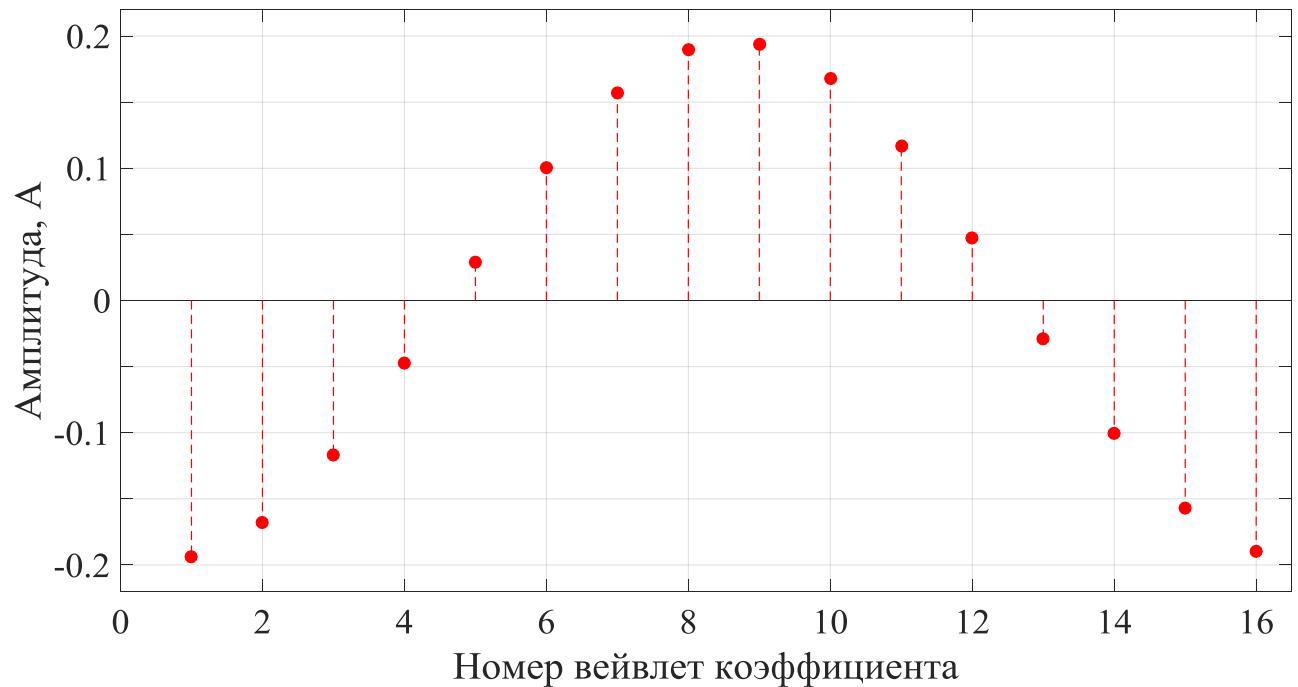


Рисунок 2.6 – Детализирующие вейвлет коэффициенты второго уровня разложения

Действующее значение тока будет определяться на основании суммы квадратов коэффициентов $i_{3,k}^A$, $i_{3,k}^D$, $i_{4,k}^D$.

$$\begin{aligned}
I &= N^{-\frac{1}{2}} \sqrt{\sum_{k \in Z} (i_{J_0, k}^A)^2 + \sum_{k \in Z} \sum_{j=J_0}^{J-1} (i_{j, k}^D)^2} = \\
&= 64^{-\frac{1}{2}} \sqrt{\sum_{k=16} (i_{3, k}^A)^2 + \sum_{k=16} (i_{3, k}^D)^2 + \frac{1}{2^1} \sum_{k=32} (i_{4, k}^D)^2} = 0.70668104
\end{aligned}$$

Видна некоторая погрешность в вычислении действующего значения при различных уровнях разложения сигнала. Погрешность обусловлена лишь малым значением количества точек отсчета N , принятом в данном случае. При увеличении N , погрешность сокращается.

Действующее значение несинусоидального тока (напряжения) определяется по общеизвестной формуле:

$$I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_{n-1}^2 + I_n^2}. \quad (2.9)$$

Для определения действующих значений токов отдельных гармоник с помощью вейвлет преобразования необходимо выбрать (определить по параметрам цифровых датчиков тока или напряжения) частоту дискретизации.

Нет необходимости при проведении практических измерений каждый раз подбирать оптимальную схему вейвлет разложения для частотной локализации гармонических групп. Достаточно провести эту процедуру один раз, опираясь на частоту дискретизации измерительных систем.

Для расчета действующих значений токов отдельных гармоник сигнала, заданного уравнением (1.43) необходимо использовать вейвлет коэффициенты узлов (3,0), (3,1) и (3,3) для расчета основной частоты, 7-й и 11-й гармоник соответственно:

$$\begin{aligned}
I_{50} &= N^{-\frac{1}{2}} \sqrt{\sum (i_{j, k})^2} = 120^{-\frac{1}{2}} \sqrt{\sum (i_{3, 0})^2}, \\
I_{350} &= 120^{-\frac{1}{2}} \sqrt{\sum (i_{3, 1})^2}, \\
I_{350} &= 120^{-\frac{1}{2}} \sqrt{\sum (i_{3, 3})^2}.
\end{aligned}$$

Разработанная методика расчета действующих значений токов (напряжений) по вейвлет коэффициентам может быть использована для расчета потерь в токоведущих частях от высших гармоник и интергармоник. Вейвлет преобразование в разработанной методике позволяет определить амплитуду, частоту и время (длительность) присутствия гармоник в сигнале тока. Данная информация будет полезна при оценке технико-экономического эффекта от внедрения фильтро-компенсирующих устройств для подавления гармоник и сокращения потерь.

2.3 Разработка рекурсивных моделей расчета переходных процессов в электрических цепях на основе вейвлет коэффициентов

2.3.1 Модель для анализа переходного процесса при трёхфазном коротком замыкании

В настоящее время математический аппарат ВП находит широкое применение для исследования переходных процессов в электроэнергетических системах. Есть опыт применения ВП для анализа коротких замыканий [296, 307, 332, 342], простых замыканий на землю в сетях с изолированной или компенсированной нейтралью [244, 260, 269], анализа переходных процессов связанных коммутацией БСК [290] или исследованию внешних перенапряжений. Алгоритмы ВП уже интегрированы в программные комплексы Mathcad [80] и MATLAB [79]. О необходимости интеграции аппарата вейвлет анализа в успешно зарекомендовавший себя программный комплекс для расчета переходных процессов в электроэнергетических системах ATP EMTP обращают внимание авторы статьи [305]. Авторы предлагают внедрить в программный комплекс ATP EMTP блок дискретного вейвлет преобразования, практическая реализация предложена с помощью языка программирования MODELS [305, с. 382], что позволит производить расчеты в режиме on-line. В качестве аргумента проведения

такой интеграции авторы приводят сравнение осцилограмм короткого замыкания, полученных в ATP EMTP и Matlab Wavelet Toolbox [305, с. 379].

В настоящей диссертационной работе предлагается рекурсивный метод расчета переходных процессов с использованием вейвлет коэффициентов. Рекурсивный метод предполагает, что функция определяет свои значения через обращение к себе самой, но через другие аргументы. Теоретические основы разработанного метода представим на примере анализа трёхфазного короткого замыкания в сети 110 кВ (рисунок 2.7).

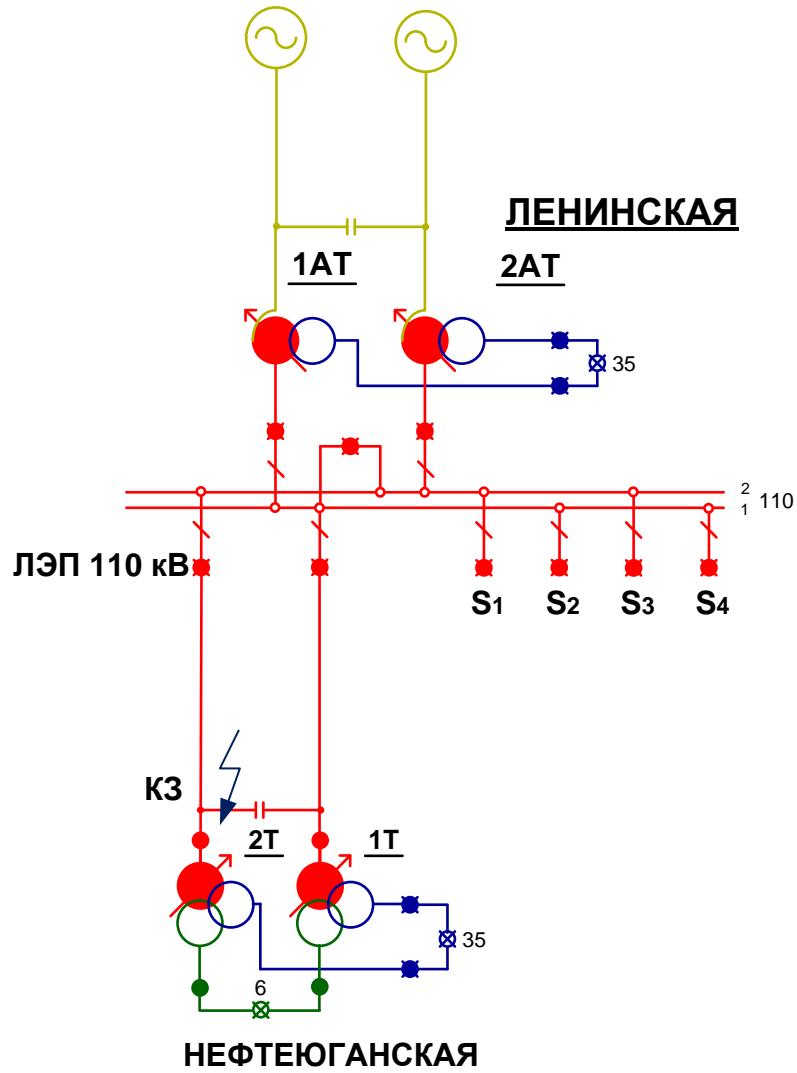


Рисунок 2.7 – Схема сети 110 кВ для анализа тока трехфазного короткого замыкания

Трехфазное короткое замыкание является симметричным видом повреждения. Токи предшествующего и аварийного режима по фазам будут отличаться только вследствие различия начальных условий (фазы в момент

возникновения замыкания). Дальнейшие расчеты будем вести для фазы А. Схема замещения для простейшего случая будет иметь вид (рисунок 2.8):

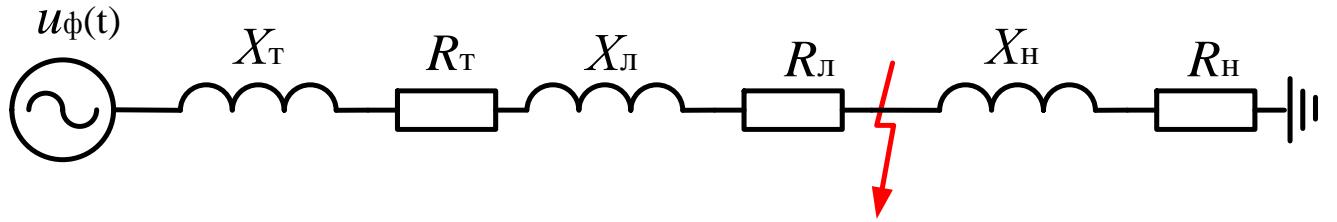


Рисунок 2.8 – Схема замещения сети 110 кВ (рис. 2.7) для анализа тока трехфазного короткого замыкания

Параметры схемы замещения $U_{\phi}=115/1,73$ кВ; $R_T=4,4$ Ом; $X_T=87$ Ом; $R_L=13$ Ом; $X_L=21$ Ом; $R_H=1102$ Ом; $X_H=827$ Ом.

Предшествующий режиму короткого замыкания ток определяется по общеизвестной формуле:

$$i_{npA} = \frac{U_{\max \phi}}{\sqrt{(R_T + R_L + R_H)^2 + (X_T + X_L + X_H)^2}} \sin(\omega t - \varphi). \quad (2.10)$$

Мгновенное значение предшествующего тока представлено на рисунке 2.9 на интервале времени $-0,04 \leq t \leq 0$ секунд. При металлическом коротком замыкании, при условии прохождения напряжения источника через нуль (для достижения максимального значения апериодической составляющей) дифференциальное уравнение переходного процесса будет записано в следующем виде:

$$U_{\max \phi} \cdot \sin(\omega t + \alpha) = i_A (R_T + R_L) + \frac{(X_T + X_L)}{\omega} \frac{di_A}{dt}. \quad (2.11)$$

Решение уравнения (2.11) общеизвестно и состоит из двух слагаемых – периодической и апериодической составляющей тока короткого замыкания:

$$i_A = i_{nA} + i_{aA} = \frac{U_{\max \phi}}{\sqrt{(R_T + R_L)^2 + (X_T + X_L)^2}} \sin(\omega t - \varphi_k) + i_0 \cdot e^{-t/T_a}. \quad (2.12)$$

Результирующий ток короткого замыкания фазы А, а также его составляющие – периодическая и апериодическая представлены на рисунке 2.9.

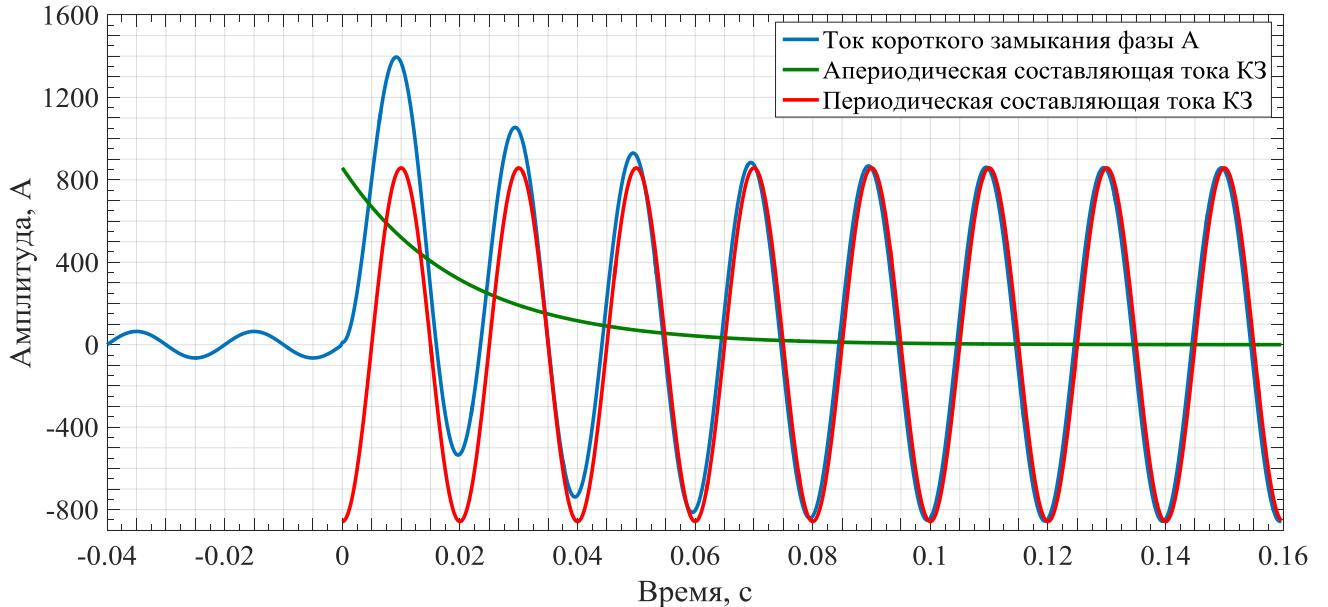


Рисунок 2.9 – Ток предшествующий и ток трёхфазного короткого замыкания

Напряжение фазы А может быть выражено через вейвлет коэффициенты:

$$U_{\max\phi} \sin(\omega t + \alpha) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} u_{j,k}^A \varphi_{j,k}(t) + \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} u_{j,k}^D \psi_{j,k}(t). \quad (2.13)$$

Уравнение обратной конечно-разностной аппроксимации производной тока фазы А di_A/dt в дискретном времени:

$$\frac{X_T + X_L}{\omega} \frac{di_A}{dt} = \frac{X_T + X_L}{\omega} \frac{i_A(t) - i_A(t + \Delta t)}{\Delta t}. \quad (2.14)$$

Уравнение (2.11) можно переписать, учитывая уравнения (2.13, 2.14):

$$\frac{i_A(t) - i_A(t + \Delta t)}{\Delta t} + \frac{\omega R}{X_T + X_L} i_A(t) = \frac{\omega}{X_T + X_L} \left(\sum_{k=-\infty}^{\infty} u_{j,k}^A \varphi_{j,k}(t) + \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} u_{j,k}^D \psi_{j,k}(t) \right). \quad (2.15)$$

Ток фазы А i_A может быть представлен рядом вейвлет аппроксимирующих $i_{A,j,k}^A$ и детализирующих $i_{A,j,k}^D$ коэффициентов, состоящих из k элементов уровня разложения j :

$$i_A(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} i_{Aj,k}^A \varphi_{j,k}(t) + \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} i_{Aj,k}^D \psi_{j,k}(t). \quad (2.16)$$

Подставляя в уравнение (2.15) дискретные вейвлет коэффициенты тока (2.16) для производной (при малых значениях Δt) отдельно для последовательности аппроксимирующих и детализирующих коэффициентов получим:

$$\begin{aligned} \frac{\sum_{k=-\infty}^{\infty} i_{Aj,k}^A \varphi_{j,k}(t) - \sum_{k=-\infty}^{\infty} i_{Aj,k}^A \varphi_{j,k}(t - \Delta t)}{\Delta t} + \frac{\omega(R_T + R_L)}{X_T + X_L} \left(\sum_{k=-\infty}^{\infty} i_{Aj,k}^A \varphi_{j,k}(t) \right) = \\ = \frac{\omega}{X_T + X_L} \left(\sum_{k=-\infty}^{\infty} u_{j,k}^A \varphi_{j,k}(t) \right), \end{aligned} \quad (2.17)$$

$$\begin{aligned} \frac{\sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} i_{Aj,k}^D \psi_{j,k}(t) - \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} i_{Aj,k}^D \psi_{j,k}(t - \Delta t)}{\Delta t} + \frac{\omega(R_T + R_L)}{X_T + X_L} \left(\sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} i_{Aj,k}^D \psi_{j,k}(t) \right) = \\ = \frac{\omega}{X_T + X_L} \left(\sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} u_{j,k}^D \psi_{j,k}(t) \right). \end{aligned} \quad (2.18)$$

где вейвлет $\varphi_{j,k}(t)$ и масштабирующая функция $\psi_{j,k}(t)$ также должны полностью «перекрыть» весь исследуемый промежуток времени Δt :

$$\begin{aligned} \varphi_{j,k}(t) = a_0^{-j/2} \varphi[a_0^{-j} t - kb_0] \quad \varphi_{j,k}(t) = a_0^{-j/2} \varphi[a_0^{-j} (t - \Delta t) - kb_0], \\ \psi_{j,k}(t) = a_0^{-j/2} \psi[a_0^{-j} t - kb_0] \quad \psi_{j,k}(t) = a_0^{-j/2} \psi[a_0^{-j} (t - \Delta t) - kb_0]. \end{aligned} \quad (2.19)$$

Разработанный в настоящей диссертационной работе алгоритм реализуется в следующем порядке (рисунок 2.10):

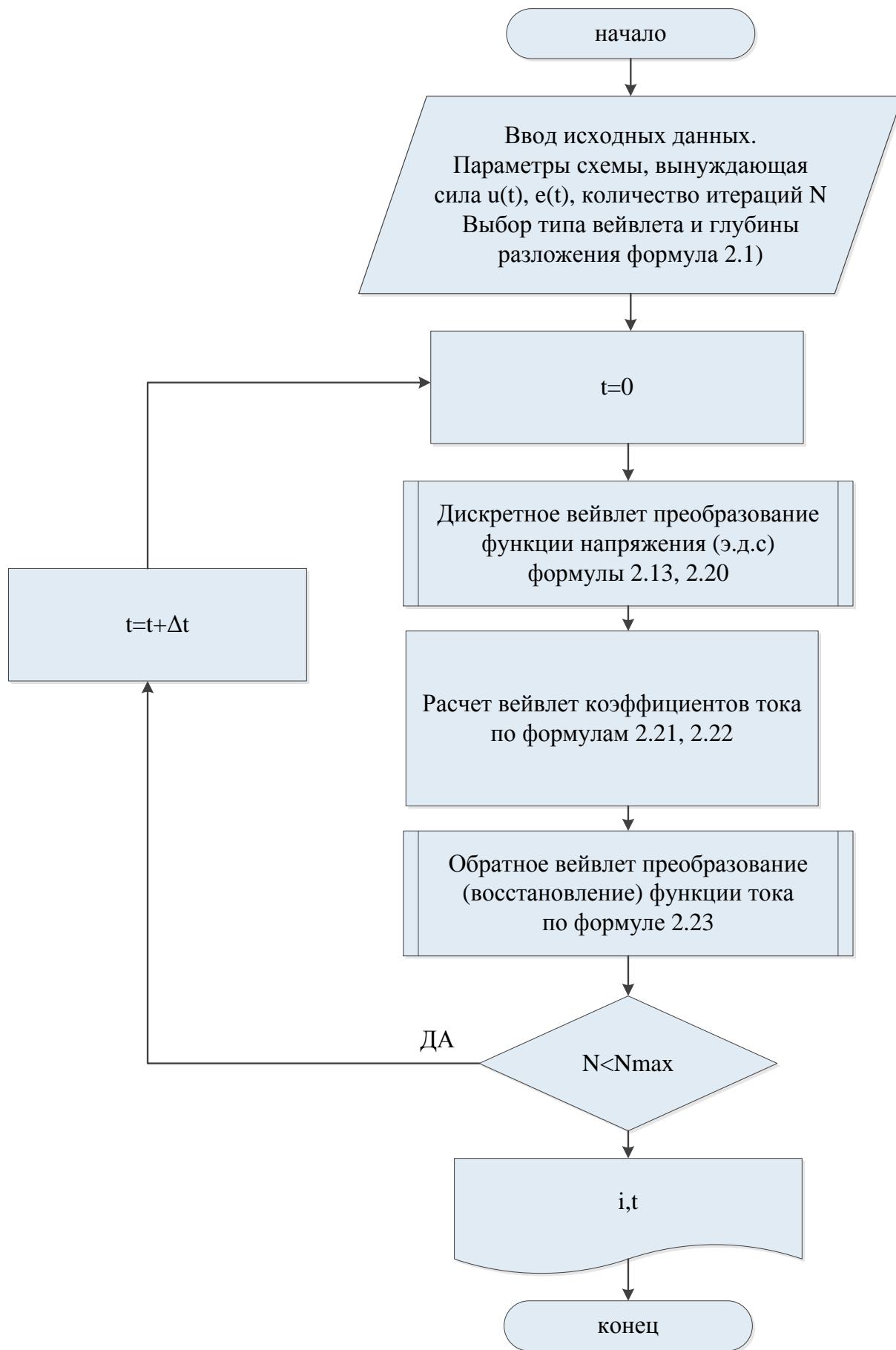


Рисунок 2.10 – Рекурсивный алгоритм расчета переходного процесса

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 (2.1). 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 строка, 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 (2.20). При этом последовательность аппроксимирующих $u_{j,0}^A$ и детализирующих $u_{j,0}^D$ вейвлет коэффициентов уровня разложения j становится в два раза меньше исходной последовательности напряжения ($n/2$). При реализации разложения уровня $j+1$ последовательности вейвлет коэффициентов будут уменьшаться в 2 раза.

$$\begin{vmatrix} h_0 & h_1 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & h_0 & h_1 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & h_0 & h_1 \\ g_0 & g_1 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g_0 & g_1 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & g_0 & g_1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} u_0 \\ u_1 \\ u_2 \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ u_{n-1} \\ u_n \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} u_{j,0}^A \\ u_{j,1}^A \\ \dots \\ u_{j,n/2}^A \\ u_{j,0}^D \\ u_{j,1}^D \\ \dots \\ u_{j,n/2}^D \end{vmatrix}. \quad (2.20)$$

Шаг 3. Расчет вейвлет коэффициентов тока цепи рекурсивным методом – для расчета последующего вейвлет коэффициента $i_{Aj,k}^A$ используется предыдущий коэффициент $i_{Aj,k-1}^A$ (некий аналог рекурсивного алгоритма вычисления факториала). Из уравнений (2.17-2.18) для каждого коэффициента k уровня разложения j можно записать:

$$i_{Aj,k}^A = \frac{\frac{\omega}{X_T + X_L} u_{j,k}^A + \Delta t \cdot i_{Aj,k-1}^A}{\Delta t + \frac{\omega(R_T + R_L)}{X_T + X_L}}, \quad (2.21)$$

$$i_{Aj,k}^D = \frac{\frac{\omega}{X_T + X_L} u_{j,k}^D + \Delta t \cdot i_{Aj,k-1}^D}{\Delta t + \frac{\omega(R_T + R_L)}{X_T + X_L}}. \quad (2.22)$$

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 .

$$\begin{vmatrix} H_0 & 0 & \dots & 0 & G_0 & 0 & \dots & 0 \\ H_1 & 0 & \dots & 0 & G_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & H_0 & \dots & 0 & 0 & G_0 & \dots & 0 \\ 0 & H_1 & \dots & 0 & 0 & G_1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots \\ \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & H_0 & 0 & 0 & \dots & G_0 \\ 0 & 0 & \dots & H_1 & 0 & 0 & \dots & G_1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} i_{Aj,0}^A \\ i_{Aj,1}^A \\ \dots \\ i_{Aj,n/2}^A \\ i_{Aj,0}^D \\ i_{Aj,1}^D \\ \dots \\ i_{Aj,n/2}^D \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} i_0 \\ i_1 \\ \dots \\ i_{n-1} \\ i_n \end{vmatrix}. \quad (2.23)$$

Шаг 5. Осуществляется переход к следующему интервалу времени $t=t+\Delta t$. Производится пересчет значений вейвлета и масштабирующей функции по формулам (2.19). Цикл повторяется до достижения заданного числа итераций.

В соответствии с разработанным алгоритмом в настоящей диссертационной работе произведен расчет тока трехфазного короткого замыкания для фазы А (аналитическое решение записано в уравнении 2.10). Для численного эксперимента был выбран интервал времени $\Delta t=0,02 \text{ мс}=0,0002 \text{ с}$.

На первом шаге расчета (рисунок 2.11 а) ток короткого замыкания численно равен вынуждающей силе (напряжению). Далее следуя по рекурсивному алгоритму происходит вычисление функции тока в следующем приближении.

Характер изменения тока короткого замыкания, вычисленного по предложенному рекурсивному алгоритму для 200 итераций представлен на рисунке 2.11 б.

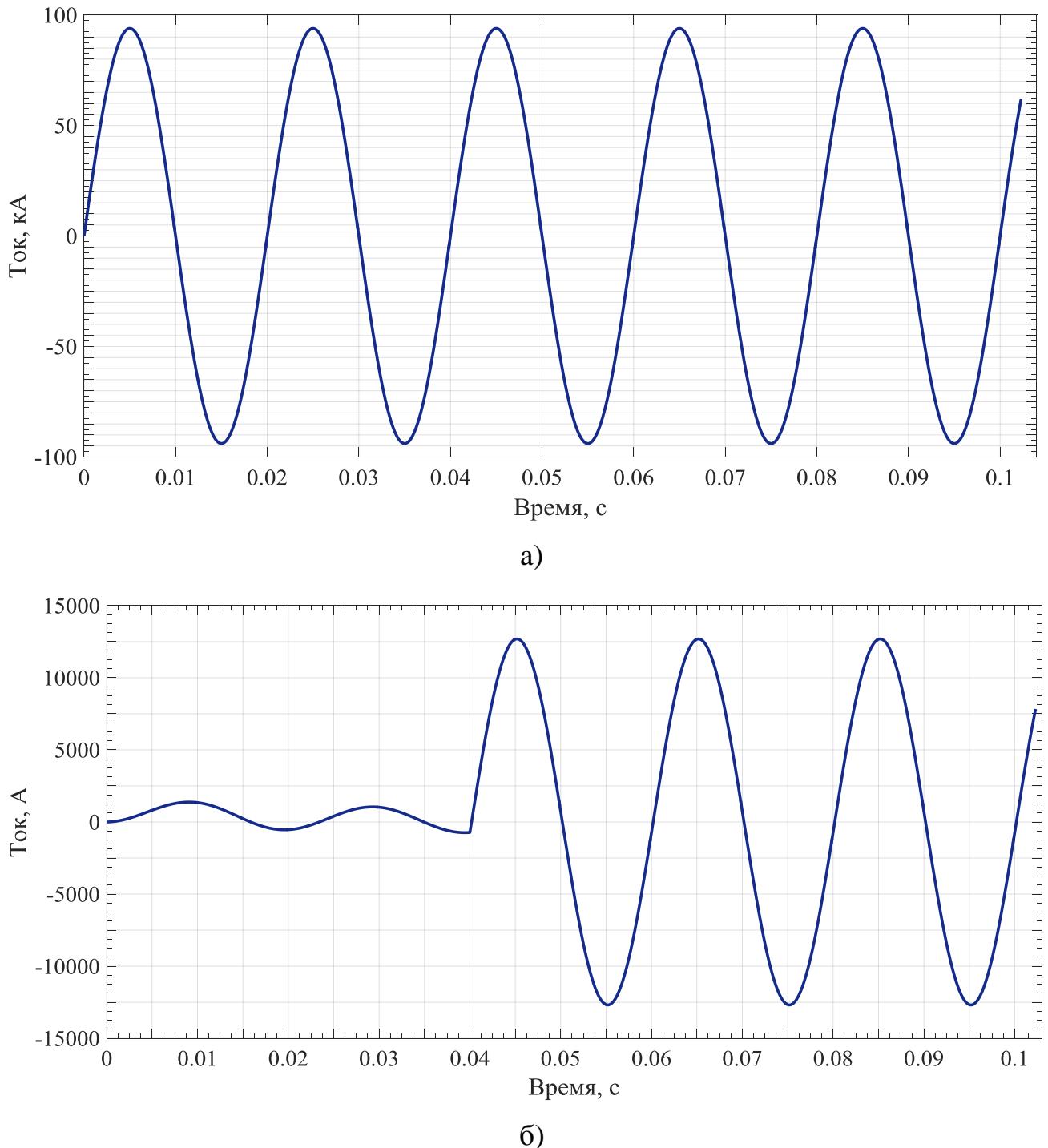


Рисунок 2.11 – Расчетный ток КЗ а) в первом приближении; б) после 200 итераций

Операция продолжается до количества итераций $N=600$. Графики расчетного тока короткого замыкания для 400 и 600 итераций (окончание расчета) представлены на рисунках 2.12 а и б соответственно.

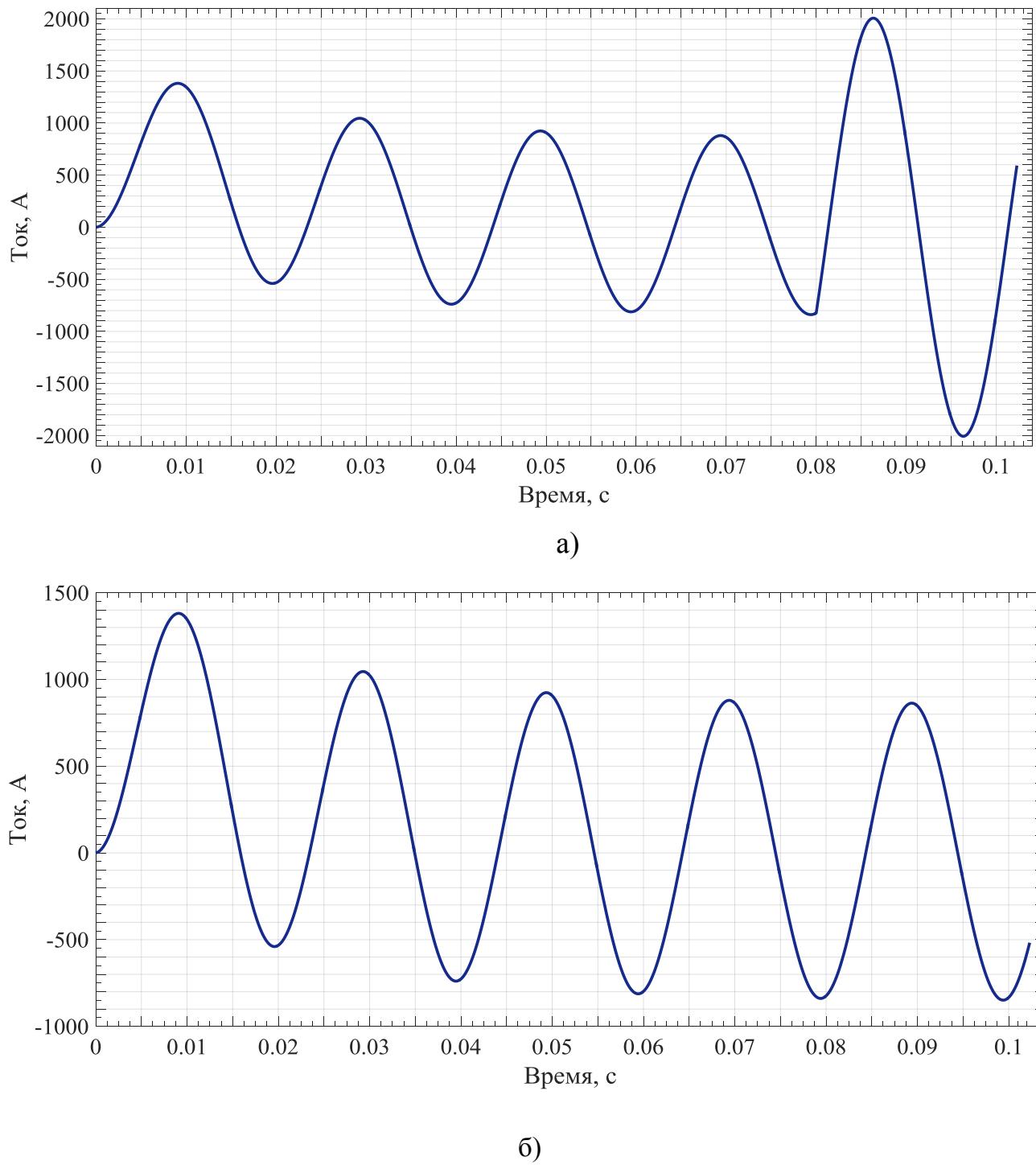


Рисунок 2.12 – Расчетный ток К3 а) после 400 итераций; б) после 600 итераций
(окончание цикла)

Для анализа точности предложенного алгоритма построим график абсолютной погрешности (рисунок 2.13) вычисления тока короткого замыкания по вейвлет коэффициентам и аналитического выражения (2.10). Как видно, на

рисунке 2.13 абсолютная погрешность не превысила 42 А. Относительная погрешность не превысила 3%.

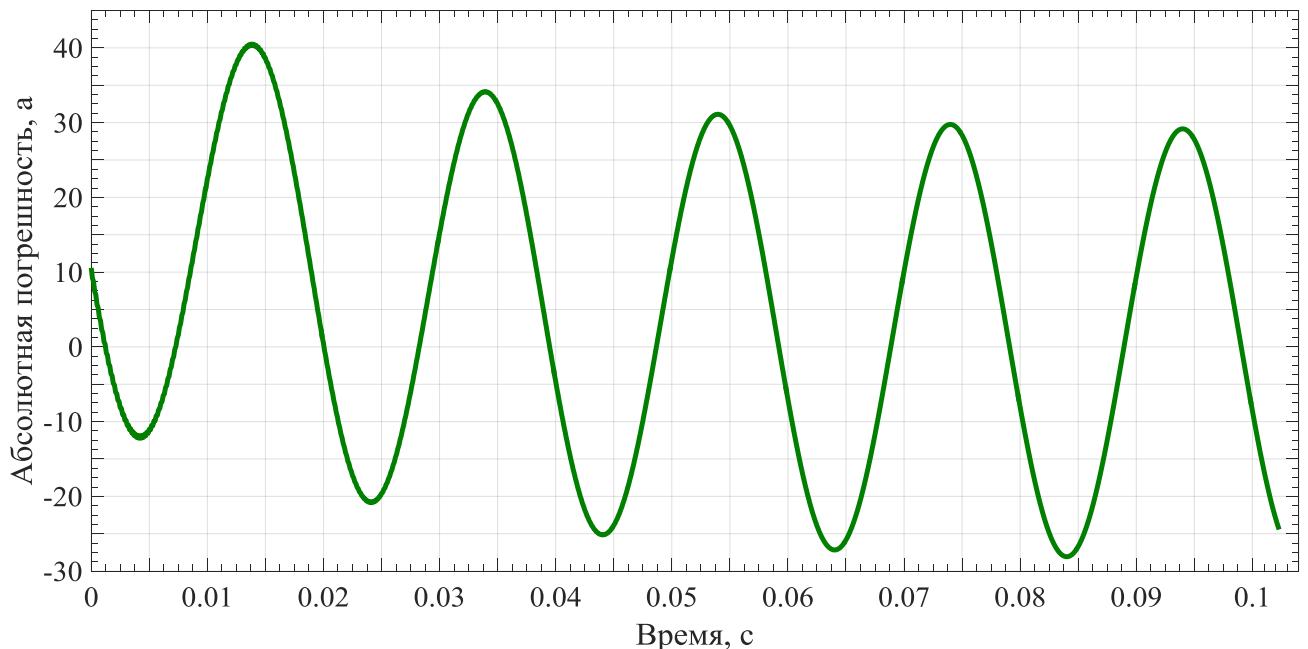


Рисунок 2.13 – Абсолютная погрешность вычисления тока КЗ по предложенному алгоритму

Среднеквадратическое отклонение σ составило 0,031 А.

Таким образом, можно заключить, что предложенный алгоритм позволяет с достаточной степенью точности производить расчет переходного процесса при трехфазном коротком замыкании. Расчет осуществляется по рекурсивному алгоритму, где в качестве исходных данных вместо мгновенных значений напряжения выступают коэффициенты дискретного вейвлет преобразования. Разработанный алгоритм может быть полезен для создания основ цифровой обработки данных о параметрах режима электроэнергетических систем в рамках развития технологии «цифровые подстанции». Информация о мгновенных значениях напряжений может в сжатом виде (см. параграф 2.3.1 настоящей диссертационной работы) передана в центр обработки цифровой информации, где с помощью предложенного алгоритма можно будет производить анализ процессов.

2.3.2 Модель для анализа переходного процесса при коммутации в цепях постоянного тока

Продемонстрируем эффективность работы предложенного в 2.2.1 рекурсивного алгоритма для анализа переходных процессов в цепях постоянного тока. Работа переключателя может быть представлена следующим порядком – в момент времени $t=100$ секунд переключатель занимает положение 1. В момент времени $t=200$ секунд переключатель переводится в положение 2.

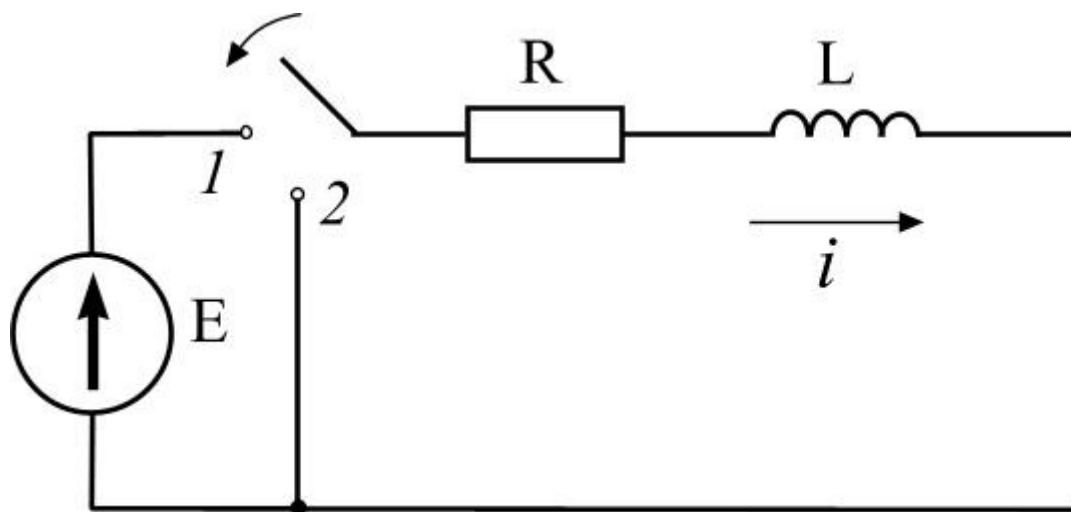


Рисунок 2.14 – Схема для расчета переходного процесса

Э.д.с. источника равна 1 В и в соответствии с представленным выше порядком изменения положения переключателя, напряжение, приложенное к RL ветви может быть описано следующей системой:

$$u(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < 100 \\ 1, & 100 \leq t \leq 200 \\ 0, & t > 200 \end{cases} \quad (2.24)$$

Выражению 2.24 соответствует функция напряжения, представленная на рисунке 2.15.

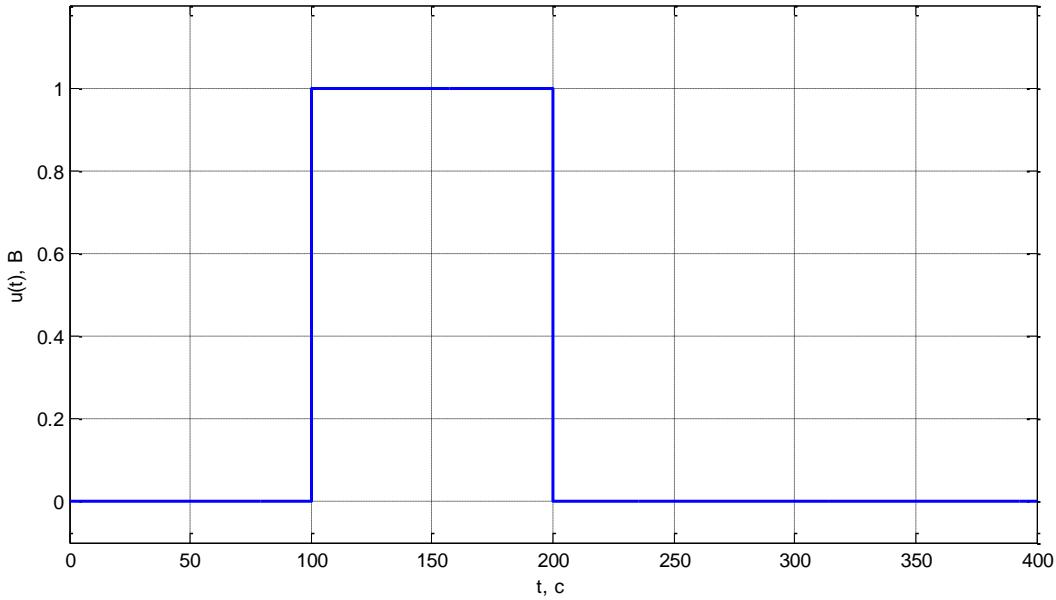


Рисунок 2.15 – Характер изменения напряжения

Для получения аналитического выражения переходного процесса исследуем каждый временной интервал в отдельности. На интервале $0 \leq t < 100$ в цепи отсутствует источник э.д.с., следовательно, ток равен нулю. В момент времени $t = 100$ замыкается ключ и начинается переходный процесс, с начальными условиями, установленными первым законом коммутации:

$$i_L(0_-) = i_L(0_+). \quad (2.25)$$

Для послекоммутационной схемы (переключатель занял положение 1) уравнение по второму закону Кирхгофа может быть записано:

$$E = Ri + L \frac{di}{dt}. \quad (2.26)$$

Решением данного однородного дифференциального уравнения является показательная функция вида:

$$i = Ae^{pt_0}, \quad (2.27)$$

где $A = \frac{E}{R}$, $p = -\frac{R}{L}$

Величина напряжения задана зависимостью (2.24), активное сопротивление и индуктивность для данной задачи определим как 0,01 Ом и 1 Гн соответственно.

Тогда, выражение (2.27) можно примет следующее значение:

$$i = \frac{E}{R} - \frac{E}{R} e^{-\frac{R}{L}(t-100)} = \frac{1}{0,01} - \frac{1}{0,01} e^{-\frac{0,01}{1}(t-100)} = 100 - 100e^{-0,01(t-100)}. \quad (2.28)$$

Так как начало переходного процесса t_0 совпадает по условию с моментом времени $t = 100$ в показателе степени принимаем $t_0 = (t - 100)$.

Решение уравнения (2.28) дает картину характера увеличения тока в цепи по экспоненциальному закону на интервале времени $100 \leq t \leq 200$, представленную на рисунке 2.16.

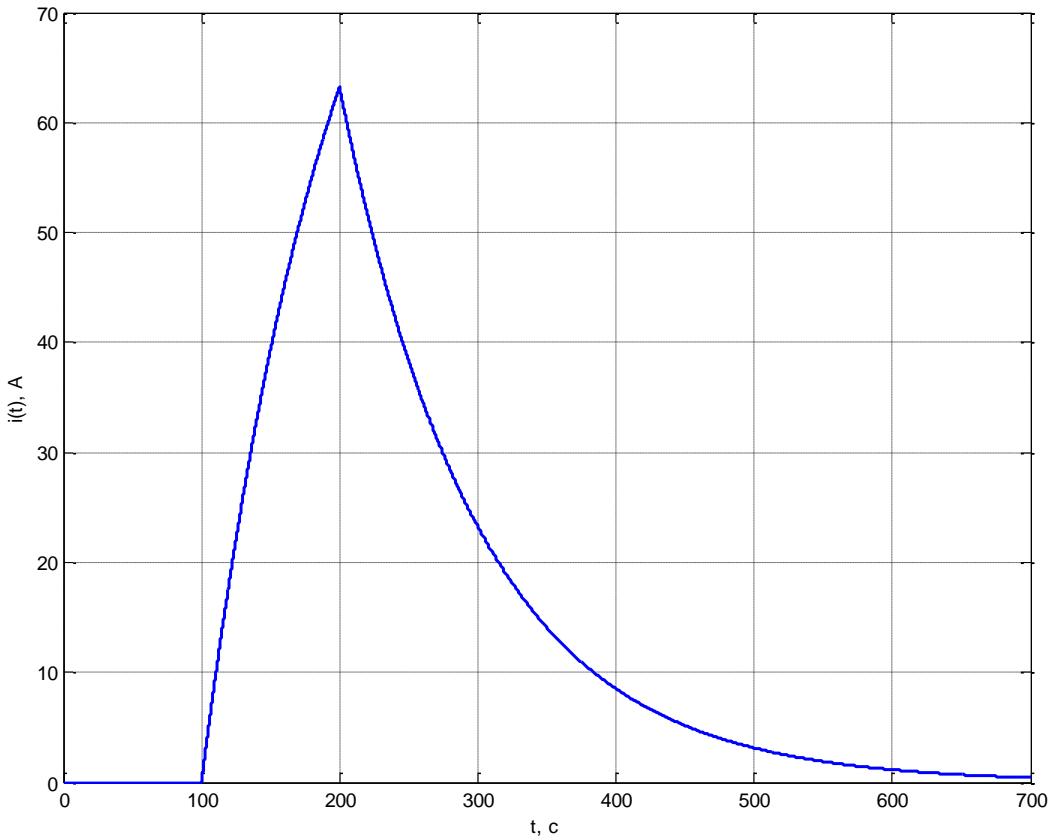


Рисунок 2.16 – Характер изменения тока цепи

В момент отключения источника э.д.с. ($t = 200$) величина тока цепи может быть рассчитана по выражению:

$$i_{(t=200)} = \frac{E}{R} - \frac{E}{R} e^{-\frac{R}{L}(t-100)} = 100 - 100e^{-0.01(200-100)} = 100 - 36.79 = 63.21(A)$$

Это значение тока будет являться начальным условием для анализа переходного процесса на временнóм интервале $t > 200$.

В момент времени $t = 200$ переключатель переводится в положение «2» и для послекоммутационной схемы уравнение по второму закону Кирхгофа может быть записано:

$$0 = Ri + L \frac{di}{dt}. \quad (2.29)$$

Решение данного дифференциального уравнения имеет вид:

$$i = i_{(t=200)} e^{-\frac{R}{L}(t-200)} = 63.21 e^{-0.01(t-200)}$$

Далее произведем анализ переходного процесса с применением алгоритма, предложенного в параграфе 2.2.1 настоящей диссертации. Электродвижущая сила источника может быть представлена в виде суммы аппроксимирующих и детализирующих коэффициентов j -го уровня разложения

$$e(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} e_{j,k}^A \varphi_{j,k}(t) + \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} e_{j,k}^D \psi_{j,k}(t). \quad (2.30)$$

Уравнение (2.26) с учетом (2.30) следует переписать в виде:

$$\frac{i(t) - i(t + \Delta t)}{\Delta t} + \frac{R}{L} i(t) = \frac{1}{L} \left(\sum_{k=-\infty}^{\infty} e_{j,k}^A \varphi_{j,k}(t) + \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} e_{j,k}^D \psi_{j,k}(t) \right). \quad (2.31)$$

Отдельно для последовательности аппроксимирующих и детализирующих коэффициентов получим:

$$\frac{1}{\Delta t} \sum_{k=-\infty}^{\infty} i_{j,k}^A \varphi_{j,k}(t) - \sum_{k=-\infty}^{\infty} i_{j,k}^A \varphi_{j,k}(t - \Delta t) + \frac{R}{L} \sum_{k=-\infty}^{\infty} i_{j,k}^A \varphi_{j,k}(t) = \frac{1}{L} \sum_{k=-\infty}^{\infty} e_{j,k}^A \varphi_{j,k}(t), \quad (2.32)$$

$$\frac{1}{\Delta t} \sum_{k=-\infty}^{\infty} i_{j,k}^D \varphi_{j,k}(t) - \sum_{k=-\infty}^{\infty} i_{j,k}^D \varphi_{j,k}(t - \Delta t) + \frac{R}{L} \sum_{k=-\infty}^{\infty} i_{j,k}^D \varphi_{j,k}(t) = \frac{1}{L} \sum_{k=-\infty}^{\infty} e_{j,k}^D \varphi_{j,k}(t). \quad (2.33)$$

Для нахождения коэффициента k уровня разложения j можно записать:

$$i_{j,k}^A = \frac{\frac{1}{L} e_{j,k}^A + \Delta t \cdot i_{j,k-1}^A}{\Delta t + \frac{R}{L}}, \quad (2.34)$$

$$i_{j,k}^D = \frac{\frac{1}{L} e_{j,k}^D + \Delta t \cdot i_{j,k-1}^D}{\Delta t + \frac{R}{L}}. \quad (2.35)$$

Последовательность операций, представленная в описании алгоритма в 2.2.1 и на рисунке 2.10 сохраняется. В результате расчета по рекурсивному алгоритму получаем ток переходного процесса при различных количествах итераций (рисунок 2.17–2.18).

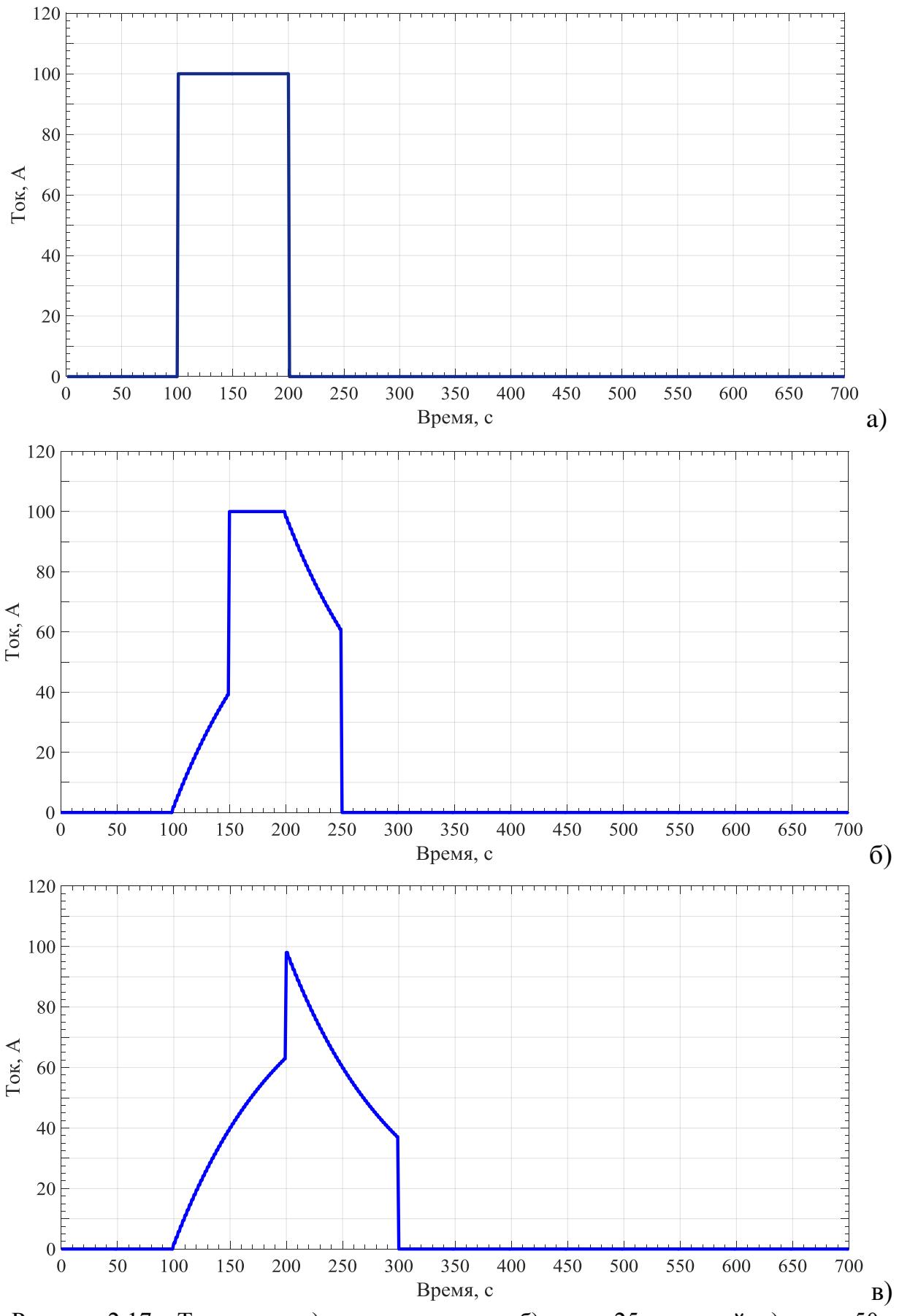
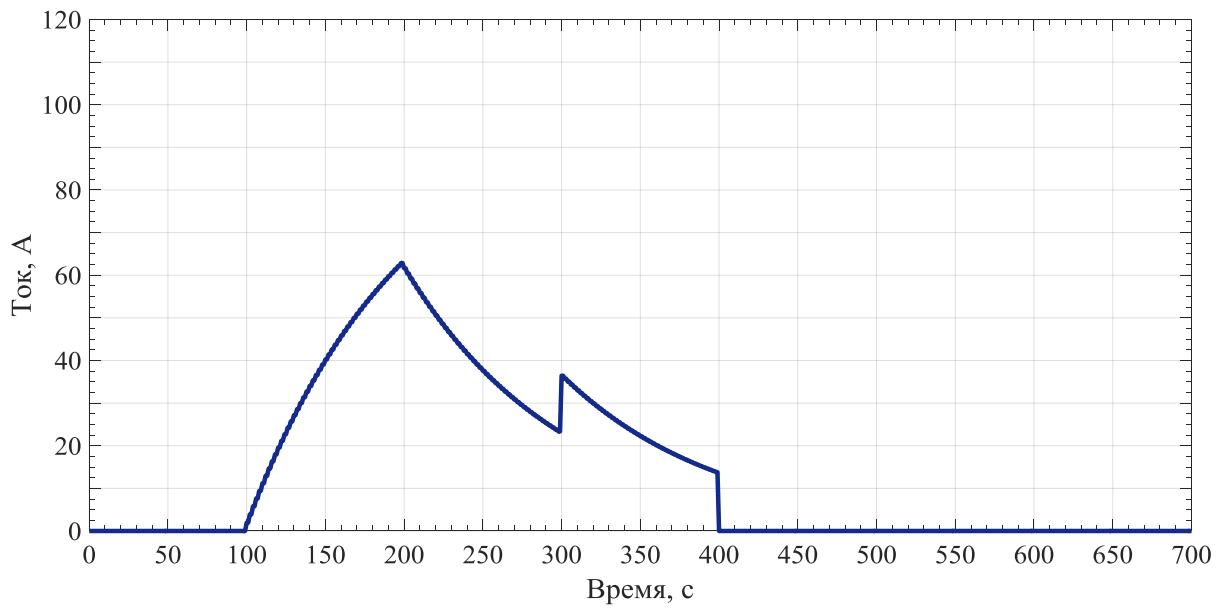
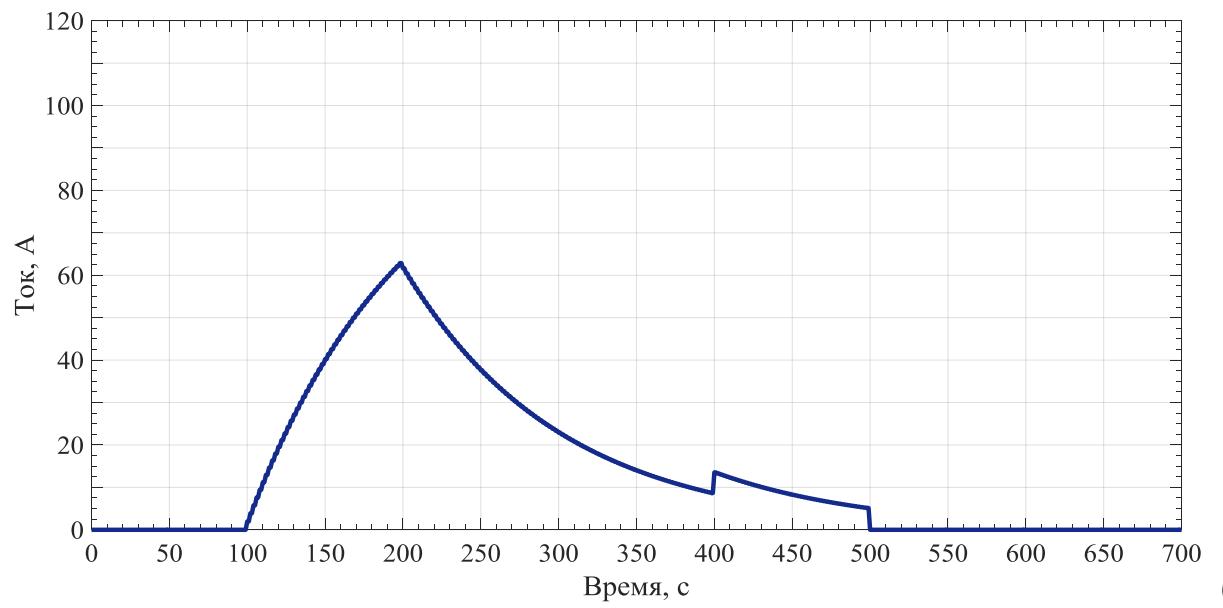


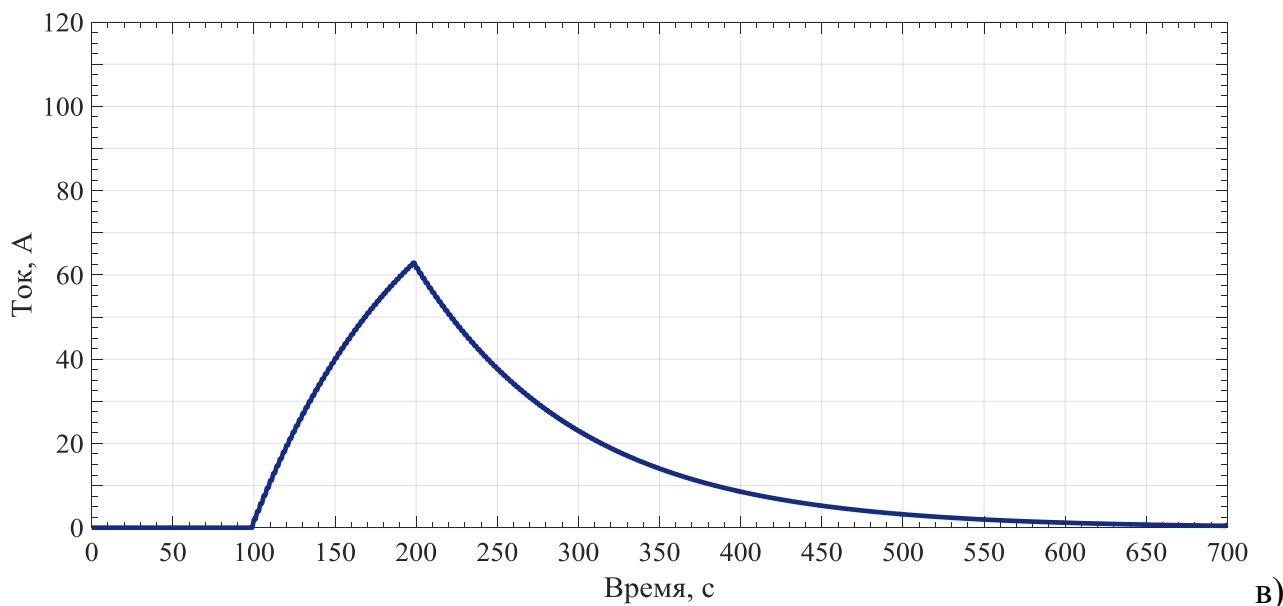
Рисунок 2.17 – Ток в цепи а) в начале расчета; б) после 25 итераций; в) после 50 итераций



а)



б)



в)

Рисунок 2.18 – Ток в цепи а) после 100; б) после 150; в) после 300 итераций

2.3.3 Модель для анализа переходного процесса при коммутации в цепях переменного тока

Для простейшей цепи переменного тока, представленной на рисунке 2.19 представим принцип работы предлагаемого рекурсивного алгоритма на основе вейвлет преобразования мгновенных значений токов и напряжений.

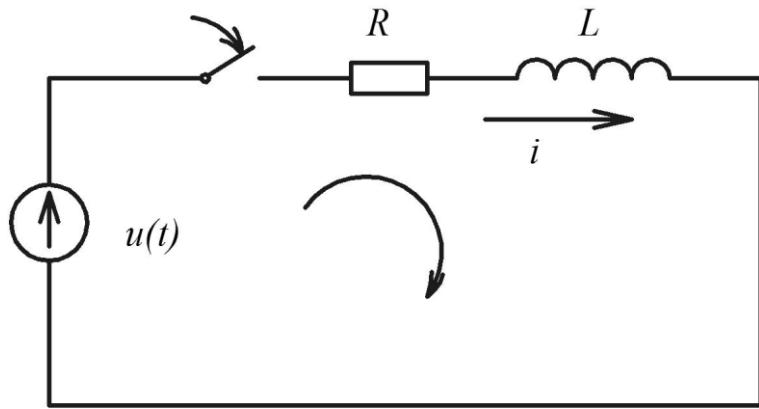


Рисунок 2.19 – Простейшая цепь для анализа переходного процесса методом ВП

Напряжение источника может быть выражено через вейвлет коэффициенты:

$$u(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} u_{j,k}^A \varphi_{j,k}(t) + \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} u_{j,k}^D \psi_{j,k}(t). \quad (2.36)$$

Отдельно для последовательности аппроксимирующих и детализирующих коэффициентов получим:

$$\frac{1}{\Delta t} \sum_{k=-\infty}^{\infty} i_{j,k}^A \varphi_{j,k}(t) - \sum_{k=-\infty}^{\infty} i_{j,k}^A \varphi_{j,k}(t - \Delta t) + \frac{R}{L} \sum_{k=-\infty}^{\infty} i_{j,k}^A \varphi_{j,k}(t) = \frac{1}{L} \sum_{k=-\infty}^{\infty} u_{j,k}^A \varphi_{j,k}(t), \quad (2.37)$$

$$\frac{1}{\Delta t} \sum_{k=-\infty}^{\infty} i_{j,k}^D \varphi_{j,k}(t) - \sum_{k=-\infty}^{\infty} i_{j,k}^D \varphi_{j,k}(t - \Delta t) + \frac{R}{L} \sum_{k=-\infty}^{\infty} i_{j,k}^D \varphi_{j,k}(t) = \frac{1}{L} \sum_{k=-\infty}^{\infty} u_{j,k}^D \varphi_{j,k}(t). \quad (2.38)$$

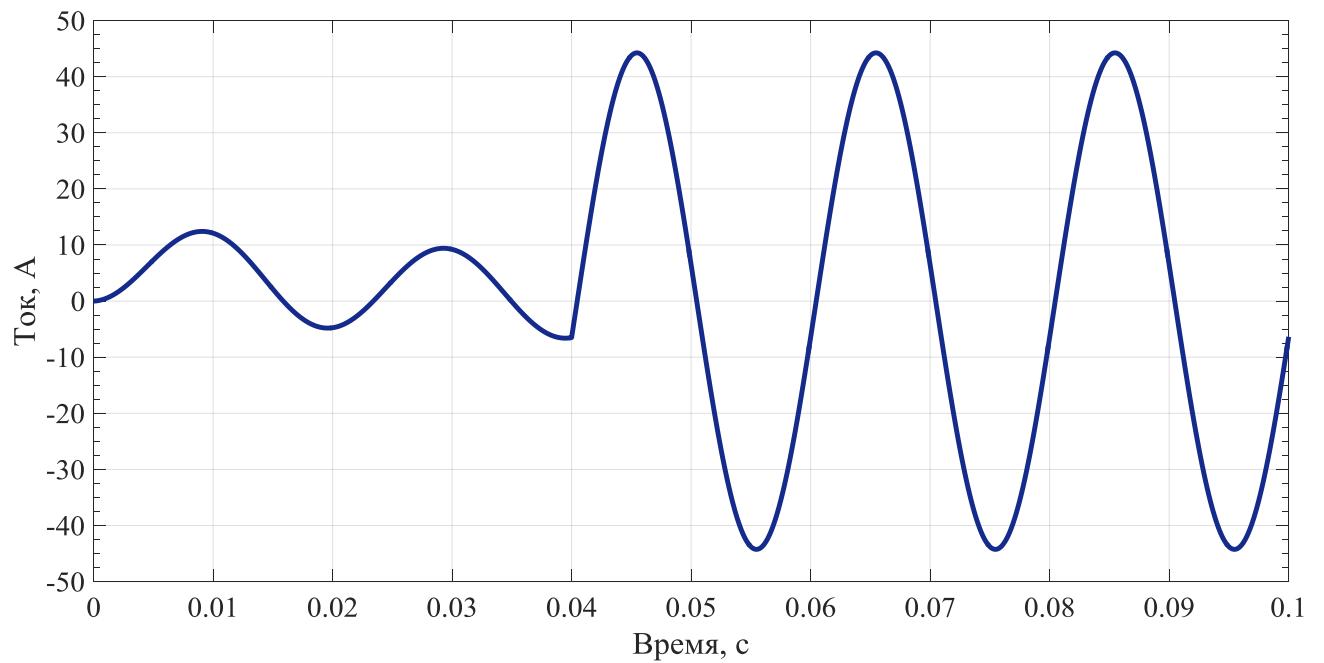


Рисунок 2.20 – Результаты рекурсии после 200 итераций

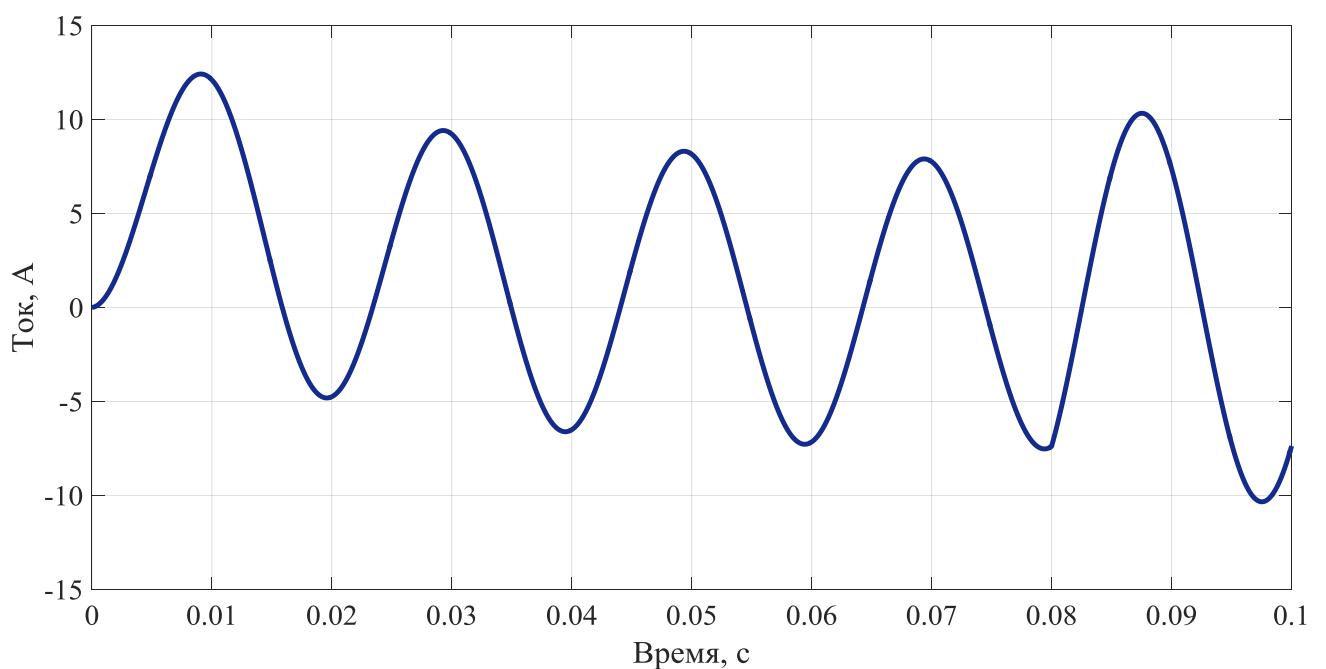


Рисунок 2.21 – Результаты рекурсии после 400 итераций

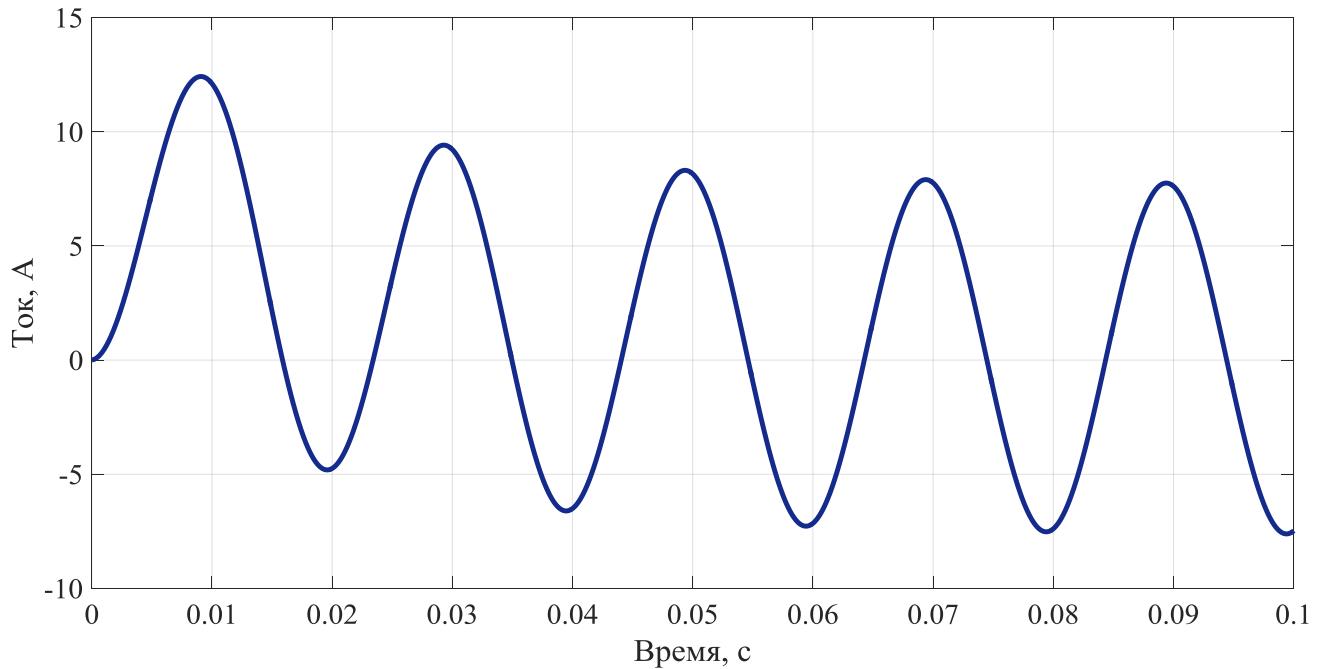


Рисунок 2.22 – Результаты рекурсии после 600 итераций

Более детально численное моделирование переходного процесса с использованием рекурсивного алгоритма по вейвлет коэффициентам представлено в статье соискателя [243].

2.4 Методы анализа качества электроэнергии с помощью вейвлет преобразования

2.4.1 Анализ токов трехфазного короткого замыкания

Представим метод анализа токов трехфазного короткого замыкания с помощью непрерывного и дискретного вейвлет преобразования. На рисунке 2.7 представлен фрагмент схемы электроснабжения ПС 110/35/6 Нефтеюганская. График функции тока трехфазного КЗ, полученный аналитически, представлен на рисунке 2.8

В настоящей главе анализ режима короткого замыкания с помощью вейвлет преобразования предлагается проводить в следующем порядке.

Шаг. 1. Непрерывное вейвлет преобразование исследуемого сигнала тока.

Скалограмма непрерывного вейвлет преобразования представляет собой (рисунок 2.23) визуальный способ отображения локальной энергии коэффициентов в осях масштаб-время. Ось масштаба может быть легко трансформирована в ось частот, но поскольку в исследуемом процессе отсутствуют ВГ, поэтому ось масштаба оставим без изменения. На скалограмме отсутствуют контуры предшествующего тока, вследствие малости амплитуды (64А против 860А установившегося периодического тока).

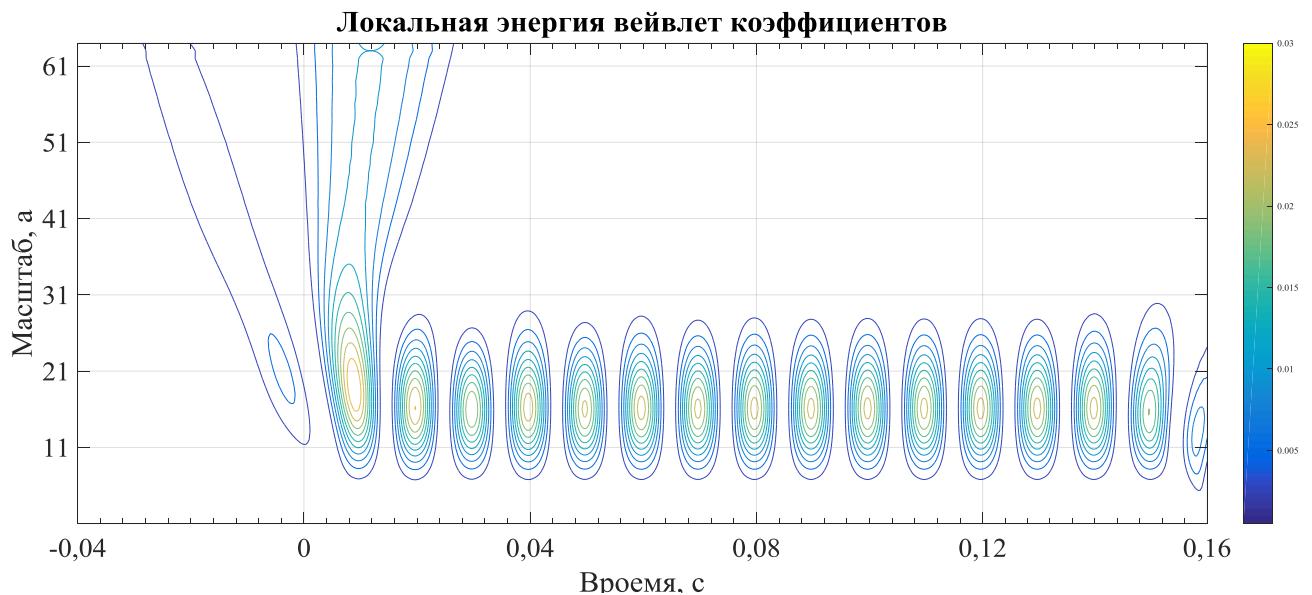


Рисунок 2.23 – Скалограмма непрерывного ВП тока короткого замыкания

В момент возникновения короткого замыкания ($t=0$) наблюдается резкое увеличение энергии спектра, что соответствует ударному току на рисунке 2.9.

Шаг. 2. Выбор схемы и глубины разложения сигнала тока (напряжения) методом дискретного вейвлет преобразования.

Схема и глубина максимального уровня разложения дискретного вейвлет преобразования определяется исключительно частотой дискретизации сигнала. В соответствии с развитием технологии «цифровые подстанции» стандарт МЭК 61850-9-2 предусматривает протокол передачи мгновенных значений тока и напряжения. Протокол МЭК 61850-9-2 предусматривает два параметра, определяющие частоту дискретизации. Первый параметр задает частоту кадров с мгновенными значениями (Sample Rate). Второй определяет количество измерений в одном кадре (Number of ASDU). В результате частота дискретизации

сигнала будет определяться $F_d = \text{Sample Rate} / \text{Number of ASDU}$. Например, если за период частота выборок $\text{Sample Rate} = 80$, а количество мгновенных значений в одном кадре $\text{Number of ASDU} = 1$, то частота дискретизации составит 4 кГц .

Допустим с применением технологии «цифровая подстанция» производится обработка мгновенных значений тока короткого замыкания (рисунок 2.9) при частоте дискретизации $3,2 \text{ кГц}$. На интервале времени $0,2$ секунды ($-0,04 \leq t \leq 0,16$) количество мгновенных значений тока при заданной частоте дискретизации составит $N = 0,2 \cdot 3200 = 640$ точек. В соответствии с теоремой Котельникова при частоте дискретизации $3,2 \text{ кГц}$ без потерь можно передавать (получать) сигнал с максимальной частотой 1600 Гц . Таким образом исходный сигнал тока короткого замыкания будет содержать в себе спектр возможных частот от 0 до 1600 Гц (рисунок 2.24). После прохождения сигналом фильтров нижних и высоких частот, а также в результате процедуры децимации получаем коэффициенты A_1 (аппроксимирующий) и D_1 (детализирующий), соответствующие первому уровню разложения. Далее процедура продолжается в отношении аппроксимирующих сигналов (рисунок 2.24). Проводить разложение дальше, после уровня 4 не имеет практического смысла, поскольку основной сигнал заключен в диапазоне $0 \leq f \leq 100 \text{ Гц}$. На 4 уровне разложения каждый коэффициент имеет длину – 40 точек. Теоретически процедура разложения могла быть продолжена вплоть до достижения коэффициентов размерности в одно значение.

Шаг 3. Выбор оптимального типа вейвлета.

Оцифрованные значения токов и напряжений должны передаваться по информационной сети. При этом должны выполняться требования передачи цифрового потока информации с высокой частотой, что неизменно влечет за собой увеличение объемов информации, передаваемых по сети. Уменьшение частоты дискретизации передаваемых сигналов не позволит в должной степени (в соответствии с теоремой Котельникова) производить оценку качества электроэнергии. Методы вейвлет преобразования позволяют сжимать объемы данных нестационарных процессов, после чего с достаточной степенью точности

(при известных коэффициентах фильтра вейвлета) восстанавливать исследуемый сигнал.

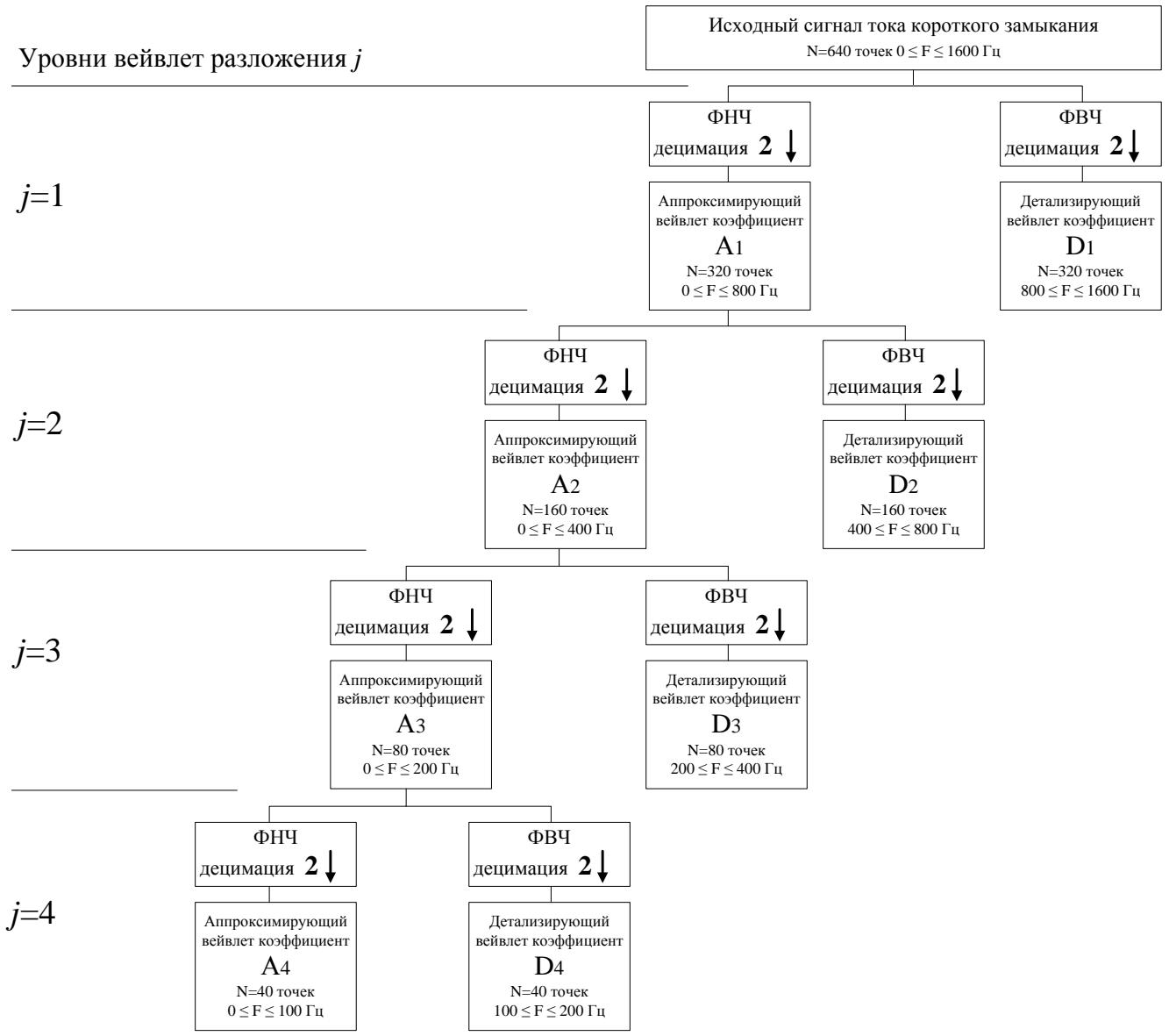


Рисунок 2.24 – Схема дискретного ВП для анализа тока КЗ

В соответствии с предложенным в главе 1 критерием выбора оптимального вейвлета (формула 2.1) необходимо учитывать два фактора. Спектр локальной энергии в частотном коридоре должен быть максимальным, а среднеквадратичное отклонение исходного и восстановленного (после вейвлет преобразования) сигнала должно быть сведено к минимуму.

Произведем процедуру вейвлет разложения исходного сигнала тока короткого замыкания по схеме (рисунок 2.24) с применением 10 различных типов вейвлетных функций (таблица 2.1). Локальная энергия спектра вейвлет коэффициентов j -го уровня разложения, представляющих собой вектор-строки из k элементов может быть определена по формулам:

$$\begin{aligned} E_{j,k}^A &= \sum_{k=-\infty}^{\infty} (i_{j,k}^A \varphi_{j,k}(t))^2, \\ E_{j,k}^D &= \sum_{k=-\infty}^{\infty} (i_{j,k}^D \psi_{j,k}(t))^2. \end{aligned} \quad (2.39)$$

Суммарная энергия спектра должна определяться по формуле:

$$E_{\Sigma} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} |i_{j,k}^A|^2 + \sum_{j=J}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} |i_{j,k}^D|^2. \quad (2.40)$$

В таблице 2.1 представлен расчет относительной величины энергии спектра для каждого вейвлет коэффициента (от энергии полного спектра), необходимого для полного восстановления сигнала A_4, D_4, D_3, D_2, D_1 . Для всех исследуемых типов вейвлетов энергия, сосредоточенная в частотном диапазоне от 0 до 100 Гц (аппроксимирующий коэффициент A_4) составила от 83 до 99 %. Если не брать в расчет интервал времени пока не затухнет апериодическая составляющая (от 0 до 0,06 секунды), сигнал действительно можно считать синусоидальным, изменяющимся с частотой 50 Гц.

Таблица 2.1. Энергия спектра и среднеквадратичное отклонение при восстановлении тока КЗ различными типами вейвлетов

Тип вейвлета	Энергия спектра коэффициентов, % от общей					Среднеквадратичное отклонение σ , А
	A4	D4	D3	D2	D1	
Хаара (haar)	83,37	12,26	3,32	0,85	0,2	0,4078
Добеши 2 (db2)	93,65	5,47	0,62	0,18	0,08	0,2520

Продолжение таблицы 2.1

Добеши 10 (db10)	99,13	0,62	0,14	0,06	0,05	0,0931
Добеши 24 (db24)	99,17	0,53	0,18	0,06	0,06	0,0909
Добеши 42 (db42)	99,22	0,47	0,18	0,09	0,04	0,0885
Симлет 4 (sym4)	97,76	1,81	0,23	0,12	0,08	0,1496
Симлет 12 (sym12)	99,03	0,61	0,19	0,1	0,07	0,1600
Симлет 20 (sym20)	99,12	0,54	0,19	0,1	0,05	0,1600
Койфлет 5 (coif5)	99,34	0,43	0,07	0,1	0,06	0,1600
Мейера (dmey)	99,19	0,49	0,18	0,09	0,05	0,1600

Для оценки эффективности степени сжатия данных с помощью алгоритма вейвлет преобразования произведем восстановление сигнала тока короткого замыкания по одиночной ветви вейвлет коэффициентов. Другими словами, для восстановления сигнала за основу примем аппроксимирующий коэффициент A_4 , остальные коэффициенты приравняем нулю. Коэффициент A_4 состоит из 40 элементов ($j=4, k=40$), графическая интерпретация представлена на рисунке 2.25. Аппроксимирующие коэффициенты, по сути являются грубым представлением исследуемого сигнала, где отсутствует информация о высокочастотных составляющих. Как видно из рисунка 2.25 первые 7 значений коэффициента A_4 представляют собой предшествующий ток (до возникновения КЗ), затем амплитуда вейвлет коэффициентов значительно возрастает, что прямо коррелируется с возросшей амплитудой ударного и установившегося тока короткого замыкания (когда затухнут свободные составляющие).

Исходный сигнал тока короткого замыкания состоял из 640 мгновенных значений. Вейвлет коэффициент A_4 , позволяющий произвести реконструкцию сигнала, состоит из 40 точек. Таким образом коэффициент сжатия сигнала тока короткого замыкания составил $640/40=16$ раз. Коэффициент сжатия является обязательным, но не достаточным условием для обоснования применения вейвлет преобразования для внедрения в систему учета энергопотребления с целью сжатия и последующего восстановления сигнала. Необходимо оценить качество

реконструкции. Для этого произведем оценку среднеквадратического отклонения исходного и восстановленного сигналов.

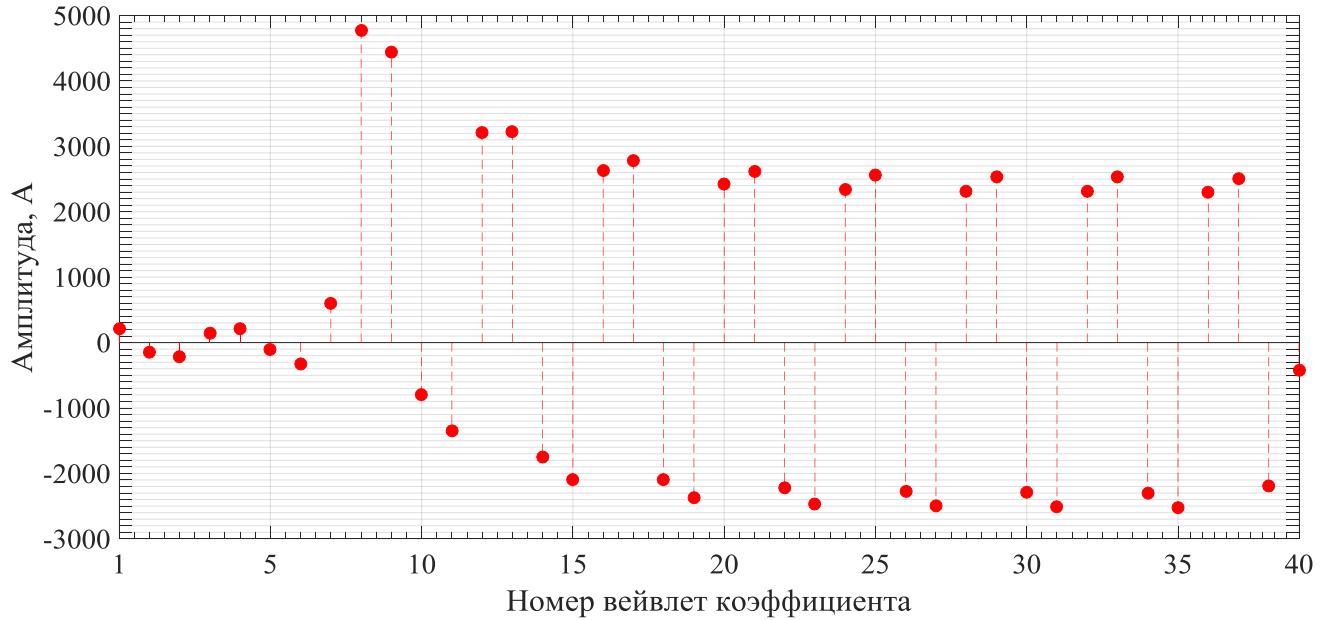


Рисунок 2.25 – Аппроксимирующие вейвлет коэффициенты A_4 ($N=40$)

Фрагмент схемы восстановления сигнала тока короткого замыкания по одиночной ветви вейвлет коэффициентов представлена на рисунке 2.26.

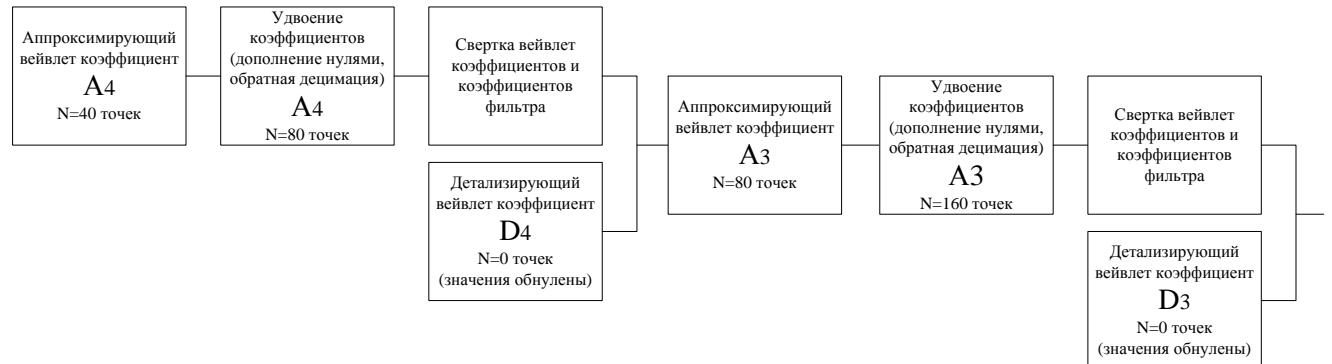


Рисунок 2.26 – Фрагмент схемы восстановления

На первоначальном этапе производится процедура удвоения количества коэффициентов – длина сигнала увеличивается в 2 раза за счет дополнения нулями. Теперь аппроксимирующий коэффициент A_4 состоит из 80 точек, далее производится свертка с коэффициентами фильтра заданного типа вейвлета. Необходимо отметить, что для достоверного восстановления сигнала процедура вейвлет разложения и вейвлет реконструкции должны осуществляться одним типом вейвлета. Детализирующие коэффициенты D_4 по условию задачи сжатия

данных обнулены. На выходе имеем аппроксимирующий коэффициент A_3 , состоящий из 80 точек. Продолжая процедуру аналогичным образом получаем исходный сигнал тока (640 точек), построенный только по коэффициентам A_4 .

В соответствии с схемой восстановления (рисунок 2.26) в настоящей диссертационной работе реализована процедура реконструкции с применением 10 различных типов вейвлетов. Пример восстановления с помощью вейвлета Хаара представлен на рисунке 2.27.

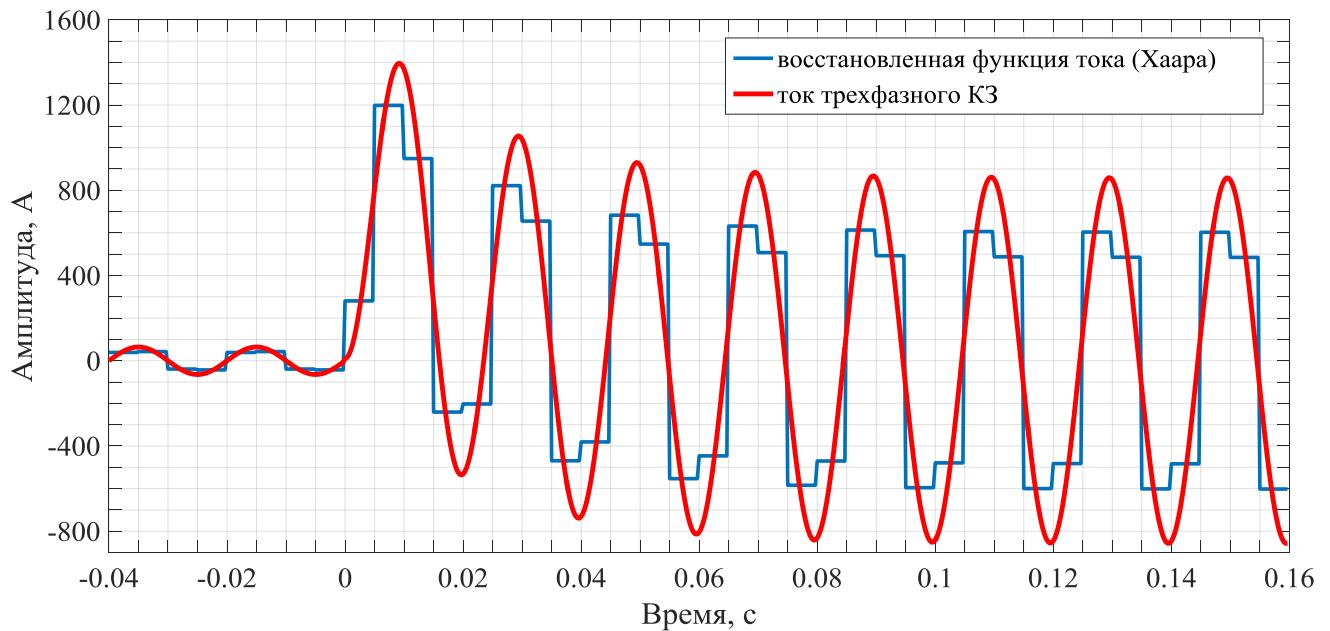


Рисунок 2.27 – Восстановление тока КЗ с помощью вейвлета Хаара

Невооруженным глазом видно, что восстановленный сигнал мгновенных значений тока короткого замыкания значительно отличается от тока, полученного аналитически (исходного сигнала). Количественно это можно выразить, определив среднеквадратичное отклонение по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (i_k - \hat{i}_k)^2}{\sum_{k=1}^n i_k^2}}. \quad (2.41)$$

Для вейвлета Хаара среднеквадратичное отклонение составило 0,4078 А что является наихудшим показателем среди анализируемых вейвлетов (таблица 2.1).

На рисунке 2.23 представлен результат восстановления тока КЗ с помощью вейвлета Добеши 2 порядка. Различие между двумя кривыми практически отсутствуют.

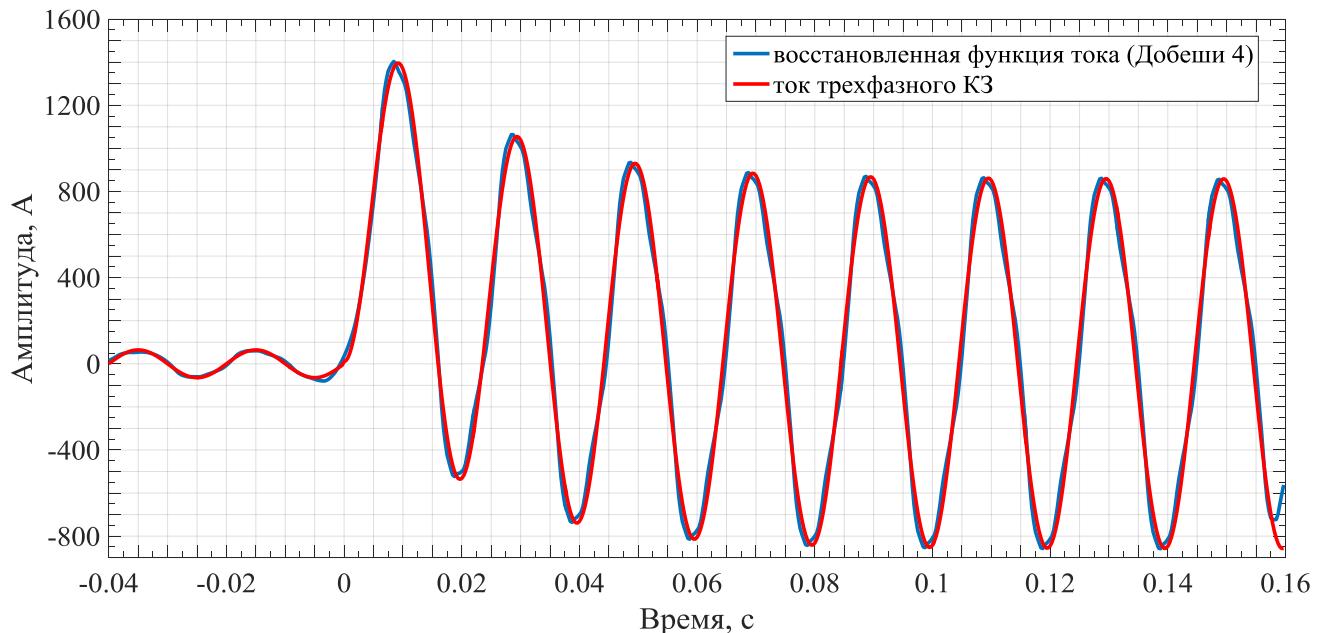


Рисунок 2.28 – Восстановление тока КЗ с помощью вейвлета Добеши 2

Для количественной оценки точности восстановления с помощью вейвлета Добеши 4 постоим график абсолютной погрешности (рисунок 2.29) между исходным и восстановленным сигналом $i_k - \hat{i}_k$. Для наглядности график построен в осях, аналогичных осям рисунка 2.28.

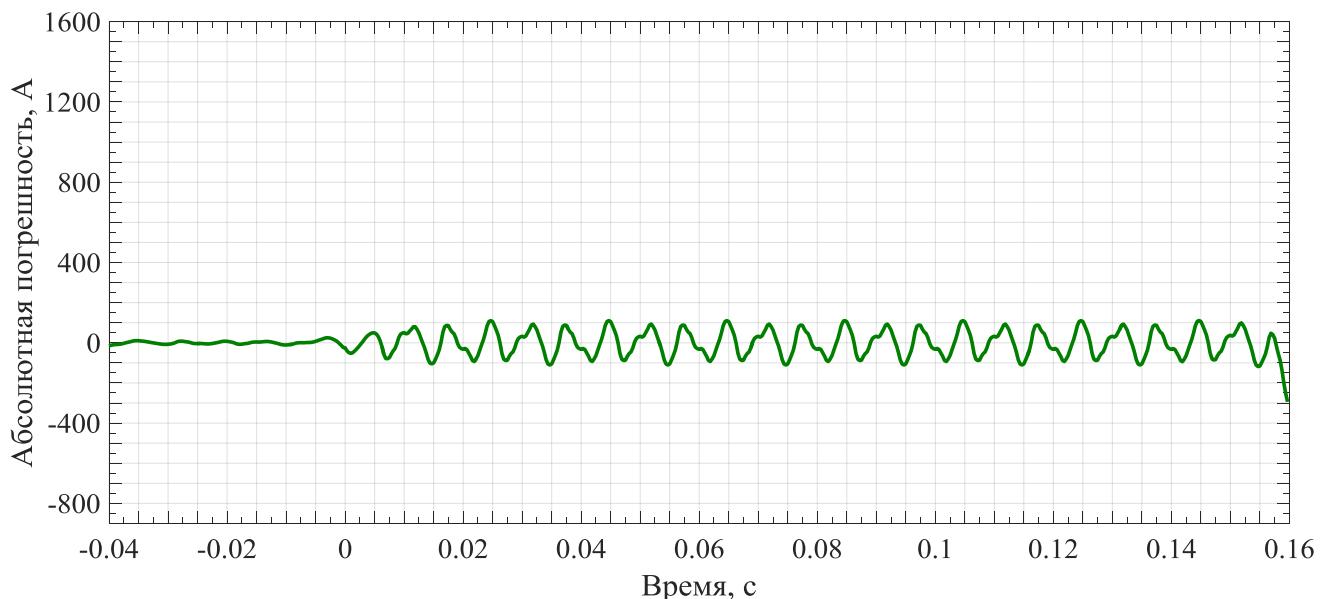


Рисунок 2.29 – Абсолютная погрешность восстановления вейвлетом Добеши 2

Как видно из рисунка 2.29 абсолютная погрешность при восстановлении ряда мгновенных значений тока короткого замыкания достигает 100 А. Среднеквадратическое отклонение составило 0,252 А. Построим зависимость абсолютной погрешности для вейвлета Добеши 10 (рисунок 2.30).

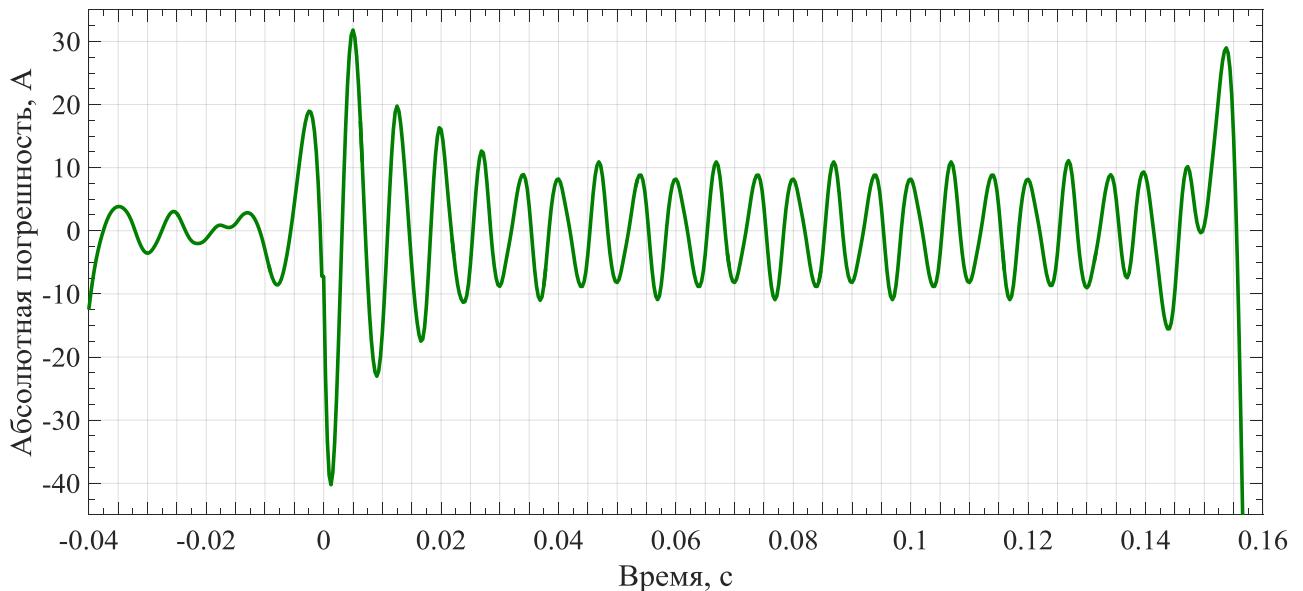


Рисунок 2.30 – Абсолютная погрешность восстановления вейвлетом Добеши 10

Абсолютная погрешность при восстановлении вейвлетом Добеши находится в пределах 40 А, а среднеквадратическое отклонение составило 0,0931. Относительная погрешность не превысила 3%.

На основании проведенного анализа, можно заключить, что мгновенные значения тока трёхфазного короткого замыкания могут быть подвергнуты процедуре вейвлет разложения с целью передачи цифрового потока данных в рамках программы «цифровая подстанция». Наиболее точные результаты восстановления были получены с помощью вейвлета Добеши 42 – среднеквадратическое отклонение составило 0,0885. Мгновенные значения тока (длина сигнала $N=640$) полученные на объекте измерения могут быть переданы в центр обработки результатов измерений в виде вейвлет коэффициентов A_4 четвертого уровня разложения (длина сигнала $N=40$), а затем восстановлены с достаточной степенью точности. Для восстановления сигнала необходимо передавать только матрицу вейвлет коэффициентов. Коэффициенты фильтра зависят от типа вейвлета и могут быть определены заранее.

2.4.2 Анализ коммутационных бросков тока

При коммутации батарей статических конденсаторов в случае неоптимальных условий бросок тока может достигать четырехкратной величины установившегося тока цепи – рисунок 2.31.

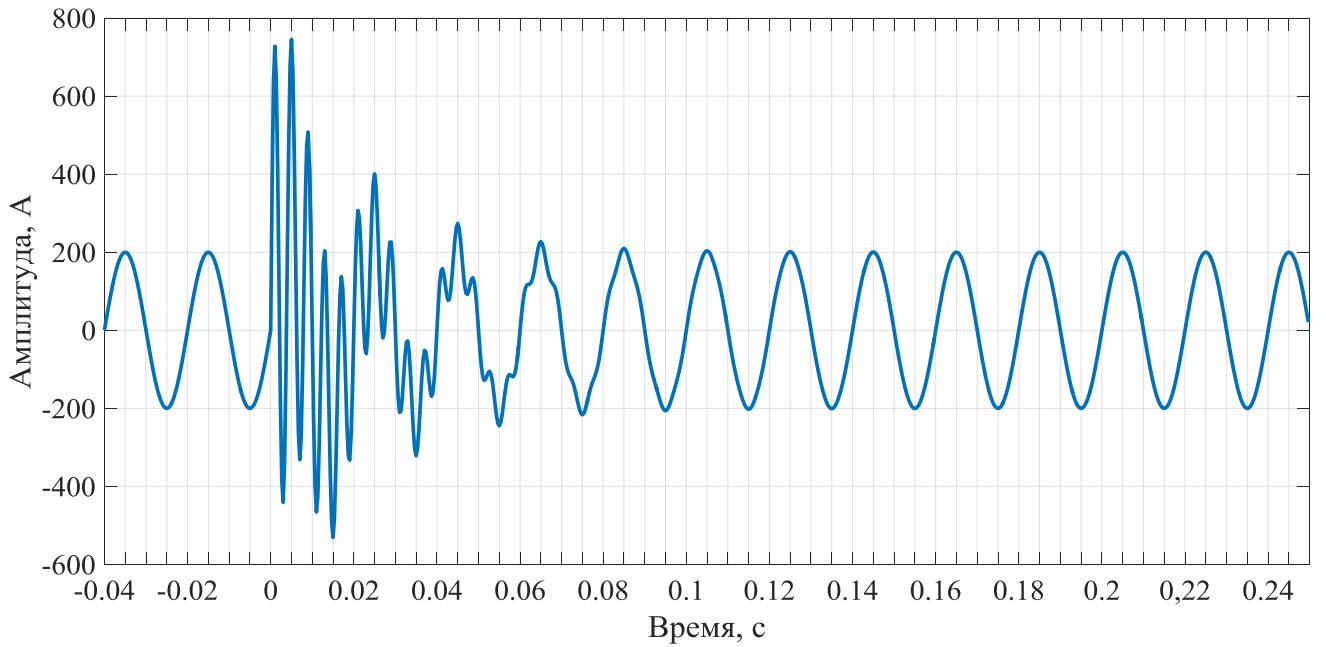


Рисунок 2.31 – Оциллограмма тока переходного процесса при коммутации БСК

В соответствии с представленным в параграфе 2.3.1 настоящей диссертационной работы сохраним порядок действий в предложенном методе анализа качества электроэнергии.

На первом этапе проводится непрерывное вейвлет преобразование (рисунок 2.32). В отличие от исследуемого в предыдущем параграфе тока короткого замыкания в спектральном составе тока при коммутации БСК появились частоты, отличные от основной гармоники. Таким образом, необходимо преобразовать ось масштабов непрерывного вейвлет преобразования a в ось частот f (рисунок 2.32). Как следует из скалограммы на всем исследуемом промежутке времени присутствует основная гармоника (50 Гц). А на интервале $0 \leq t \leq 0,04$ секунды появляется группа высокочастотных составляющих $200\text{-}350 \text{ Гц}$, так называемая осциллирующие искажение. Частота дискретизации выбрана $3,2 \text{ кГц}$. На

исследуемом интервале времени $\Delta t=0,29$ секунды будет $N=928$ точек мгновенных значений тока.

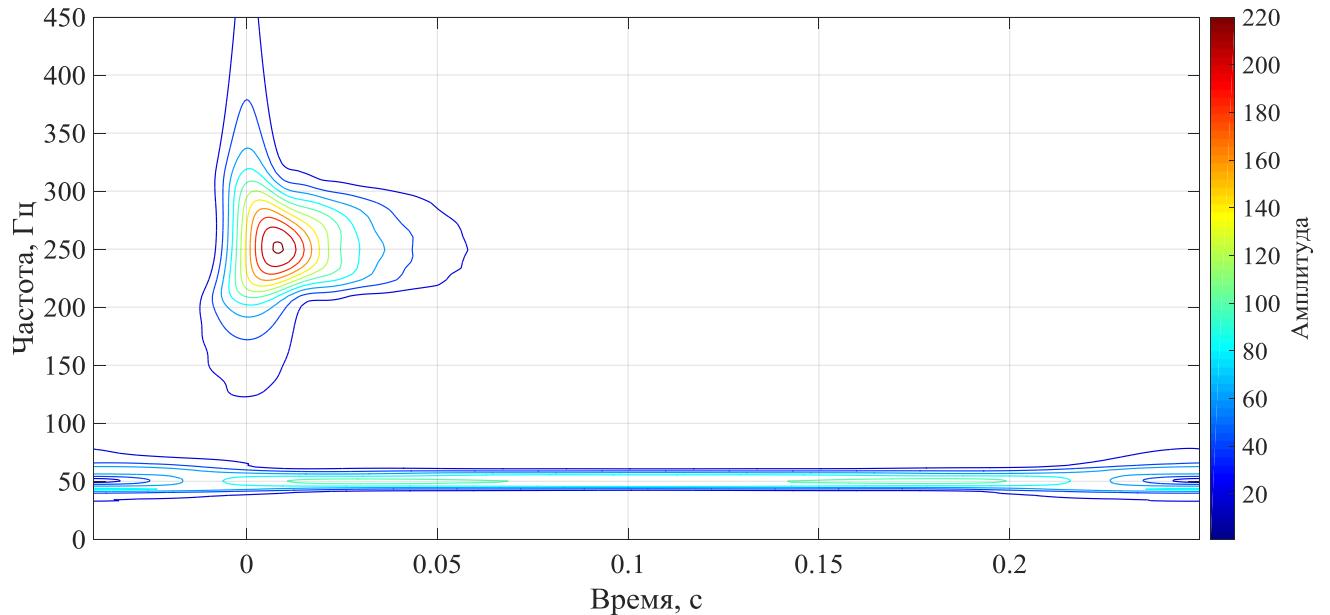


Рисунок 2.32 – Скалограмма непрерывного ВП переходного процесса при коммутации БСК

Для выбора оптимального типа вейвлета в соответствии с разработанным критерием (формула 1.40) проведем анализ по 10 типам вейвлетов.

Таблица 2.2. Энергия спектра и среднеквадратичное отклонение при восстановлении тока КЗ различными типами вейвлетов

Тип вейвлета	Энергия спектра коэффициентов, % от общей					Среднеквадратическое отклонение σ
	A4	D4	D3	D2	D1	
Хаара (haar)	63,48	10,80	16,55	7,18	1,99	0,4469
Добеши 2 (db2)	69,45	7,24	19,21	3,69	0,41	0,3361
Добеши 10 (db10)	70,66	0,91	27,97	0,42	0,04	0,1148
Добеши 24 (db24)	70,68	3,27	25,84	0,18	0,03	0,1855
Добеши 42 (db42)	70,71	2,28	26,72	0,26	0,03	0,1590
Симлет 4 (sym4)	71,20	5,21	21,87	1,71	0,01	0,2672
Симлет 12 (sym12)	70,67	2,77	26,24	0,28	0,04	0,1747
Симлет 20 (sym20)	70,90	2,11	26,71	0,24	0,04	0,1540

Продолжение таблицы 2.1

Койфлет 5 (coif5)	70,97	3,64	24,80	0,58	0,01	0,2053
Мейера (dmey)	70,87	1,95	26,84	0,32	0,02	0,1506

Процедура разложения аналогична схеме, представленной на рисунке 2.24 за одним исключением – изменилась длина исходного сигнала, соответственно изменятся и длины отдельных вейвлет коэффициентов (количество элементов в вектор-строке). Представим измененную схему упрощенно, опустив процедуру фильтрации и децимации для наглядного представления частотных диапазонов и количества элементов в каждом вейвлет коэффициенте (рисунок 2.33).

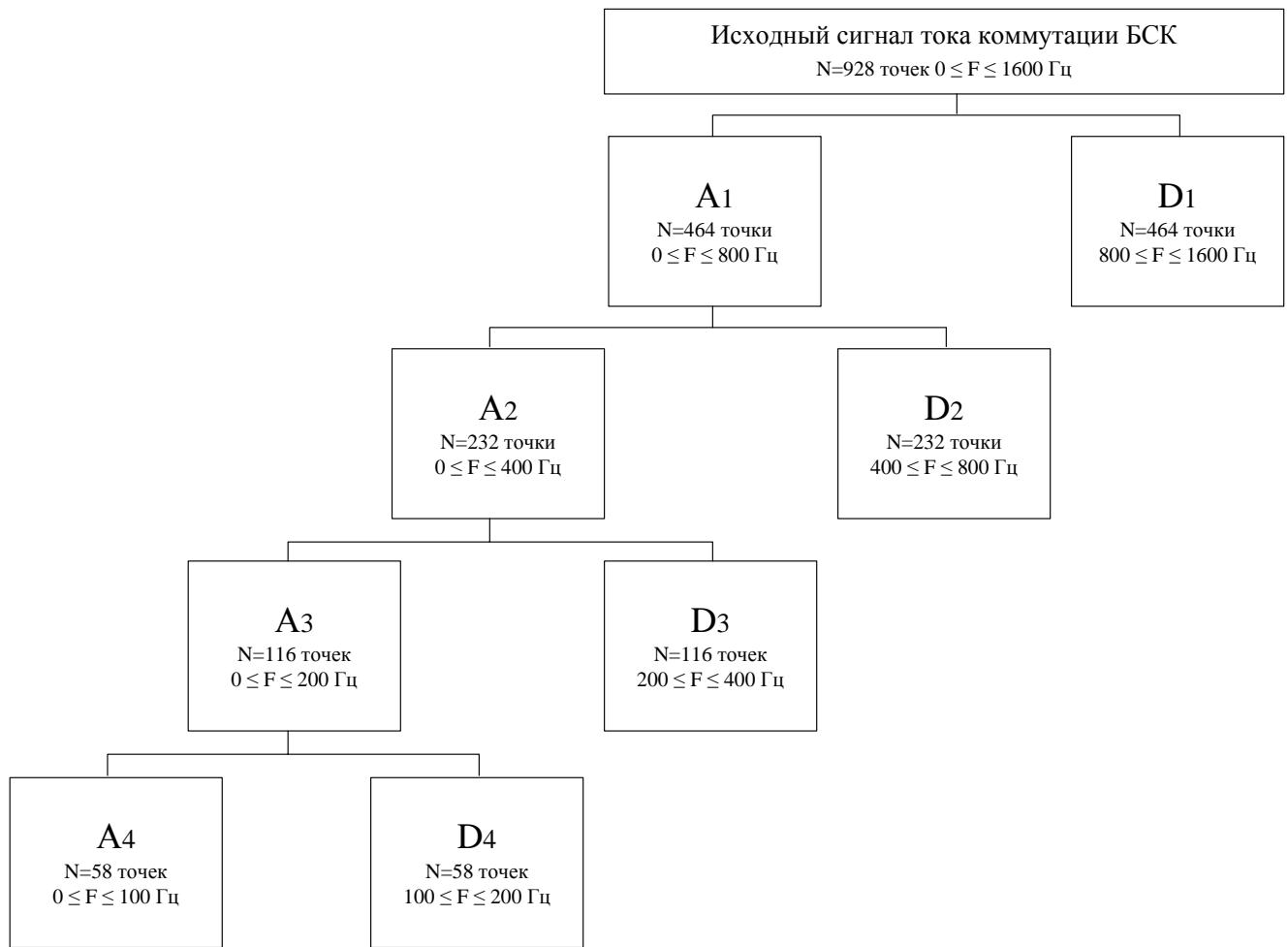


Рисунок 2.33 – Схема дискретного ВП тока коммутации БСК до 4 уровня

На основе предварительного анализа данных непрерывного ВП (рисунок 2.32) и таблицы 2.2 видно, что сигнал может быть представлен двумя вейвлет коэффициентами A_4 (частота от 0 до 100 Гц, $N=58$ точек) и D_3 (частота от 200 до

400 Гц $N=116$ точек). Локальная энергия спектра по сумме двух коэффициентов (таблица 2.2) составляет от 80% (вейвлет Хаара) до 98 % (вейвлет Добеши 10) от общей энергии спектра всего сигнала тока. На основании вышеизложенного в качестве базовых вейвлет коэффициентов для передачи информации о мгновенных значениях тока при коммутации БСК принимаем A_4 и D_3 . Наилучшие результаты по среднеквадратическому отклонению (0,1148 А) показал вейвлет Добеши 10. Результат восстановления по двум одиночным ветвям коэффициентов A_4 и D_3 с помощью вейвлета Добеши 10 показан на рисунке 2.34.

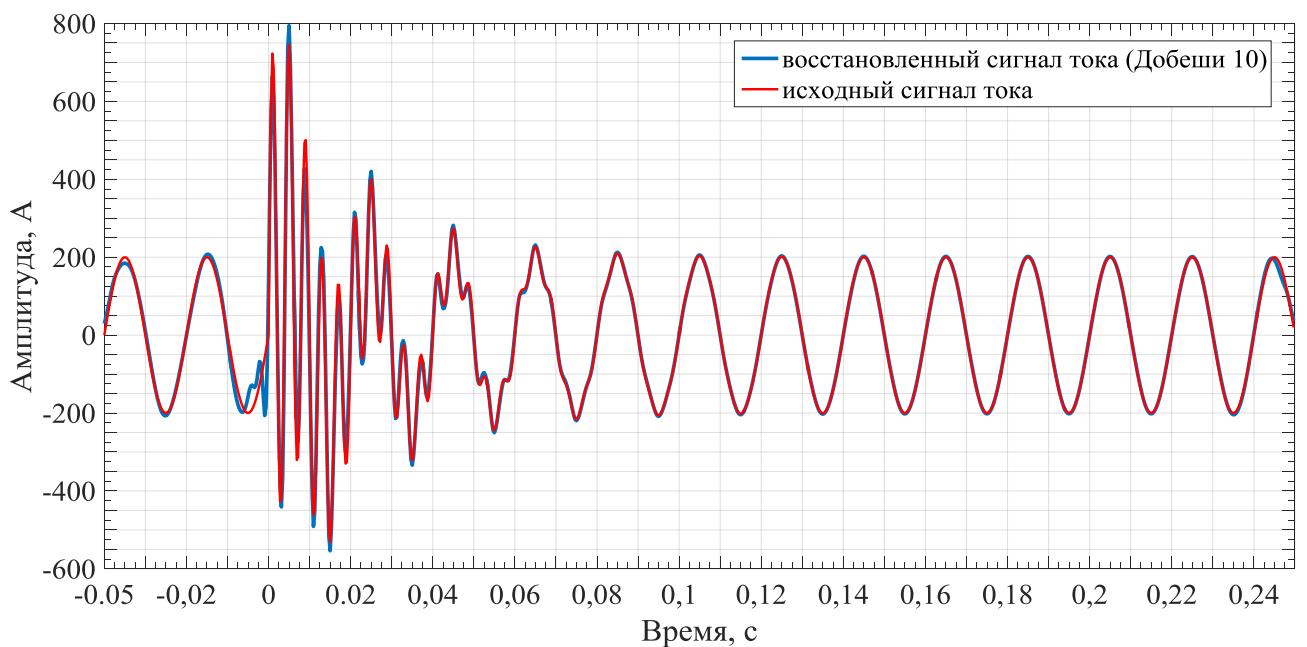


Рисунок 2.34 – Восстановление мгновенных значений тока коммутации БСК по двум ветвям с помощью вейвлета Добеши 10

Абсолютная погрешность при вычислении отдельных мгновенных значений тока на стадии переходного процесса не превышает 150 А (рисунок 2.35).

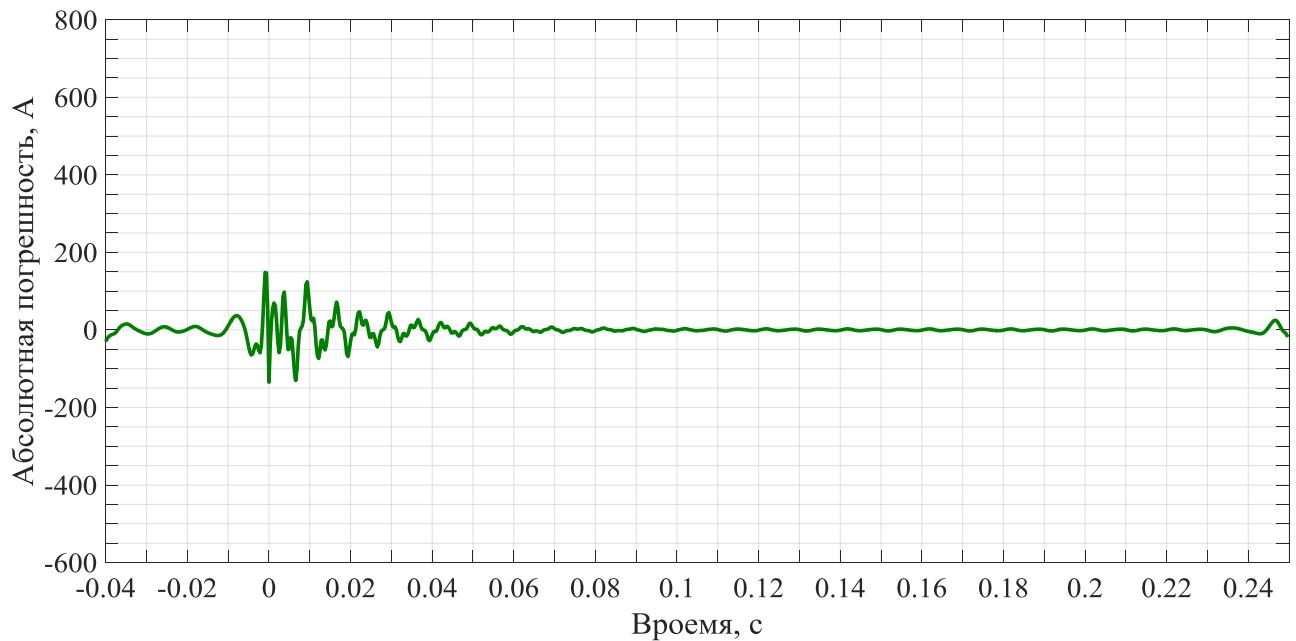


Рисунок 2.35 – Абсолютная погрешность восстановления мгновенных значений тока коммутации БСК по двум ветвям с помощью вейвлета Добеши 10

Если исследуемый сигнал тока (напряжения) является суммой нескольких частотных компонент и одна из составляющих присутствует в сигнале лишь некоторый отрезок времени, то эти сигналы успешно могут быть разделены с помощью вейвлет преобразования. Как следует из рисунка 2.32, основная гармоника присутствует на протяжении всего исследуемого промежутка времени. За частотный коридор от 0 до 100 Гц при выбранной схеме разложения отвечает аппроксимирующий коэффициент A_4 (рисунок 2.36).

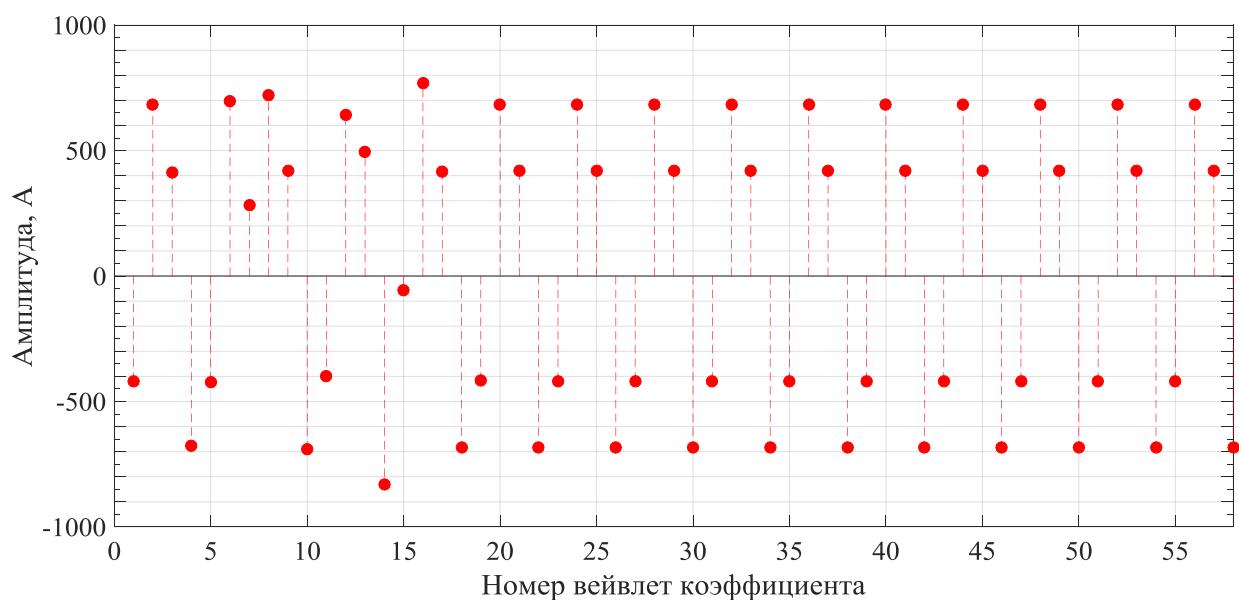


Рисунок 2.36 – Вейвлет коэффициент A_4 ($N=58$ точек)

Восстановление одиночной ветви A_4 (при условии обнуления всех остальных вейвлет коэффициентов) дает практически идеальную осциллограмму тока частотой 50 Гц (рисунок 2.37).

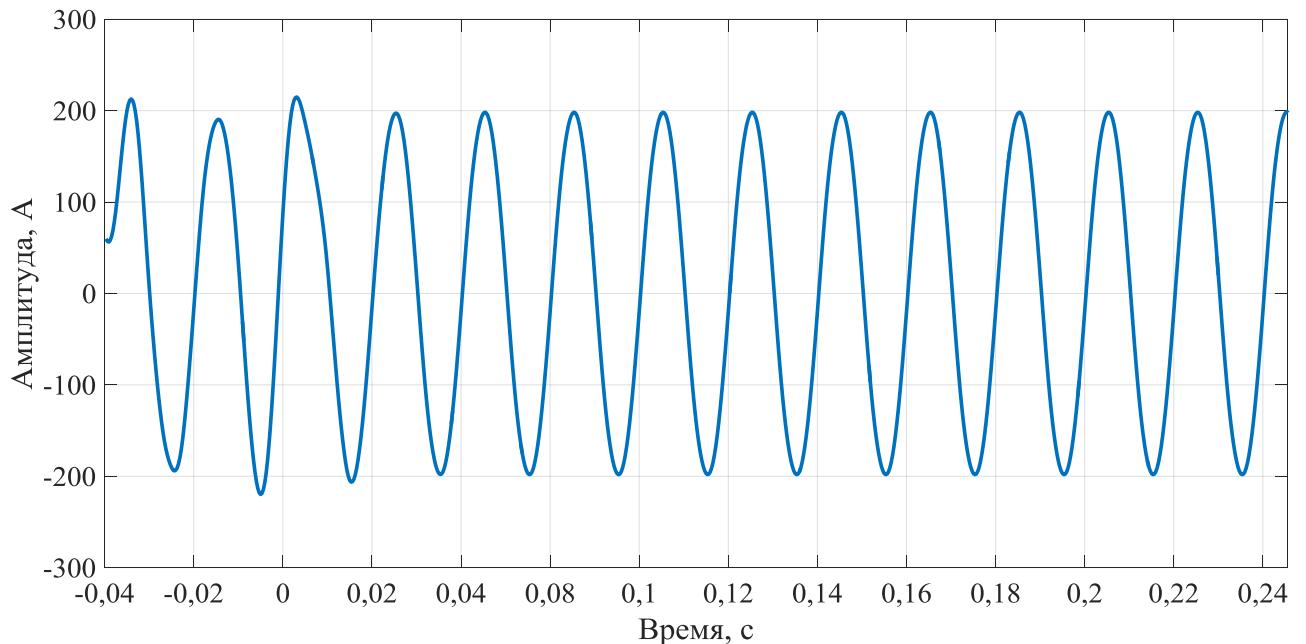


Рисунок 2.37 – Восстановление одиночной ветви коэффициента A_4

Вейвлет коэффициент $D3$ представляет собой вектор строку из 116 элементов (рисунок 2.38). Коэффициент $D3$ в зависимости от свойств фильтра выбранного вейвлета выделяет из сигнала полосу частот от 200 до 400 Гц.

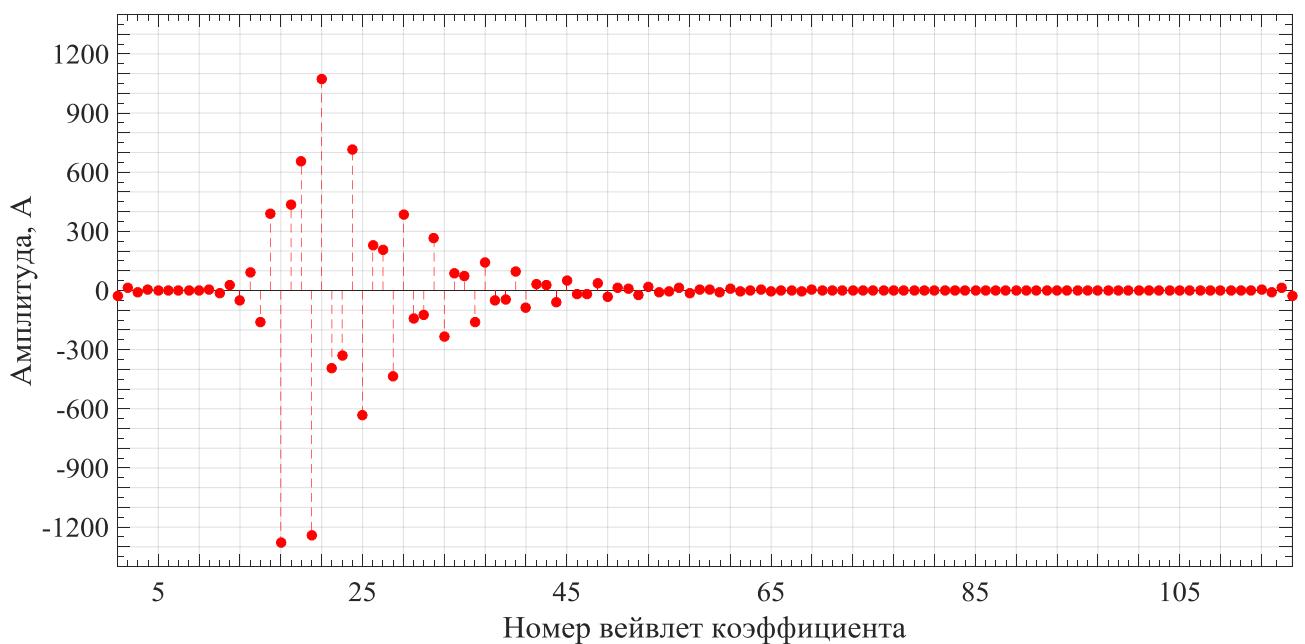


Рисунок 2.38 – Вейвлет коэффициент D_3 ($N=116$ точек)

Если взять за основу вейвлет коэффициент D_3 ($N=116$ точек $200 \leq f \leq 400$ Гц) то можно выделить только осциллирующую помеху переходного процесса коммутации (рисунок 2.39).

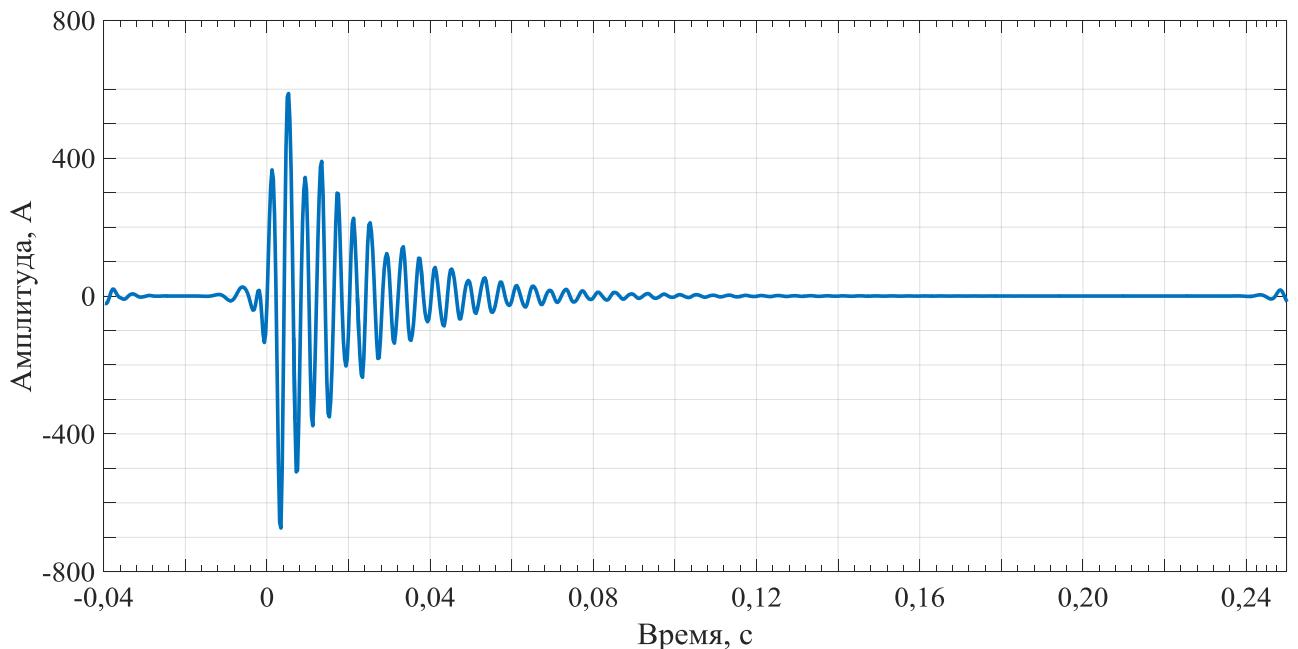


Рисунок 2.39 – Восстановленная высокочастотная осциллирующая помеха по одиночной ветви коэффициента D_3

Как видно, из рисунка 2.39 лишь небольшая часть вейвлет коэффициентов D_3 имеет значение более 100 А. С целью сокращения объема передаваемых данных в рамках заявленной цели развития технологии «цифровая подстанция» обнулим элементы матрицы D_3 с амплитудами менее 50 А. Обнуленными оказались 101 элемент матрицы, оставлены были 15 коэффициентов (из 116). Осуществим восстановление исходного сигнала броска тока при коммутации БСК по двум ветвям коэффициентов A_4 (58 точек) и B_3 (15 точек). Сравнение результатов восстановления без обнуления элементов и после обнуления представлено в таблице 2.3. Как видно из таблицы, при обнулении 101 элемента матрицы коэффициентов, среднеквадратическое отклонение несущественно увеличилось.

Таблица 2.3. Восстановление осциллограммы броска тока при обнулении элементов

Тип вейвлета	Энергия спектра коэффициентов, % от общей					Среднеквадратическое отклонение σ
	A4	D4	D3	D2	D1	
Добеши 10 (db10) восстановление по 174 элементам	70,66	0,91	27,97	0,42	0,04	0,1148
Добеши 10 (db10) Восстановление по 73 элементам	82,45	0,94	15,88	0,67	0,06	0,1184

В результате, исходный сигнал, длиной 928 точек был восстановлен с помощью двух последовательностей вейвлет коэффициентов, состоящей суммарно из 73 элементов. Коэффициент сжатия в данном случае составил $928/73=12,7$ раза.

Таким образом, можно заключить, что вейвлет преобразование позволяет проводить сжатие цифровых данных установившихся и переходных процессов электроэнергетических систем.

2.4.3 Анализ импульсных напряжений

Импульсные напряжения возникают в результате внутренних (коммутационные) или внешних (грозовые) перенапряжения. Импульсные напряжения, как показатель качества электроэнергии регламентированы ГОСТ [65, с. 13-15]. В соответствии с порядком, предложенным в параграфе 2.3.1 настоящей диссертации, произведем анализ импульсного напряжения (рисунок 2.40).

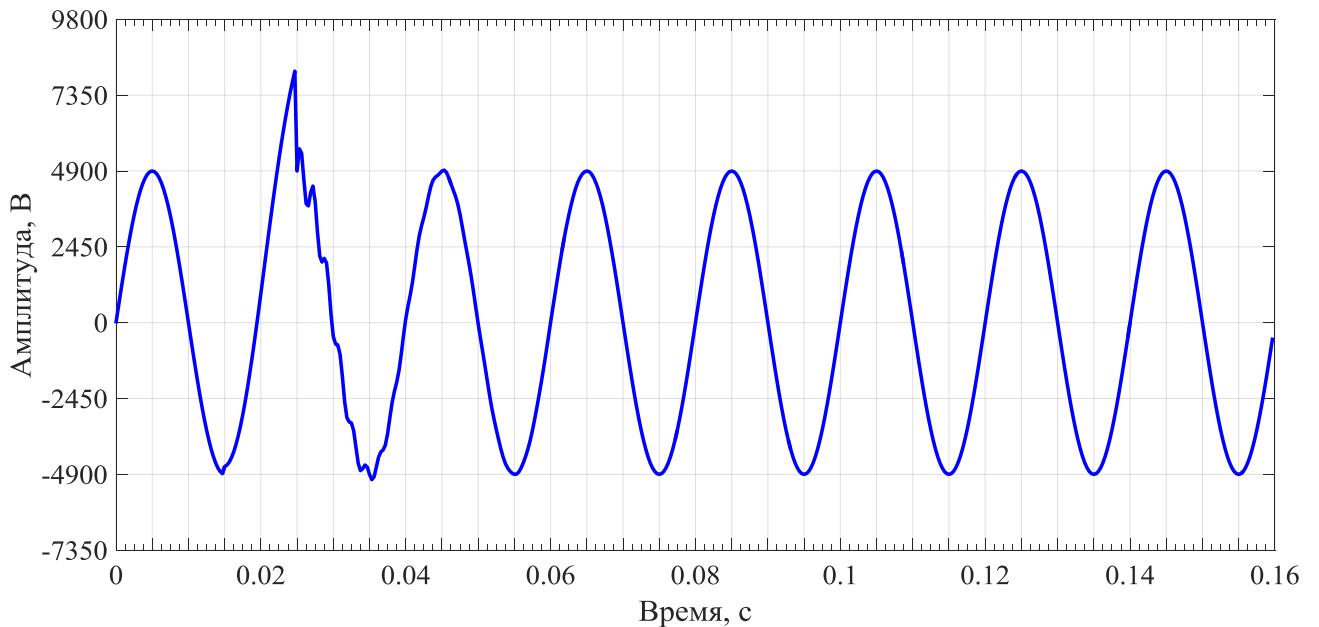
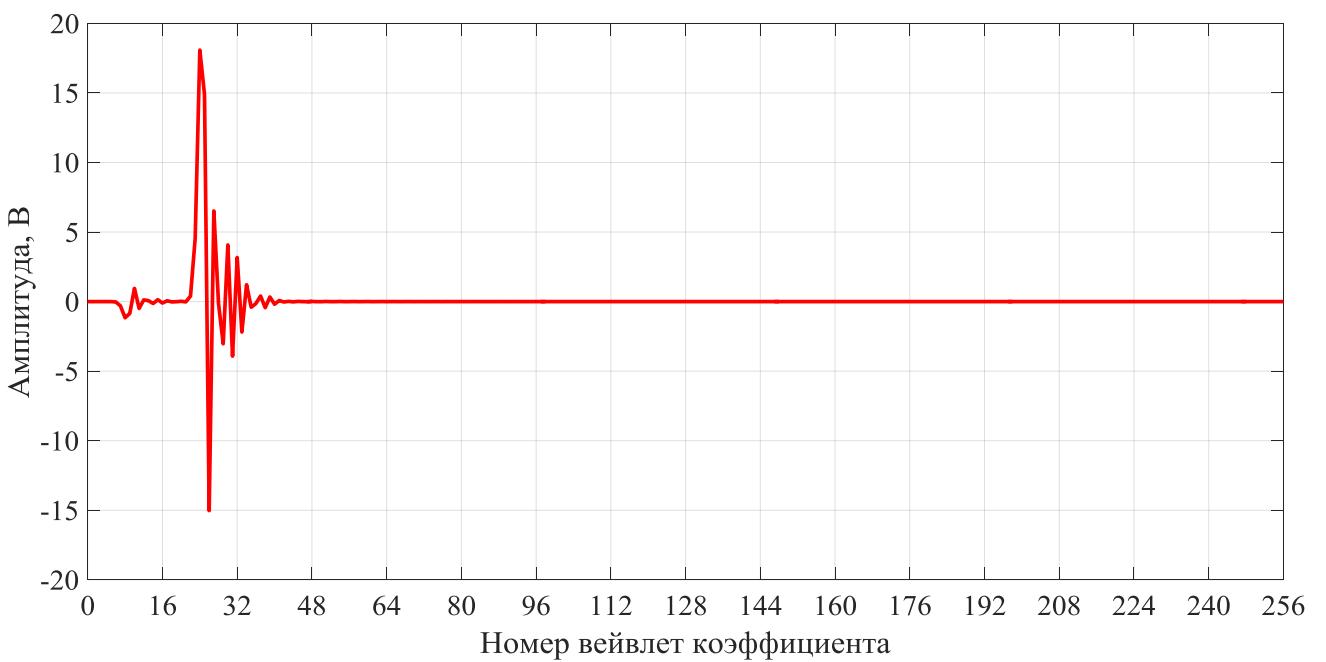


Рисунок 2.40 – Импульсное напряжение в сети 6 кВ

Наибольший интерес при анализе такого рода искажений качества электроэнергии вызывает амплитуда и длительность импульса напряжения. Поэтому особое внимание уделим вейвлет коэффициенту D_I , согласно схеме, приведенной на рисунке 2.24 представляющей высокочастотную составляющую сигнала напряжения. В соответствии с выбранной частотой дискретизации (3,2 кГц) на исследуемом отрезке времени $\Delta t=0,16$ секунды, коэффициент D_I будет состоять из 256 точек (рисунок 2.41).

Рисунок 2.41 – Коэффициент D_I ($N=256$ точек)

Проведем процедуру реконструкции импульсного напряжения по двум ветвям вейвлет коэффициентов – A_4 ($N=32$ точки) и D_1 (256 точек). Значения абсолютной погрешности представлены на рисунке 2.42. Максимальные значения абсолютной погрешности не превысили 40 В, а среднеквадратическое отклонение составило $\sigma=0,0489$ В.

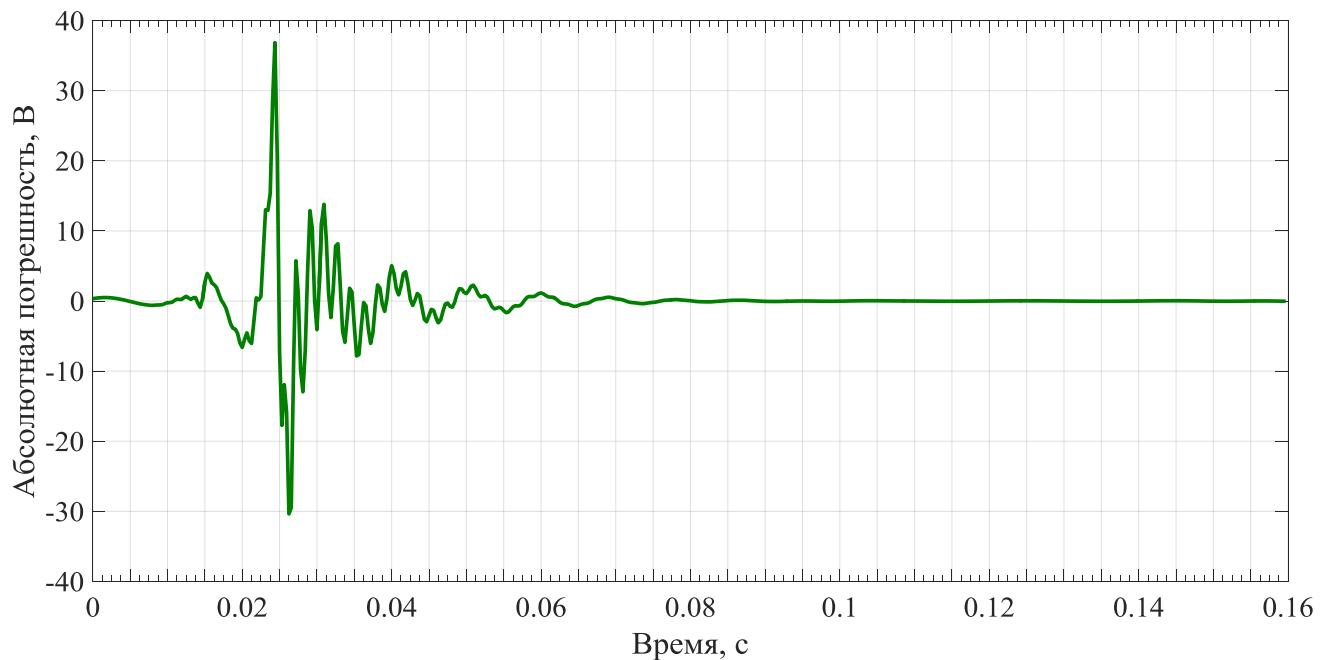


Рисунок 2.42 – Абсолютная погрешность восстановления по двум ветвям вейвлет коэффициентов

Однако, нельзя не отметить, что представление высокочастотной составляющей коэффициентом D_1 из 256 ненулевых элементов избыточно. Если произвести фильтрацию и удалить коэффициенты с амплитудой менее 1 В, то из 256 элементов останутся лишь 7.

$D_{1,87}$	4,5339
$D_{1,88}$	18,0814
$D_{1,89}$	14,8912
$D_{1,91}$	6,5158
$D_{1,94}$	4,0741
$D_{1,96}$	3,1742
$D_{1,97}$	1,2120

Если при этом восстановить сигнал по 32 элементам коэффициента A_4 и по оставшимся 7 коэффициентам D_1 , то среднеквадратическое отклонение не изменится в четвертом знаке.

2.4.4 Анализ несинусоидальности напряжения и тока

Для системы электроснабжения (рисунок 2.43) административно-лабораторного корпуса с применением сертифицированного прибора для измерения показателей качества электроэнергии Metrel MI 2792A (Словакия) были произведены замеры коэффициентов n -ной гармонической составляющей K_{un} и коэффициента гармонических искажений K_U (THD). В ходе физических испытаний было установлено [18], что подключенная к силовой сборке (СП 1) нагрузка имеет нелинейные вольтамперные характеристики, другими словами, является источником высших гармоник. Более детальный анализ показал, что система освещения выполнена светодиодными светильниками и имеет неравномерное распределение нагрузок по фазам. Технологическая лабораторная установка постоянного тока имеет повторно-кратковременный режим работы (общее время цикла – 10 минут, время работы 30 секунд). Для анализа дополнительных потерь от ВГ в кабельной линии, питающей силовой пункт с целью разработки мероприятий по фильтрации высших гармоник была разработана имитационная модель (рисунок 2.44) в среде MATLAB Simulink.

Трансформатор ТМ 1000 10/0,4 – номинальная мощность $S=1000$ кВА; $U_{en}=10$ кВ; $U_{hn}=0,4$ кВ; $U_{k3}=5,5$ %; $P_{k3}=10,8$ кВт; $I_{xx}=0,75$ %; $P_{xx}=1,6$ кВт.

Кабельная линия АВВГ 3×95+1×70 – длина 100 м.

Погонные сопротивления кабеля: $r_0=0,405$ Ом/км, $x_0=0,064$ Ом/км.

Линейная нагрузка, подключенная к шинам ТП 0,4 кВ, при моделировании была задана постоянным графиком нагрузки $P=300$ кВт, $Q=20$ квар.

При разработке имитационной модели особо следует подходить к точности аппроксимации кривой намагничивания трансформатора. Как показано в работе [42] аппроксимация кривой намагничивания полиномом 5-й степени «дает

погрешность в оценке уровня 5-й гармоники до 10% и более, для 7-й гармоники – до 40% и более» [42, с. 4]. Для повышения точности моделирования ВГ тока намагничивания авторы рекомендуют аппроксимировать кривую намагничивания функцией арктангенса [42]:

$$B = \alpha \cdot \operatorname{arctg}(\beta H) + \gamma \cdot H^m \quad (2.42)$$

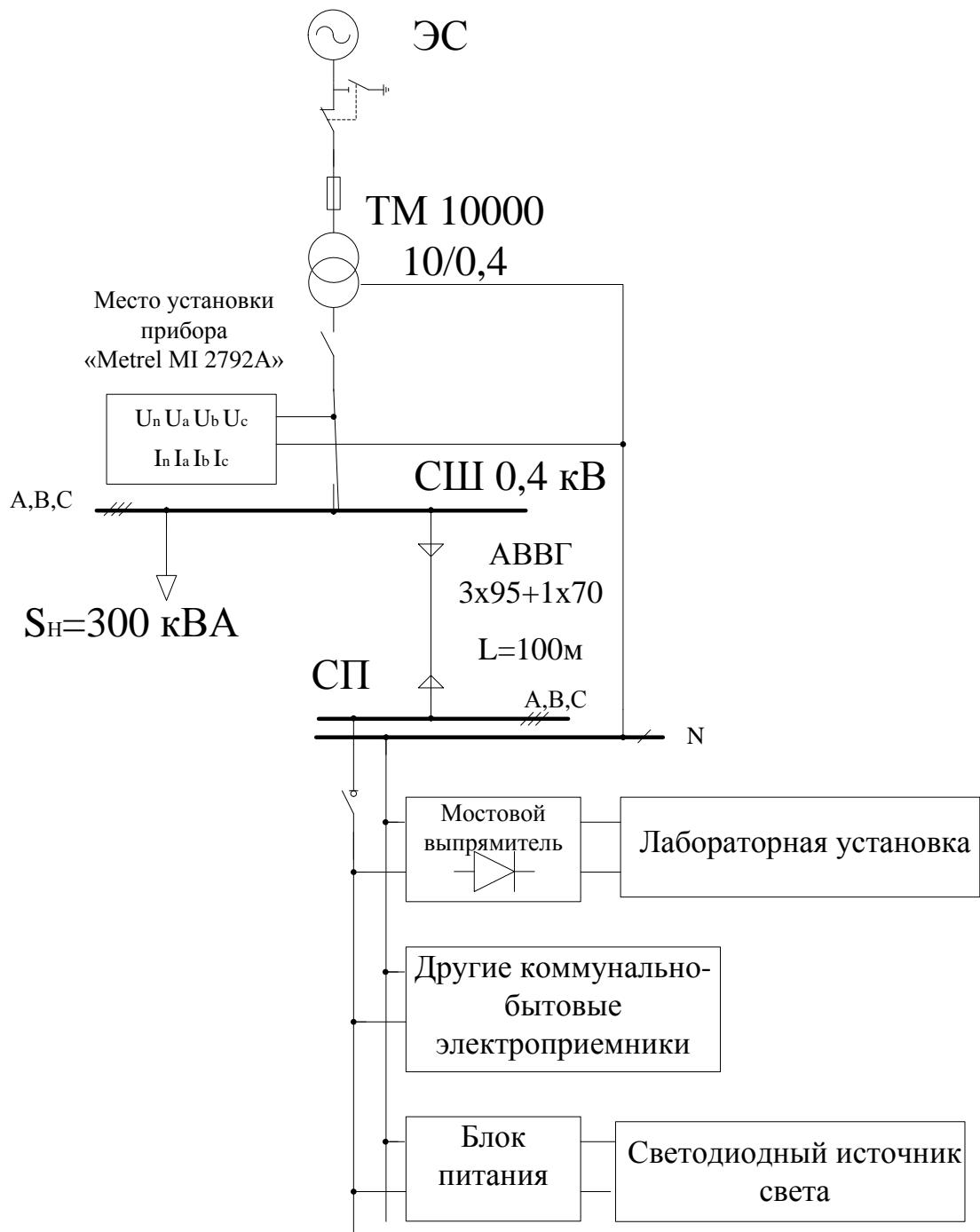


Рисунок 2.43 – Система электроснабжения административно-лабораторного корпуса

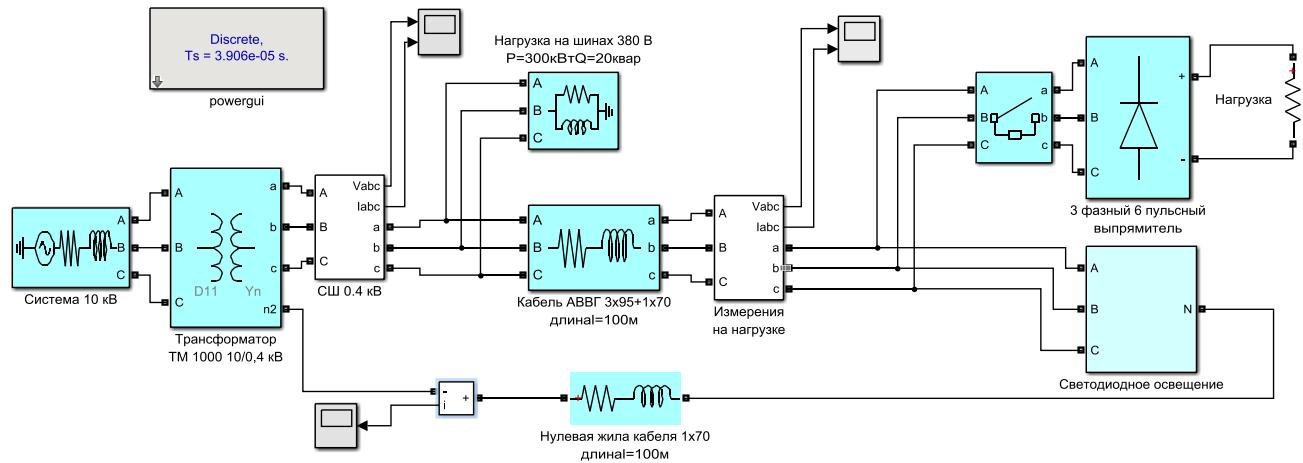


Рисунок 2.44 – Имитационная модель для анализа режима сети

С помощью имитационной модели были получены токи и напряжения, соответствующие данным физических измерений показателей качества электроэнергии. Проведем анализ несинусоидального нестационарного режима в соответствии с методом, предложенным в настоящей главе диссертационной работы. Осциллограммы фазных токов в кабеле АВВГ представлены на рисунке 2.45.

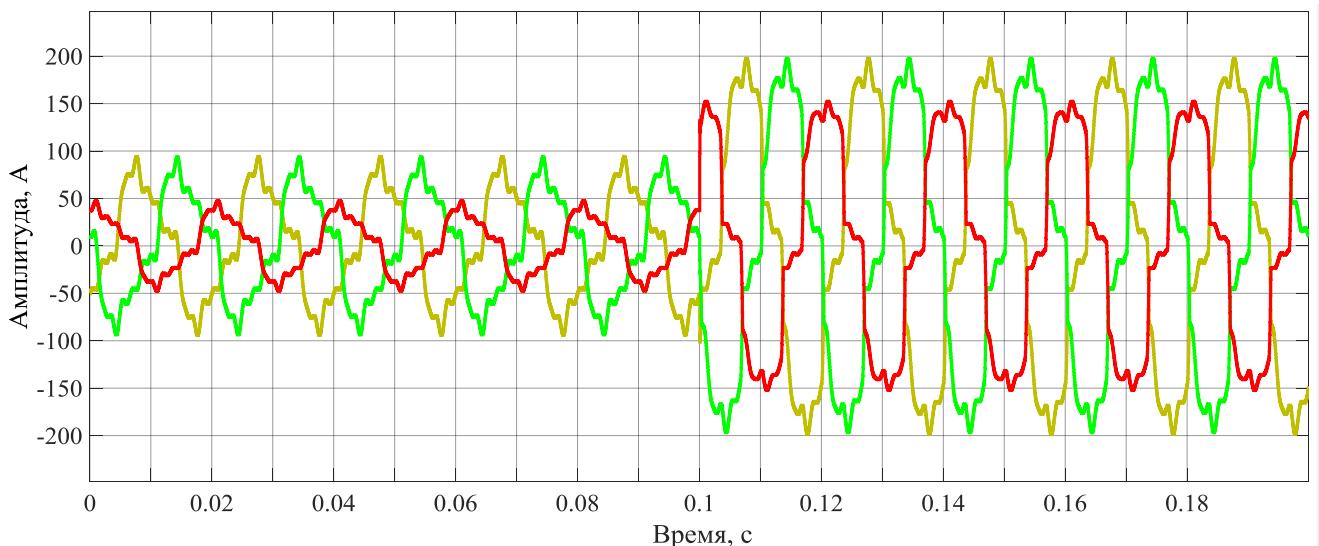


Рисунок 2.45 – Осциллограмма фазных токов в кабельной линии

Как видно из рисунка 2.45 имеет место несинусоидальный режим. Фаза С загружена менее интенсивно, чем фазы А и В. В момент времени $t=0,1$ секунду происходит изменение режима – подключается дополнительная нелинейная нагрузка, при этом несимметрия токов по фазам сохраняется.

В работе [229] производится гармонический анализ токов и напряжений наиболее распространённых бытовых потребителей, являющихся причинами возникновения несинусоидальных режимов. В продолжении исследований специалистами МЭИ была сформирована имитационная модель в среде MATLAB Simulink [348] для анализа режимов однофазной нелинейной нагрузки. В статье [339] приводится метод анализа высших гармоник, генерируемых нелинейной однофазной нагрузкой. Анализу спектрального состава источников света, однофазных бытовых потребителей и низковольтных электроприёмников посвящены статьи [156, 215].

При условии симметрии нагрузок по фазам для расчета ВГ в сетях низкого напряжения можно воспользоваться упрощенными однолинейными схемами замещения для гармоник кратных и не кратных трем (рисунок 2.46) [221, с. 49]:

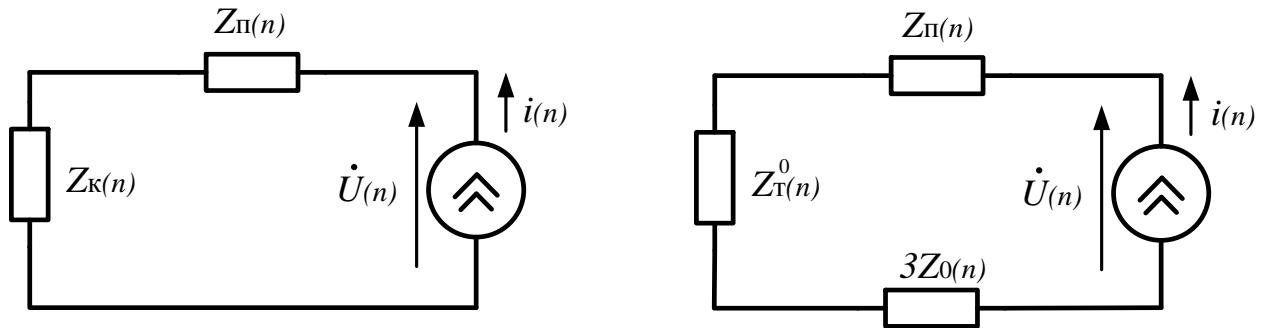


Рисунок 2.46 – Схема замещения для сети низкого напряжения с источником тока n -ной гармоники (привод. по [221, с. 49])

Для систем электроснабжения с электроприёмниками, имеющими нелинейные вольт-амперные характеристики, при неравномерном распределении однофазной нагрузки по фазам возникает необходимость при моделировании учитывать несимметрию режима. В разработанном программном продукте Fazonord (Иркутский государственный университет путей сообщения) с достаточной степенью точности реализована модель расчета и моделирования несинусоидальных режимов в фазных координатах. Кроме того, в ПК Fazonord используются «уточненные зависимости собственных и взаимных сопротивлений проводов от частоты» [90, с. 82]. Анализу несинусоидальных режимов при наличии ВГ и ИГ при несимметричном режиме с использованием фазных

координат посвящена работа [246]. На основании проведенных в статье [223] исследований Я. Э. Шклярский и А. А. Белицкий (Санкт-Петербургский горный университет) обозначают необходимость учета несимметрии при расчете несинусоидальных режимов в сетях низкого напряжения.

Поскольку в исследуемой системе электроснабжения имеет место несимметрия в фазах, то, как следствие возникает ток в нулевой жиле кабеля (рисунок 2.47). Характер данного тока явно несинусоидальный.

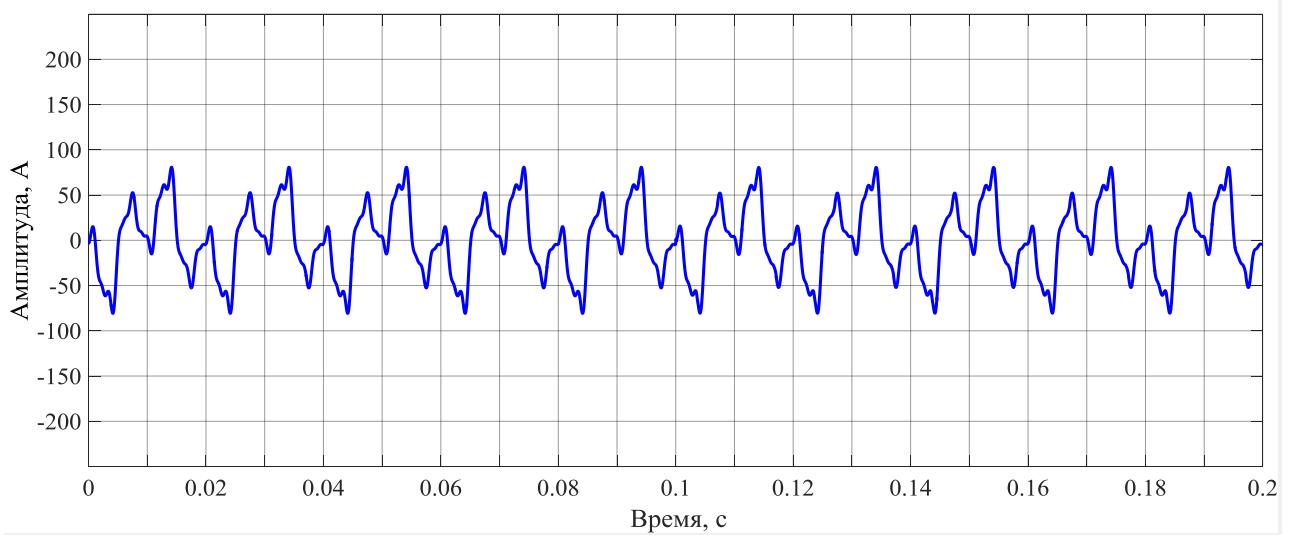


Рисунок 2.47 – Оциллограмма тока в нулевой жиле кабеля

С помощью имитационной модели были получены отдельно токи системы освещения (рисунок 2.48) и выпрямителя (рисунок 2.49).

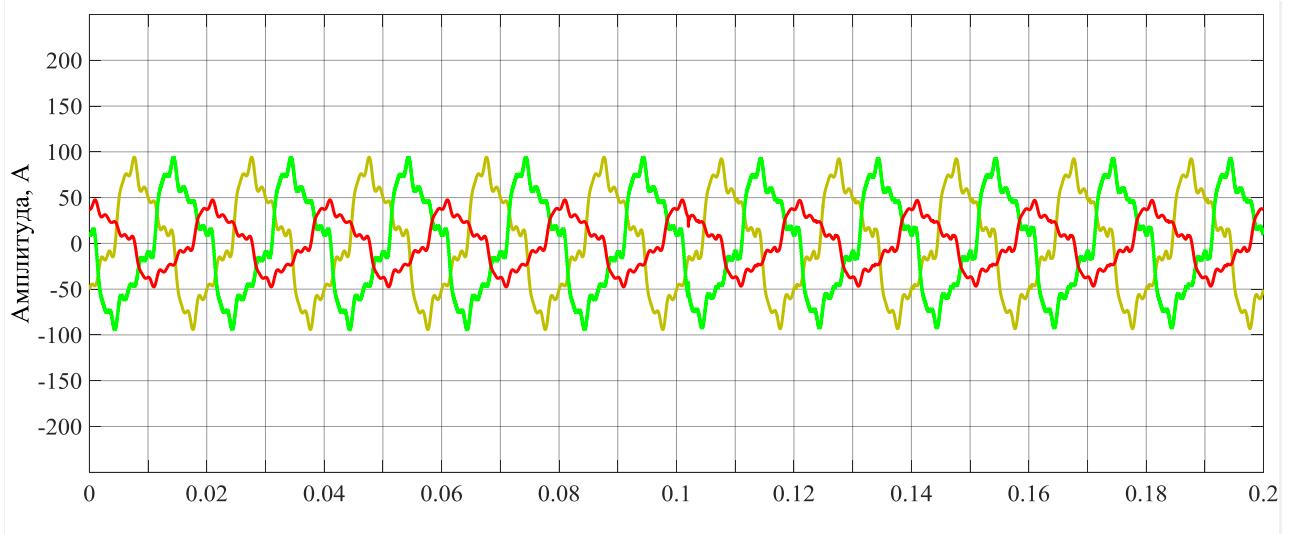


Рисунок 2.48 – Оциллограмма тока светодиодной системы освещения

Как было замечено выше, система освещения представляет нагрузку, работающую в длительном режиме, блок выпрямителя (технологическая установка) работает в повторно-кратковременном режиме. На осциллограмме представлен момент включения выпрямителя $t=0,1$ с.

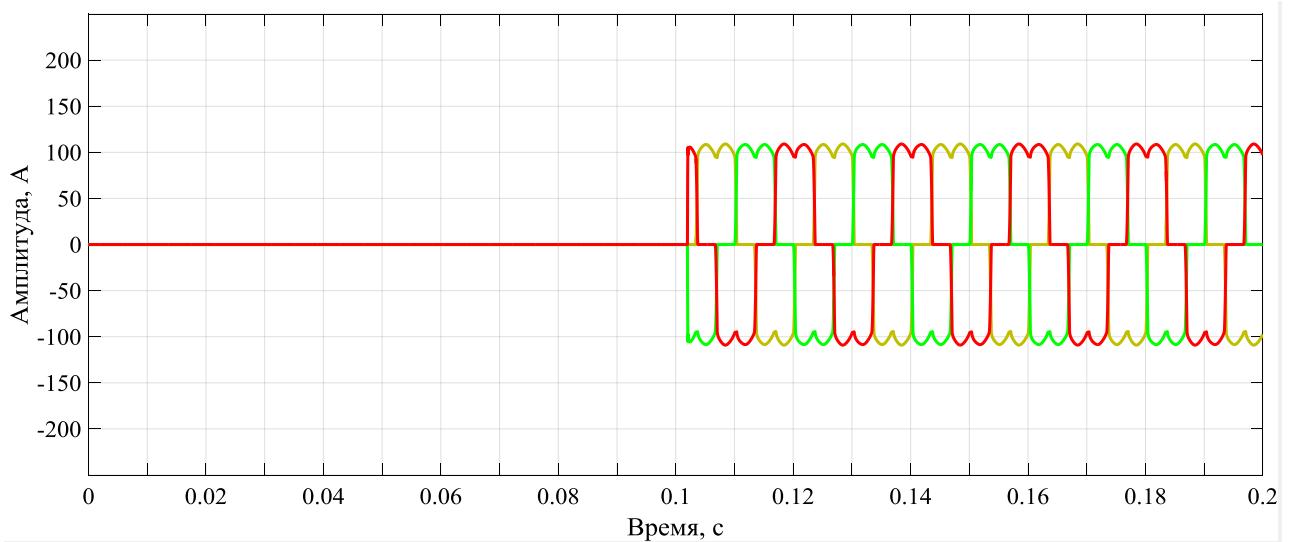


Рис. 2.49 – Осциллограмма тока выпрямителя

Для организации передачи цифровых данных о параметрах режимах (в том числе несинусоидальных) в соответствии с требованиями стандарта МЭК 61850 авторами [182] был разработан программный продукт. Авторами заявлено, что программа позволяет передавать информацию о амплитудах и частотах высших гармоник [182, с 135], но не учитывают при этом нестационарность режима систем электроснабжения. Как было указано в главе 1 настоящей диссертации при анализе нестационарных режимов возникает целый комплекс негативных факторов: растекание спектра, проблема адаптивного выбора ширины окна, объемы передаваемой информации при узких окнах и т.д. Существенное количество озвученных проблем позволяет устраниить (минимизировать негативное влияние) алгоритмы вейвлет преобразования.

Исследуемый процесс является несинусоидальным, нестационарным и несимметричным по фазам (рисунок 2.45), поэтому проводить преобразование Фурье в чистом виде для анализа тока любой из фаз или нулевого провода не имеет смысла. На рисунке 2.50 представлено быстрое преобразование Фурье тока фазы С кабельной линии.

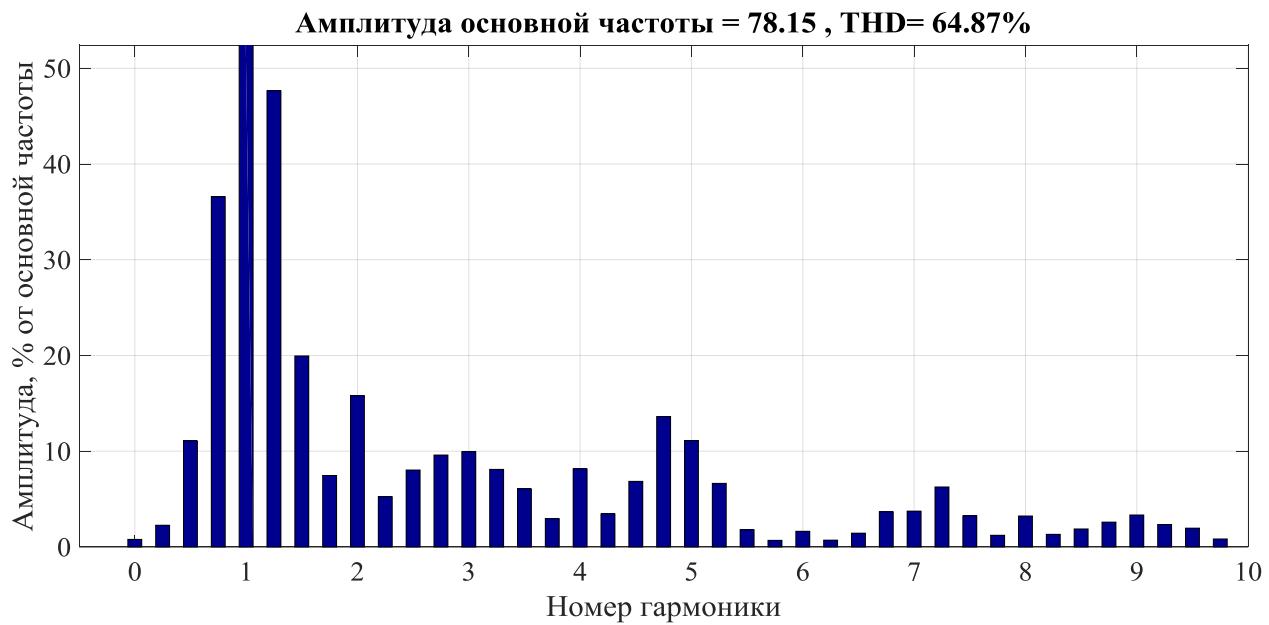


Рис. 2.50 – Быстрое преобразование Фурье спектра тока фазы С

Результаты пакетного ВП для тока фазы С представлены двумя коэффициентами основной частоты и 20 гармоники на рисунке 2.51. Поскольку частоты 20-й гармоники в исследуемом сигнале тока нет – вейвлет коэффициенты (красная линия на рисунке 2.51) принимают значения близкие к нулю.

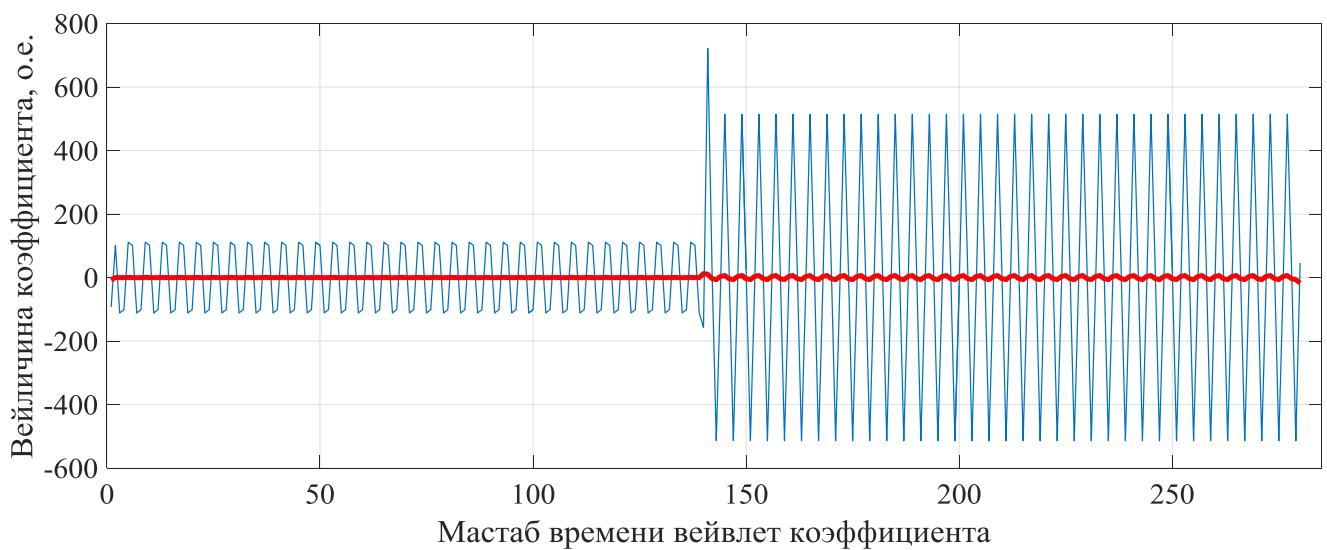


Рис. 2.51 – Вейвлет коэффициенты пакетного ВП

Оригинальная идея компенсации ВГ для групп бытовых электроприёмников, имеющих нелинейные вольт-амперные характеристики представлена в статье сотрудников МЭИ [231]. Авторы вводят понятие «эффект ослабления» [231, с. 21]:

$$AF_n = \frac{I_n^N}{NI_n^1}, \quad (2.43)$$

где I_n^N – результирующий ток n -й высшей гармоники при работе N одинаковых электроприемников, I_n^1 – ток ВГ единичного электроприёмника.

Дополнительно авторы для групп электроприёмников предлагают применять оценку неоднородности [231, с. 22]:

$$DF_n = \left| \frac{\sum_{i=1}^N I_n^i}{\sum_{i=1}^N |I_n^i|} \right|, \quad (2.44)$$

где I_n^i – вектор n -й высшей гармоники i -го электроприёмника.

Авторы в статье [231] экспериментально доказывают возможность снижения уровня несинусоидальности при совместном подключении разнотипных электроприемников. Предложенный в [231] метод может стать альтернативой к установке фильтрокомпенсирующих устройств в сетях низкого напряжения с значительной долей нелинейной бытовой нагрузки. В статье [202] рассмотрен опыт эксплуатации высокочастотных систем регистрации аварийных событий в электроэнергетических системах. Разработанные в ООО «Болид» температурные независимые емкостные делители напряжения позволяют производить регистрацию электрических величин в рабочих диапазонах от 20 Гц до 500 кГц [202, с. 177]. Для анализа несинусоидальных режимов систем электроснабжения следует использовать алгоритмы пакетного ВП, т.к. данный тип преобразования имеет более узкую локализацию частот по сравнению с дискретным ВП. Более подробно метод анализа высших гармоник и интергармоник в электроэнергетических системах будет рассмотрен в главе 3 настоящей диссертации.

2.4.5 Анализ провалов и прерываний напряжения

Провалы напряжения в электрических сетях могут возникать при подключении мощных нагрузок или вследствие неисправностей в системе электроснабжения. Провалы напряжения следует относить к случайным процессам. Характеристика провалов напряжения приводится в стандарте [65]. Осциллограмма провала напряжения до уровня $0,89 U_{\text{ном}}$ длительностью 0,2 секунды приведена на рисунке 2.52.

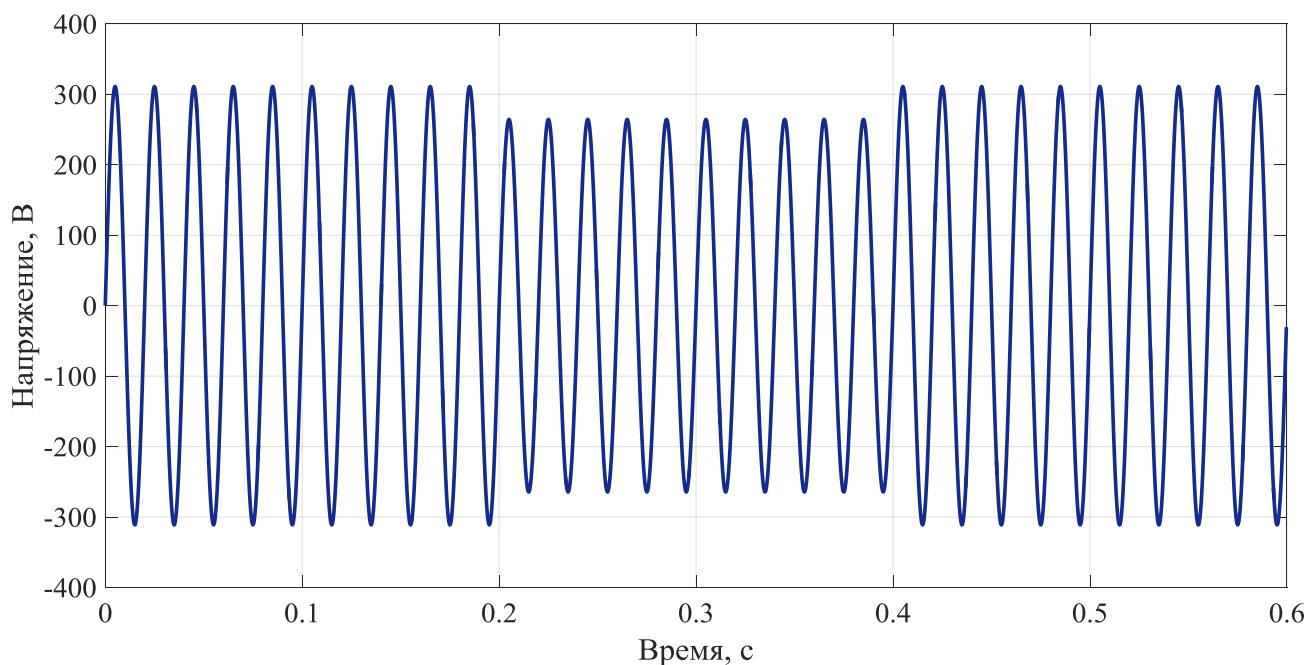


Рисунок 2.52 – Провал напряжения длительностью 0,2 секунды

Необходимость подвергать осциллограмму провала напряжения непрерывному вейвлет преобразованию отсутствует, поскольку в данном случае присутствует только одна частотная компонента, а именно основная гармоника (50 Гц). Поэтому непрерывное ВП продемонстрирует лишь изменение амплитуды сигнала (рисунок 2.53).

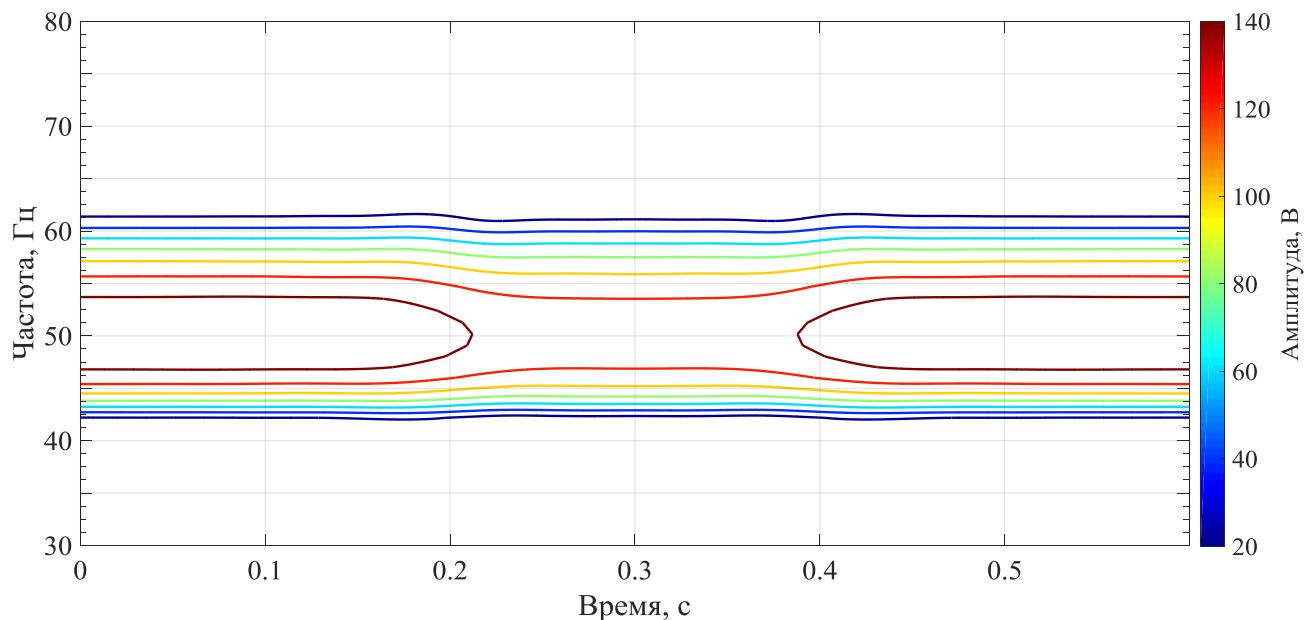


Рисунок 2.53 – Непрерывное ВП провала напряжения

Значительно больший практический интерес представляет дискретное ВП провалов напряжения, причем анализ вейвлет коэффициентов, отвечающих за локализацию высокочастотных компонент. Разумеется, при возникновении провалов напряжения, в отличие от импульсных помех, коммутационных или внешних перенапряжений, не возникает высокочастотных составляющих. Однако вторая производная напряжения в момент возникновения провала и восстановления номинального уровня напряжения имеет разрыв. Это обстоятельство вызывает резкое увеличение амплитуды детализирующих коэффициентов (рисунки 2.54 – 2.55). Следует отметить, что изначально в теории вейвлетов, при использовании простейших функций Хаара, детализирующие коэффициенты отражали собой некий эквивалент производной при малых приращениях времени. Таким образом, детализирующие коэффициенты позволяют определять временные отрезки, на которых происходит изменение контролируемого параметра.

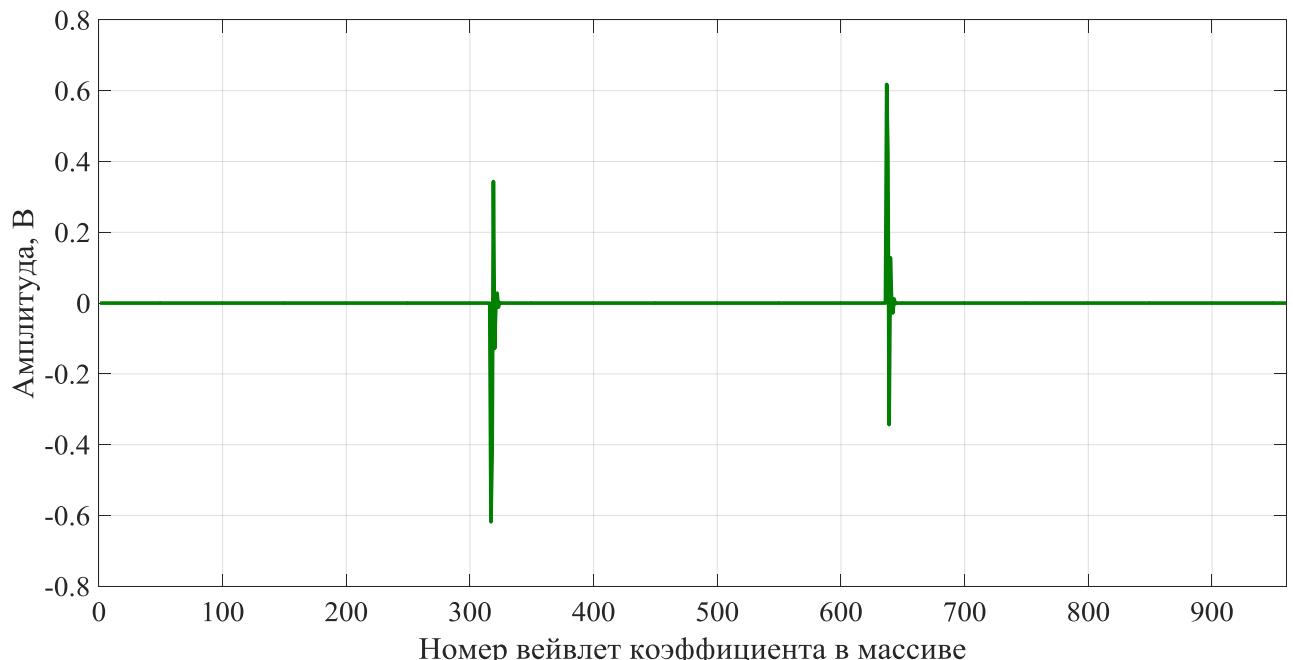


Рисунок 2.54 – Детализирующий коэффициент D_1 количество точек $N=960$

Данное свойство детализирующих коэффициентов, отвечающих за локализацию высокочастотных составляющих, может быть использовано средствами цифровой обработки сигналов, релейной защиты и автоматики для формирования сигнала о резком изменении параметра режима.

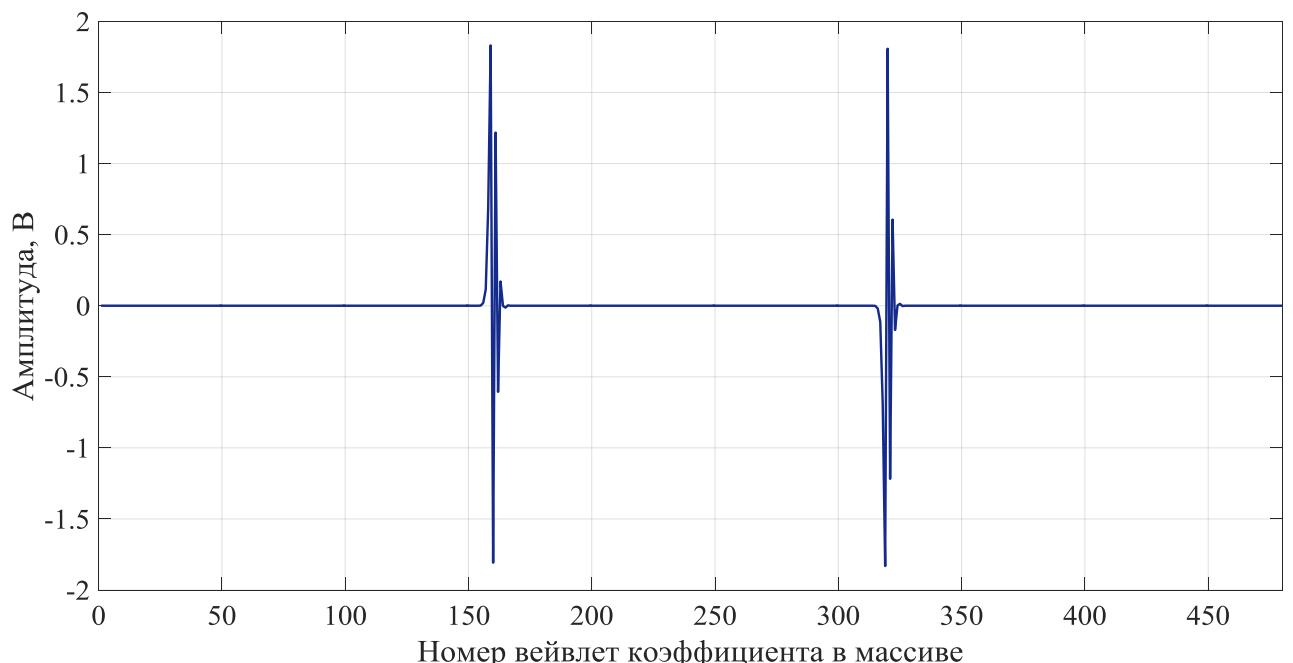


Рисунок 2.55 – Детализирующий коэффициент D_2 количество точек $N=480$

Для сигнализации об изменении режима возможно использование нескольких вейвлет коэффициентов. На рисунке 2.54 показано изменение

коэффициента D_1 , представляющего собой вектор строку из 960 элементов. Локализация по времени для коэффициента D_1 достаточно чёткая, но величины коэффициентов может оказаться не достаточно для обеспечения чувствительности устройств релейной защиты и автоматики (использующих цифровые сигналы). На рисунке 2.55 представлены значения детализирующего коэффициента D_2 , состоящего из 480 точек. Как видно, локализация по времени ухудшилась, однако увеличилась амплитуда вейвлет коэффициентов.

2.5 Основные результаты и выводы

1. Разработан критерий выбора оптимального типа вейвлета для анализа качества электроэнергии. Критерий сформулирован по двум условиям. Первое условие – минимум среднеквадратического отклонения исходного сигнала напряжения (тока) и сигнала, полученного в ходе вейвлет реконструкции. Дополнительно критерий выбора вейвлета учитывает распределение локальной плотности энергии узла дискретного или пакетного ВП. Согласно алгоритму ВП каждый узел соответствует определённой частотной локализации, которую необходимо проецировать на гармонические группы и подгруппы согласно ГОСТ 30804.4.7–2013.

2. Разработаны методы и алгоритмы расчета действующих значений токов и напряжений в электрических цепях по вейвлет коэффициентам. Метод основан на теореме Парсеваля, с учетом локализации частоты при вейвлет преобразовании. Полоса пропускания вейвлет фильтра нижних частот узла $a_{j,k}$ должна быть совмещена с гармонической группой h (согласно ГОСТ 30804.4.7–2013). Полоса пропускания вейвлет фильтра верхних частот узла $a_{j,k+1}$ совмещается с гармонической группой $h+1$.

3. Разработаны рекурсивные алгоритмы расчета переходных процессов в электрических сетях 0,4–110 кВ на основе вейвлет преобразования. В качестве исходных данных используются дискретные значения напряжений (э.д.с.),

полученные в результате вейвлет преобразования. Разработаны алгоритмы расчета трехфазного короткого замыкания (на примере сети 110 кВ), алгоритмы расчета переходных процессов в цепях постоянного и переменного тока.

4. Разработана методика 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.

5. 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.

6. Представлен метод определения времени изменения режима электрической сети по высокочастотным детализирующими вейвлет коэффициентам. Момент времени, когда происходит изменение уровня напряжения (тока, мощности и др.) фиксируется резким всплеском вейвлет коэффициентов, что может использоваться для организации цифровых защит и средств автоматики.

3 РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ РАСЧЕТА ВЫСШИХ ГАРМОНИК И ИНТЕРГАРМОНИК ПО ВЕЙВЛЕТ КОЭФФИЦИЕНТАМ

3.1 Анализ проблемы нормирования, анализа и обеспечения качества электроэнергии

Для развития концепций «Smart Grid», «Энерджинет», «Цифровая подстанция» среди прочих задач, должна быть решена задача развития системы управления качеством электрической энергии. Такая система управления предполагает: осуществление контроля ПКЭ на соответствие действующим нормативам; обеспечение доступа к режимным характеристикам объектов электроэнергетики и возможности регистрации характерных особенностей конкретной электрической сети; активного управления ПКЭ в режиме реального времени [111, с. 29]. Необходимость применения системного подхода для управления качеством электроэнергии [188] и совершенствование методов контроля и анализа показателей качества [201] определена задачами развития интеллектуальных электрических сетей.

При невыполнении энергоснабжающей организации требований к ПКЭ (в соответствии с ГОСТ 32144-2013, обязательным к применению в соответствии с частью 1 статьи 46 Федерального закона от 27.12.2002 № 184-ФЗ «О техническом регулировании») наступает административная ответственность по статье 14.43 «Кодекса Российской Федерации об административных правонарушениях» [194, с. 53].

Для обеспечения надёжного, устойчивого и экономичного электроснабжения необходимо свести к минимуму кондуктивные низкочастотные электромагнитные помехи в электрических сетях [56, с. 172]:

$$F\delta X_{1,n} \rightarrow \min. \quad (3.1)$$

Или другими словами – многомерная функция распределения F_n (3.1) должна определять вероятность того, что значение i -го показателя качества электроэнергии не превысит заданного значения [56, с. 172]:

$$\frac{\partial^n F_n}{\partial X_1, \partial X_2, \dots \partial X_i, \dots \partial X_n} = P_n(X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n). \quad (3.2)$$

Сравнение подходов к нормированию несинусоидальности напряжения в России и за рубежом с точки зрения влияния на основные виды ущерба от высших гармоник производится Вагиным Г.Я (и др.) в работе [40]. Автор отмечает, что действующий в России стандарт [65] предъявляет более высокие требования к уровню суммарного коэффициента гармонического искажения K_i , по сравнению с аналогичными документами, действующими в странах Евросоюза [272] и США [294]. На данное обстоятельство указывает также автор [225], приводя при этом дополнительное сравнение с стандартами качества электроэнергии, действующими в Китае. Требования стандарта КНР сопоставимы с российскими нормативами, а в части требований к нечетным гармоникам даже имеют более строгие ограничения [225, с. 17].

Большой вклад в развитие теории статистического анализа несинусоидальных режимов для сетей высокого напряжения внесли сотрудники Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН) [115, 197].

Невзирая на большое количество разработанных методов [50] для определения виновника в ухудшение ПКЭ, эта задача по-прежнему является актуальной. В работе [50] представлен обзор существующих методик, но авторы для определения виновника искажения кривой напряжения в точке общего подключения (ТОП) рекомендуют использовать метод измерения величины знака искажающей модности [50, с. 119]. В работе [73] производится оценка влияния источников бесперебойного питания (ИБП) на качество электроэнергии в ТОП административных и деловых центров и энергоснабжающей организации. Экспериментальные данные были аппроксимированы с целью определения

относительной (от номинальной) мощности ИБП при которой уровень искажения суммарного гармонического коэффициента в ТОП превысит уровень 8%, регламентированный в [65]. Как показали исследования, нормативный коэффициент был превышен уже при достижении ИБП мощности 63%. Общее описание групп методов определения виновника ухудшения показателей качества электроэнергии в ТОП приводится в статье [180].

Для компенсации высших гармоник в настоящее время находят широкое применение гибридные структуры фильтров, представляющие сочетание активных и пассивных фильтров [4]. Анализ эффективности применения различных схем, реализующих коррекцию гармонических искажений, приводится в работе [5], где авторы производят сравнение изменения коэффициентов n -ной гармонической составляющей напряжения и тока (не нормируется ГОСТ 32144-2013) для устройств пассивной и гибридной фильтрации. Для систем распределённой генерации при наличии источника электроснабжения ограниченной мощности авторы [5] предлагают электротехнический комплекс на основе пассивных фильтров и гибридной системы, способный работать в повторно-кратковременном режиме, как отдельными структурами, так и совместно. На основании разработанной имитационной модели в среде MATLAB Simulink была доказана эффективность применения гибридного электротехнического комплекса для подавления 5-й и 7-й гармоник тока (таблица 3.1 – привод. по [5]) и напряжения, как правило, имеющих наибольшие значения амплитуд в действующих системах электроснабжения.

В работе [31] авторы исследуют резкопеременный режим работы электропривода скипового подъема шахтной подъемной машины для режима работы от 12-пульсного и 6-пульсного (ремонтный режим) преобразователей. Временные диаграммы, представленные в [31, с. 110] демонстрируют резкое изменение токов в цепи от 900 А до 50 А на достаточно коротких отрезках времени, что отражается в виде растекания спектра при проведении БПФ.

Таблица 3.1 Режимы коррекции кривых напряжения и тока различными типами фильтров
(привод. по [5])

Режим компенсации	Показатель, %					
	k_u	k_i	$k_{u(5)}$	$k_{i(5)}$	$k_{u(7)}$	$k_{i(7)}$
Без компенсации	17,3	19,6	11,5	16,8	8,81	9,21
Пассивная компенсация	7,74	5,78	2,78	3,95	2,62	2,69
Гибридная компенсация	3,77	3,69	0,23	0,2	0,23	0,43
Электротехнических комплекс на основе пассивных фильтров и гибридной системы	3,02	1,68	0,16	0,16	0,49	0,47

Увеличивается доля бытовой нагрузки (жилых и общественных зданий, офисных и торговых центров), имеющей нелинейные вольт-амперные характеристики. Современная бытовая техника, как правило, снабжается мостовыми выпрямителями с ёмкостными сглаживающими фильтрами. Такие блоки «вызывают значительные искажения формы кривой потребляемого тока, существенную долю которого составляют компоненты третьей гармоники» [6, с. 40].

С учетом несимметричного характера нагрузок для определения мощности активного фильтра гармоник в [6] предлагается следующая формула:

$$S_{A\Phi\Gamma}^2 = T_u^2 + N_{несимм}^2 + Q^2, \quad (3.3)$$

где $T_u = \sqrt{3}U_l I_{иск} ; N_{несимм} = \sqrt{3}U_l I_N ; I_{иск} — ток искажения, A; T_u — мощность искажения, B\cdot A; N_{несимм} — мощность несимметрии, B\cdot A$ [6, с. 44].

Применение гибридного фильтра с использованием трансформатора двойного питания в активном канале для компенсации ВГ на объектах жилищно-бытового и офисного секторов предложено в работе [48]. Вопросам разработки, моделирования и внедрения фильтров гармоник различной конфигурации посвящены работы исследователей, представляющих различные научные школы [74, 82, 97, 101, 153]. В последнее время для разработки алгоритмов управления

активными фильтрами начинает применяться методы нейронных сетей и нечёткой логики [117]. Обзор зарубежного опыта применения технических средств для обеспечения качества электроэнергии (активные, пассивные, гибридные фильтры; динамические компенсаторы напряжения и др.) представлен в книге [301]

Изменение ПКЭ в течение суток (рабочей смены) зачастую носит случайный характер, поэтому некоторые авторы [7] при выборе технических устройств и мероприятий по фильтрации ВГ предлагают учитывать статистические показатели.

Практические измерения суммарных коэффициентов гармонического искажения (в англ. терминологии THD) на шинах 0,4 кВ для предприятий по производству труб [9] и завода железобетонных изделий [10] показали превышение допустимых уровней напряжения. Несмотря на то, что уровень гармоник тока сети не нормируется, результаты анализа [9, 10] показали широкий спектр гармоник тока, в том числе и кратных трем.

Анализ коэффициентов n -ной гармонической составляющей K_{un} ряда крупных городских потребителей – супермаркетов, офисных центров, учебных заведений, проведённый сотрудниками СФУ [19] также показал в ряде случаев превышение допустимых норм. Зафиксированы высокие уровни 3-й гармоники тока – более 15% от основной составляющей [19, с. 116]. О достаточно высокой доле третьей гармоники при измерениях ПКЭ в офисном центре отмечается в работе [69]. Оценке качества электроэнергии в системе электроснабжения городского электротранспорта посвящена статья [179]. На основе приведенных исследований на тяговых подстанциях г. Самары авторы [179] предлагают установить фильтрокомпенсирующие устройства.

Спектральный состав нелинейной нагрузки, представляющей светодиодное освещение, задавался в соответствии с данными фактических измерений, представленных в [35, 215] для различных типов светодиодных источников света. В работе [105] Г.Я. Вагин приводит статистику измерений высших гармоник тока 15 различных источников света (светодиодные, люминесцентные, металлогалогенные, натриевые). Ряд источников света (производства КНР) по

уровню тока 3-й гармоники имеет значение до 80% от тока основной частоты; 9-я гармоника достигает величины 50%. На основании проведенных исследований, авторы отмечают необходимость принимать во внимание сечение нулевых проводников при модернизации осветительных установок (замене ламп накаливания на газоразрядные и светодиодные источники света) [105, с. 54]. Данная проблема связана с суммированием гармоник кратных трем в нулевых жилах кабелей сетей 380 В. Также мощным источником гармоник, кратных трем является однофазная нагрузка, использующая импульсные блоки питания по схеме с накопительным конденсатором [17]. Данное обстоятельство, очевидно, приводит к увеличению тока в нулевом проводе в трехфазных четырехпроводных сетях с глухозаземленной нейтралью. Результирующий ток в нейтральном проводе может быть определен по [17, с. 17]:

$$I_N = 3 \sqrt{\sum_{n=1}^{39} I_{3n}^2}. \quad (3.4)$$

На основании проведенных исследований [106] при электроснабжении городских потребителей с высокой долей нелинейной несимметричной нагрузки авторы не рекомендуют использовать кабели марки АСБ с использованием свинцовой оболочки кабеля в качестве нулевой жилы.

Для обеспечения установленных в [65] уровней ПКЭ и выработки реактивной мощности могут быть применены фильтрокомпенсирующие и фильтросимметрирующие устройства [174, 191, 192] или статические компенсаторы (СТАТКОМ) [151].

Таким образом, проблема нормирования, анализа и обеспечения показателей качества электроэнергии остаётся актуальной. С увеличением доли электроприёмников, искажающих ПКЭ остаются востребованными системы мониторинга качества электроэнергии. В рамках национальной инициативы «Энерджинет» и технологии «Цифровая подстанция» необходимо развивать методы цифровой обработки данных о параметрах режима с оценкой ПКЭ.

3.2 Методика расчета составляющих мощности при несинусоидальных режимах на основе пакетного вейвлет преобразования

Прежде всего, следует отметить, что для анализа несинусоидальных режимов систем электроснабжения исследователи не ограничиваются преобразованием Фурье и его различными модификациями. В настоящий момент накоплен опыт применения преобразования Гильберта-Хуанга (ННТ) для гармонического анализа сигналов, характеризующих режимы работы электроэнергетических систем [340]. Для анализа ВГ может быть с успехом применен алгоритм оконной интерполяции [252], позволяющий ослабить эффект растекания спектра при анализе нестационарных режимов систем электроснабжения. Представляет интерес предложенный в статье [328] метод, названный самим автором как «Псевдовейвлет» (англ. оригинал «pseudowavelets»).

Вейвлет преобразование становится одним из ведущих инструментов для анализа показателей качества электроэнергии вообще и для исследования несинусоидальных режимов в частности [282, 317].

В статье [127] авторы поднимают вопрос об оценке точности методов определения места повреждения ЛЭП при использовании методов цифровой обработки токов и напряжения. Авторы анализируют осциллограммы аварийных режимов на электросетевых объектах Нижегородской энергосистемы с применением ДПФ и его различных модификаций.

Практическая реализация разложения нестационарных несинусоидальных токов и напряжений с помощью пакетного ВП на основе двух типов вейвлетов представлена в работе [248]. В качестве базисных материнских вейвлетов были выбраны – вейвлет И. Добеши 20 порядка и вейвлет П. Вайдьянатха (P. Vaidyanathan) 24 порядка. Ингрид Добеши (профессор университета Дьюка, США) и Палгат Вайдьянатха (профессор Калифорнийского университета, США) являются известными учеными в области вейвлет анализа и разработчиками семейств вейвлетов, названными их именами. Частота дискретизации сигналов тока и напряжения в алгоритме, представленном в [248] была принята 1600 Гц,

при этом производилось разложение до третьего уровня с каждым типом вейвлета, что позволило выделить 8 характерных частотных коридоров шириной по 100 Гц.

Для моделирования несинусоидальных нестационарных процессов в настоящей работе примем за основу уравнения, предложенные в статье [236] для математического моделирования широкого круга различных искажений ПКЭ (полигармонический спектр напряжения, фликер или колебания напряжения, осциллирующая помеха переходного процесса).

Более подробно расчет потерь в токоведущих частях при несинусоидальных нестационарных режимах систем электроснабжения представлен в статье [159]. Согласно графику нагрузок [159, с. 85] происходит изменение состава и мощности нелинейной нагрузки. Для расчета потерь мощности применялся алгоритм пакетного ВП, наглядно демонстрирующий разложение токов и напряжений по частотным диапазонам, с сохранением информации о времени изменения режима.

В статье [346] создана физическая модель с применением мемристоров (пассивных элементов, изменяющих свое сопротивление в соответствии с интегралом тока за период его работы) для анализа гармонического состава компактных люминесцентных ламп (КЛЛ). В качестве математического аппарата для анализа высших гармоник авторы применяют непрерывное вейвлет преобразование [346, с. 60].

Общие рекомендации по расчету активной, реактивной и полной мощности для несимметричных и несинусоидальных режимов изложены в стандарте IEEE [295].

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

$$i(t) = \sum_{2^{-j}nm}^{2^{-j}n(m+1)-1} i_{j,m}(k) \cdot \psi(t) \quad (3.5)$$

$$u(t) = \sum_{2^{-j}nm}^{2^{-j}n(m+1)-1} u_{j,m}(k) \cdot \psi(k) \quad (3.6)$$

Активная мощность при несинусоидальных режимах определяется суммой активных мощностей высших гармоник. В статье [199] С. С. Смирнов даёт оценку влияния знака и величины активной мощности высших гармоник на уровни напряжений для сетей тягового электроснабжения с учетом особенностей рекуперативного торможения. Уровень вклада нелинейной нагрузки в напряжение ВГ можно определять на основе статистической обработки данных о несинусоидальных режимах, считает автор [199, с. 49]

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

$$P_{j,m} = \frac{1}{n} \left(\sum_{2^{-j}nm}^{2^{-j}n(m+1)-1} i_{j,m}(k) u_{j,m}(k) \right) \quad (3.7)$$

Разложение тока $i(t)$ по ортогональным проекциям (рис. 3.1) на напряжение $u(t)$, сопряжённое по Гильберту напряжение $H\{u\}$ и искажающую орту представлено в монографии [11]. Искажающая компонента тока $i_u(t)$ получена как геометрическая разность вектора тока $i(t)$ и двух ортогональных компонент (привод. по [11, с. 16]):

$$i_u(t) = i(t) - i_a(t) - i_p(t), \quad (3.8)$$

$$i_u(t) = i(t) - \frac{\int_0^T u(t)i(t)dt}{\int_0^T u^2(t)dt} u(t) - \frac{\int_0^T H\{u\}i(t)dt}{\int_0^T H^2\{u\}dt} H\{u\}. \quad (3.9)$$

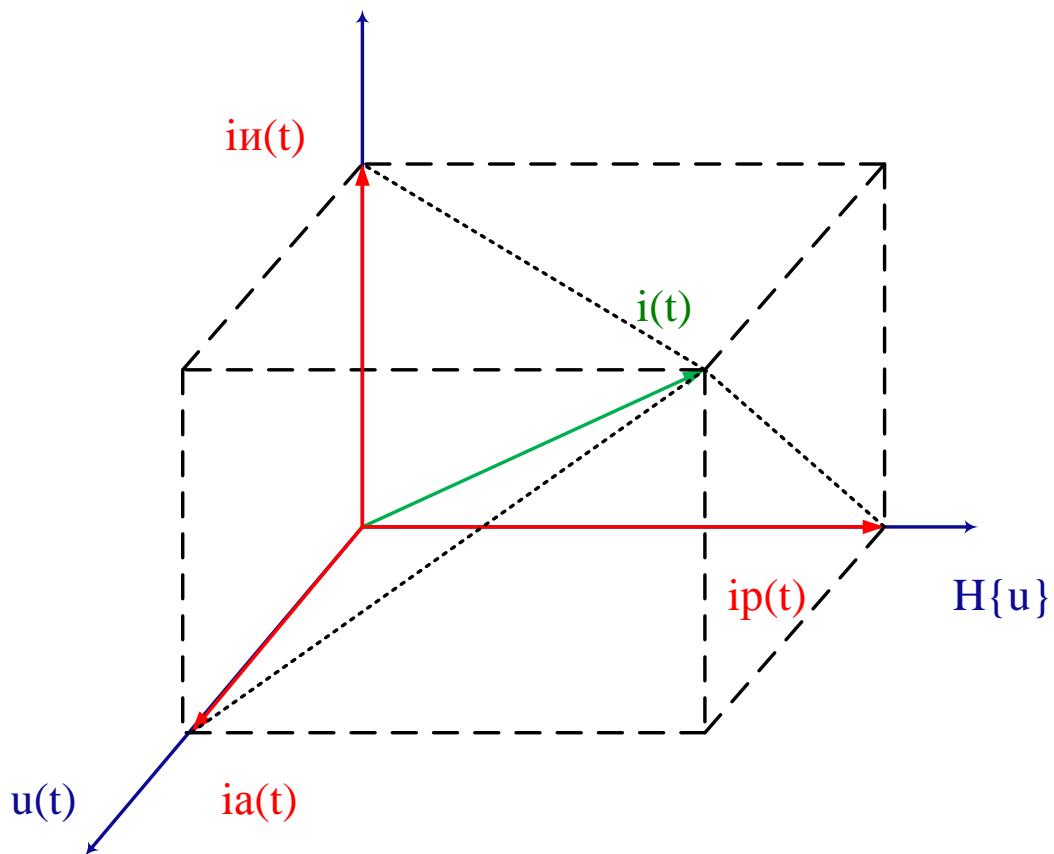


Рисунок 3.1 – Проекции вектора тока на ортогональные базисы

В настоящее время отсутствует общепринятый подход к определению реактивной мощности, обусловленной высшими гармониками. В статье [142] рассматриваются шесть различных методик расчета реактивной мощности при несинусоидальных режимах (теории Буденау, Фризе, Шарона, Кастерса-Мура, Зарнецкого и Маевского). Для заданного тестового сигнала, состоящего из основной и третьей гармоник, значения реактивной мощности по различным методикам находились в пределах от 4,93 вар до 5,15 вар [142, с. 15]. Авторы работ [255, 256, 263, 304] также занимаются исследованиями реактивной мощности при несинусоидальных режимах систем электроснабжения. В работе [347] для расчета реактивной мощности на ВГ предложено применение ВП.

Метод определения составляющих мощности трехфазных трехпроводных и однофазных сетей предложен в диссертации С. Н. Чижмы [219]. Предложенный метод предполагает адаптивную синхронизацию тактовой частоты системы контроля параметров электроэнергетической системы. Структура потерь в работе

[219] отображается на основе прямого и обратного преобразования координат (преобразования Парка). На основании предложенной методики были разработаны многофункциональные измерительные комплексы [219, с. 299], позволяющие определять параметры режима и управлять системой электроснабжения с тяговой нагрузкой.

В результате отсутствия общепринятых подходов в определении величины реактивной мощности при несинусоидальных режимах систем электроснабжения возможны имущественные споры между потребителем электрической энергии и энергоснабжающей организацией. В статье [222] Я. Э. Шклярский и соавторы установили некорректность показаний счетчиков реактивной энергии по результатам проведенных практических испытаний. Авторы дополнительно указывают на выявленную разницу в показаниях счетчиков различных фирм производителей. На основании проведенных теоретических исследований авторы предлагают способ учета реактивной энергии по величине полного тока, либо неактивной мощности [222, с. 388].

Новый подход к расчету реактивной мощности и энергии при несинусоидальных нестационарных режимах, заданных набором дискретных величин предложен в статье [208]. В настоящей диссертационной работе набор дискретных мгновенных значений (токов, напряжений) будем подвергать предварительной декомпозиции по гармоническим и интергармоническим группам с помощью пакетного вейвлет преобразования для определения составляющих мощности, с целью сохранить информацию о времени изменения режима электроэнергетической системы. Перспективы применения пакетного вейвлет преобразования для анализа и расчета реактивной мощности при нестационарных несинусоидальных режимах рассмотрены в работе сотрудников Санкт-Петербургского горного университета [196].

В настоящей работе не предпринимается попытка обосновать справедливость того или иного подхода, задача стоит адаптировать существующие методики для расчета через коэффициенты пакетного вейвлет преобразования.

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

$$i = i_a + i_r. \quad (3.10)$$

Реактивную мощность по Фризе определяется по формуле:

$$Q = UI_r = \sqrt{U^2 I^2 - U^2 I_a^2}. \quad (3.11)$$

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:

$$g = \frac{P_{j,m}}{(U_{j,m})^2} = \frac{\frac{1}{n} \left(\sum_{2^{-j}nm}^{2^{-j}n(m+1)-1} i_{j,m}(k) u_{j,m}(k) \right)}{\frac{1}{n} \sum_{2^{-j}nm}^{2^{-j}n(m+1)-1} u_{j,m}^2(k)} \quad (3.12)$$

Активная составляющая мгновенного тока в этом случае определяется по формуле:

$$i_a = g u_{j,m} = \frac{\frac{1}{n} \left(\sum_{2^{-j}nm}^{2^{-j}n(m+1)-1} i_{j,m}(k) u_{j,m}(k) \right)}{\frac{1}{n} \sum_{2^{-j}nm}^{2^{-j}n(m+1)-1} u_{j,m}^2(k)} \cdot \frac{1}{n} \sum_{2^{-j}nm}^{2^{-j}n(m+1)-1} u_{j,m}(k) \quad (3.13)$$

Действующее значение активного тока определяем по:

$$I_a = \sqrt{\frac{1}{2^N} \sum_{2^{-j}nm}^{2^{-j}n(m+1)-1} i_a^2(k)} = \sqrt{\frac{1}{2^N} \sum_{2^{-j}nm}^{2^{-j}n(m+1)-1} i_{j,m}^2(k)} \quad (3.14)$$

Коэффициент искажения синусоидальности:

$$K_u = \frac{I_{(v)}}{I_{(50)}} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^2 \sum_{k=0}^{k_m} (i_{j,k}^D)^2}{\sum_{k=0}^{k_m} (i_{3,k}^A)^2 + \sum_{k=0}^{k_m} (i_{3,k}^D)^2}} \quad (3.15)$$

Определённые по разработанной методике интегральные характеристики параметров режимов ЭЭС (действующие значения токов, напряжений, мощности) позволяют повысить точность технико-экономических расчетов, направленных на внедрение фильтро-компенсирующих устройств для подавления ВГ [327].

3.3 Экспериментальные исследования и анализ несинусоидальных режимов систем электроснабжения

В соответствии с [66] принято различать контроль и мониторинг качества электроэнергии. Под контролем следует понимать проверку соответствия значений показателей качества электроэнергии, установленными [65]. Мониторинг, в свою очередь, предполагает процедуры одиночных или непрерывных наблюдений за ПКЭ «проводимых с целью оценки существующего уровня КЭ, анализа, прогноза и принятия, при необходимости, соответствующих мер по результатам мониторинга» [66, с. 5]

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 3.2). Физические измерения производились на сертифицированном оборудовании – с применением прибора METREL MI 2892 (номер в госреестре 57207-14), соответствующем классу А [67]. Параллельно измерения дублировались прибором ИВК «Омск-М», соответствующим классу S [67].

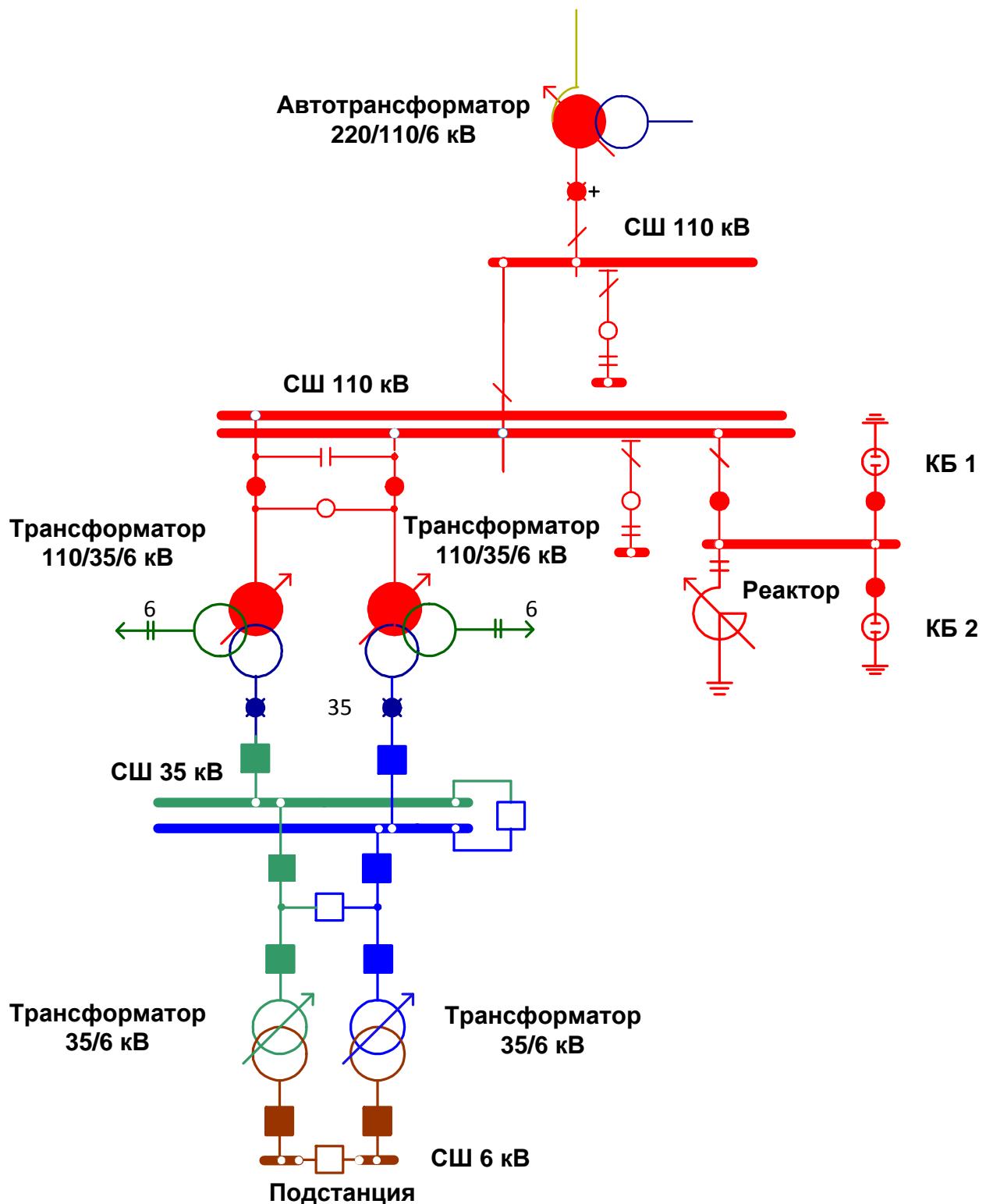


Рисунок 3.2 – Фрагмент исследуемой системы электроснабжения

Результаты измерений на СШ 6 и 35 кВ представлены на рисунках 3.3 и 3.4 соответственно.

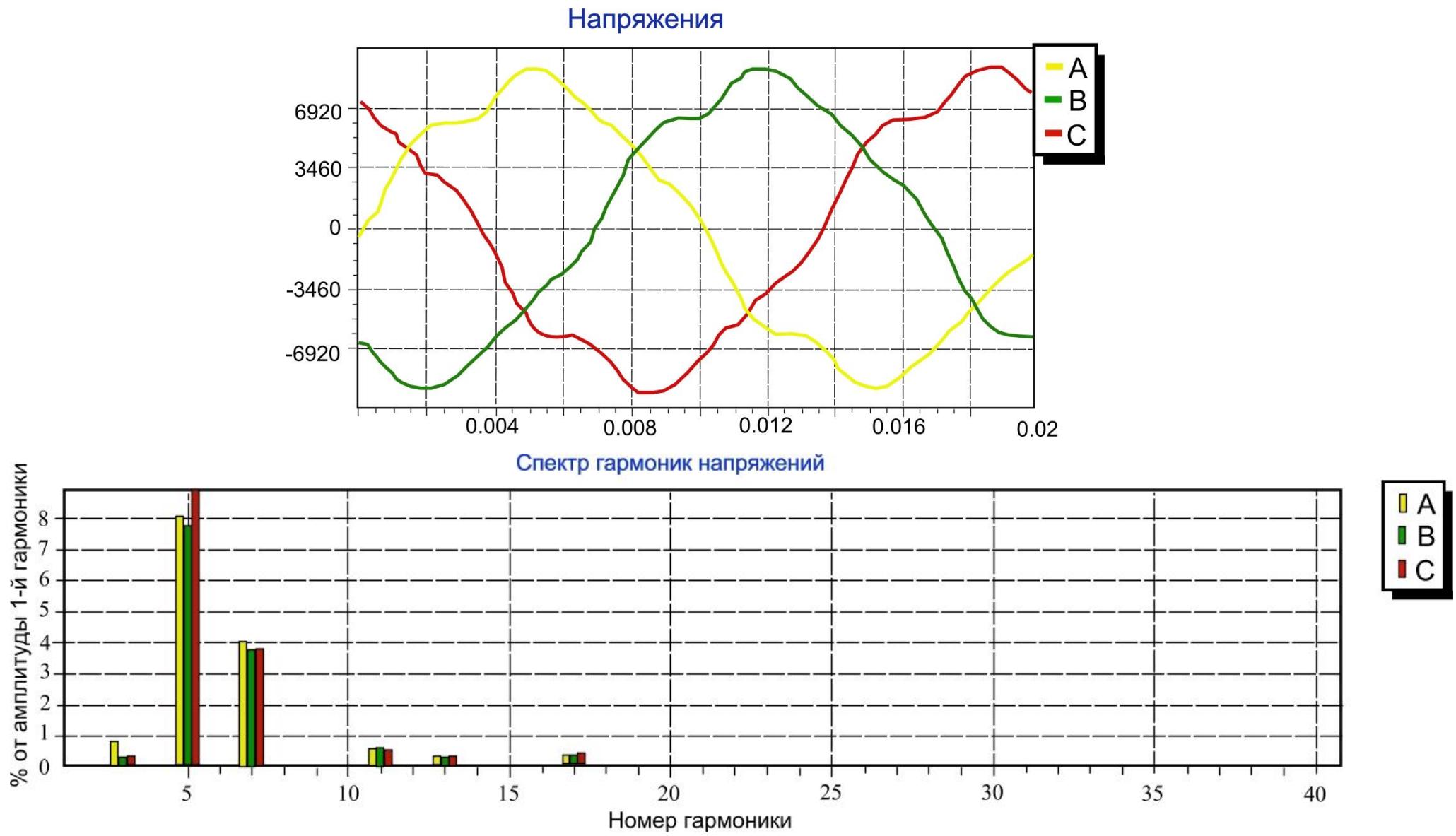


Рисунок 3.3 – Результаты измерения уровней высших гармоник на ПС 6 кВ

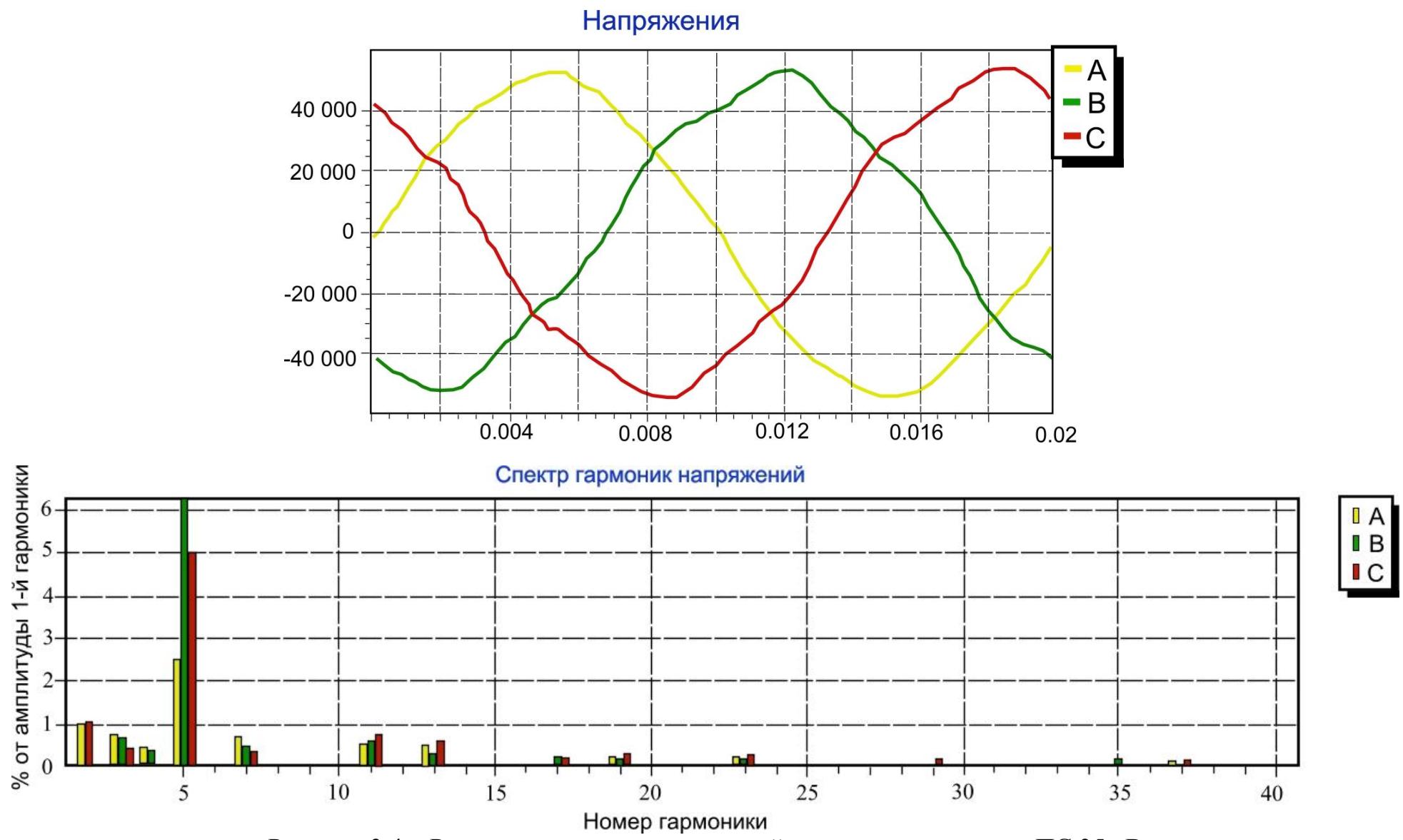


Рисунок 3.4 – Результаты измерения уровней высших гармоник на ПС 35 кВ

Как следует из полученных результатов, коэффициенты n -ной гармонической составляющей K_{Un} не соответствуют требованиям ГОСТ 32144–2013 по 5 и 7 гармоникам. В спектральном составе напряжения присутствуют также канонические нечетные гармоники (11 и 13), что имеет качественное совпадение с результатами моделирования в работе [4]. Источниками гармоник являются станции управления погружными электродвигателями (ПЭД), установленными на стороне 0,4 кВ. Существенная доля нелинейной нагрузки 0,4 кВ приводит к искажению синусоидальности на шинах 6–35 кВ. Статистический анализ кондуктивных помех в системе электроснабжения, содержащей станции управления ПЭД «Электон-05» на предприятии нефтедобывающей отрасли приводится в работах [116, 226].

Результаты измерений, полученные в настоящей диссертационной работе в части коэффициентов n -ной гармонической составляющей напряжения имеют качественное совпадение с результатами, опубликованными в статьях [116, 226].

Для систем децентрализованного электроснабжения предприятий минерально-сырьевого комплекса, как отмечают авторы в [4] – «проблема подавления гармонических составляющих тока приобретает особую актуальность вследствие значительного внутреннего сопротивления источника и связанного с этим роста уровня искажений формы сетевого напряжения» [4]. Для автономной энергосистемы, представленной газопоршневой и газотурбинной электростанциями, суммарной мощностью 170 МВт авторами работ [16, 96] производились замеры ПКЭ для различных режимов работы системы электроснабжения (изменялся состав электроприёмников и уровень компенсации реактивной мощности БСК). На основании проведенных исследований [16] в узле с БСК были зафиксированы резонансные усиления нечетных гармоник (5, 7, 11 и 13). Как отмечают авторы на исследуемом объекте «В совокупности зафиксировано более 100 аварийных событий, связанных с работой устройств компенсации. Большая часть неисправностей вызвана вздутием и взрывами конденсаторных батарей» [16, с. 101].

Анализ изменения коэффициента суммарного гармонического искажения K_u (THD) и коэффициентов n -ных гармонических составляющих напряжения $K_{u(n)}$ при работе частотно-регулируемого электропривода насосов котельных при условии питания от централизованной системы электроснабжения и для случая питания от дизель-генератора проведен в работе [24]. Как следует из представленной диаграммы (рисунок 3.5. – привод. по [24, с. 143]) – для системы автономного (резервного) питания необходимо учитывать увеличение доли высших гармоник.

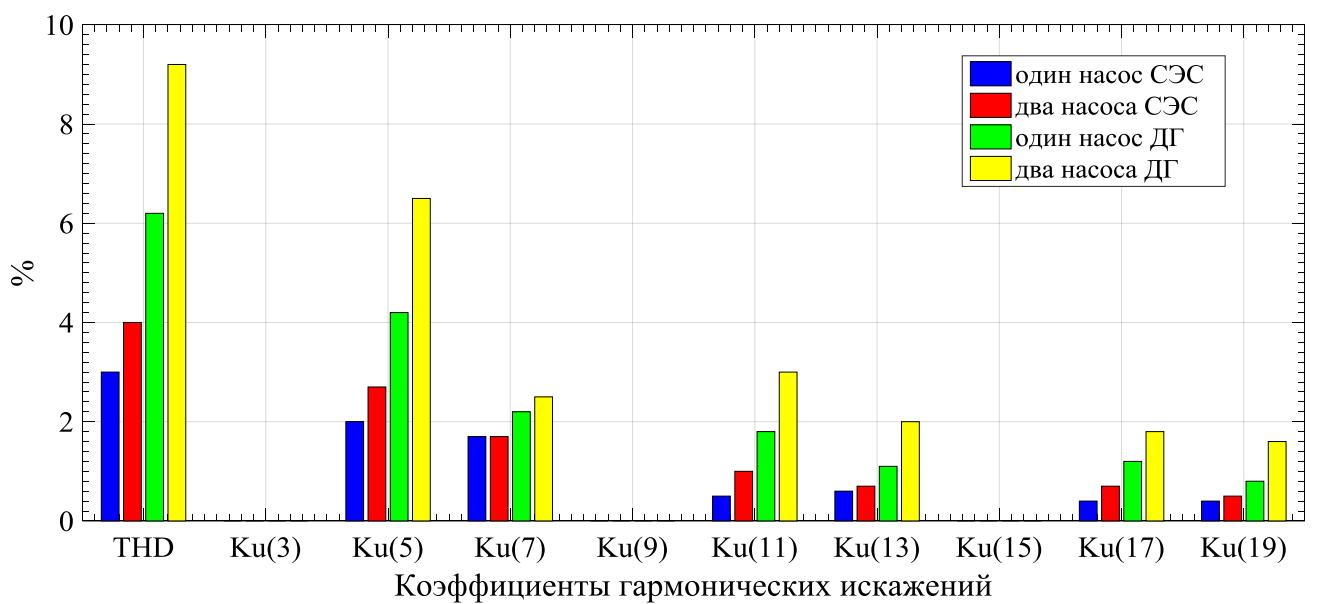


Рисунок 3.5 – Значения суммарного коэффициента гармонических составляющих и коэффициентов n -ных гармонических составляющих для напряжения при питании от централизованной СЭС и ДГ (привод. по [24, с. 143])

В работе [95] на испытательном стенде был исследован спектральный состав преобразователя частоты Mitsubishi FRD740, питающий трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором ($P=370$ Вт). Исследования производятся для различных уровней нагрузки на валу (от P_h до холостого хода). Вызывают вопросы, полученные в [95, с. 157] на входе преобразователя частоты (в спектре сетевого тока) гармоники кратные трем.

Исследованию влияния нелинейной и несимметричной нагрузки на системы электроснабжения нетяговых потребителей при использовании установок распределённой генерации посвящена работа [36]. На основе анализа с

применением имитационной и физической модели авторы отмечают, что увеличивается ток обратной последовательности, который может превысить допустимые значения по условиям нагрева [36, с. 48]. Искажения, вносимые тяговыми подстанциями на сети 110 кВ ПС «Селенга» в части несинусоидальности и несимметрии приведены в работе [53].

В монографии [197] С. С. Смирнов на основании большого количества измерений и анализа высших гармоник в сетях Восточной Сибири обращает внимание на характерные особенности распространения ВГ для сетей высокого напряжения:

- 1) существенное и быстрое изменение коэффициентов n -ной гармонической составляющей $K_{u(n)}$ в течение суток;
- 2) присутствует фактор несимметрии – коэффициенты $K_{u(n)}$ по фазам заметно отличаются;
- 3) увеличение $K_{u(n)}$ при коммутациях и влияние коммутаций на режим работы удаленных участков сети;
- 4) проявление фактора волновых процессов.

Проблемам анализа, моделирования и расчета несинусоидальных режимов сетей высокого напряжения также посвящены работы сотрудников ИрГТУ [193], ИСЭМ СО РАН [114, 115, 198], МЭИ [104] и др. В статье [189] для сетей 110 кВ и выше предложен метод, позволяющий выявлять источники гармонических искажений, которые могут привести к ухудшению показателей качества электроэнергии, характеризующих несинусоидальность режима.

Высшие гармоники, источниками которых, как правило, является нагрузка 6-0,4 кВ, при проведении замеров ПКЭ бывают зафиксированы в сетях 110 кВ на границах раздела между АО-Энерго и распределительными сетями. Сотрудниками Энергетического института Томского национального исследовательского политехнического университета (ТПУ) в период 2009-2012 гг. были произведены измерения ПКЭ в электрических сетях 110 кВ некоторых предприятий МРСК Сибири и Юга России («Бурятэнерго», «Читаэнерго», «Алтайэнерго», «Омскэнерго», «Волгоградэнерго», «Ростовэнерго»,

«Кузбассэнерго»). Авторы на основании обработки данных измерений отмечают: «По всем исследованным ЭС коэффициенты гармонических составляющих не отвечают требованиям стандарта ... особенно это касается гармоник, кратных 3» [13, с. 72]. Статистическая обработка результатов исследования ВГ в 10 энергосистемах приводится в работе [108]. Анализ дополнительных потерь активной энергии от действия ВГ для ЛЭП 110 кВ в работе [34] показал, что потери от ВГ могут достигать значения 13% от основных потерь энергии. Авторы предлагают включать в расчет технологических потерь электроэнергии методику добавочных потерь от действия ВГ. Расчет дополнительных потерь от высших гармоник в кольцевой сети 110 кВ, выполненной проводом АС 120/19 с учетом распределенности параметров линии представлен в работе сотрудников ТПУ [254]. Анализу коэффициентов корреляции и законов распределения ВГ (как случайных величин) в узлах системы 110 кВ посвящена работа [319]. Для моделирования узлов нагрузки с целью анализа несинусоидальных режимов в статье [214] предложено пофазное моделирование вольт-амперных характеристик, полученных путём осциллографирования фазных токов и напряжений. Предложенный авторами [214] подход может быть реализован не только в отношении отдельных нелинейных электроприёмников, но и для подсистем сложных разветвленных сетей.

Для проведения численных экспериментов в настоящей работе была составлена имитационная модель в среде MATLAB Simulink (рисунок 3.6). Имитационное моделирование для анализа распространения ВГ в ЭЭС напряжением 110 кВ и выше находит все более широкое применение [21]. Корректное задание параметров элементов ЭЭС позволяет добиваться относительной погрешности для n -ной гармонической составляющей тока на приемлемом уровне [21, с. 49].

Как показано в работе [47] силовой автотрансформатор тоже может стать источником ВГ, однако их уровнем «в отсутствие резонансных явлений ... существенно ниже допустимых [47, с. 18]. На этом основании при построении имитационной модели ВГ автотрансформатора не будем учитывать.

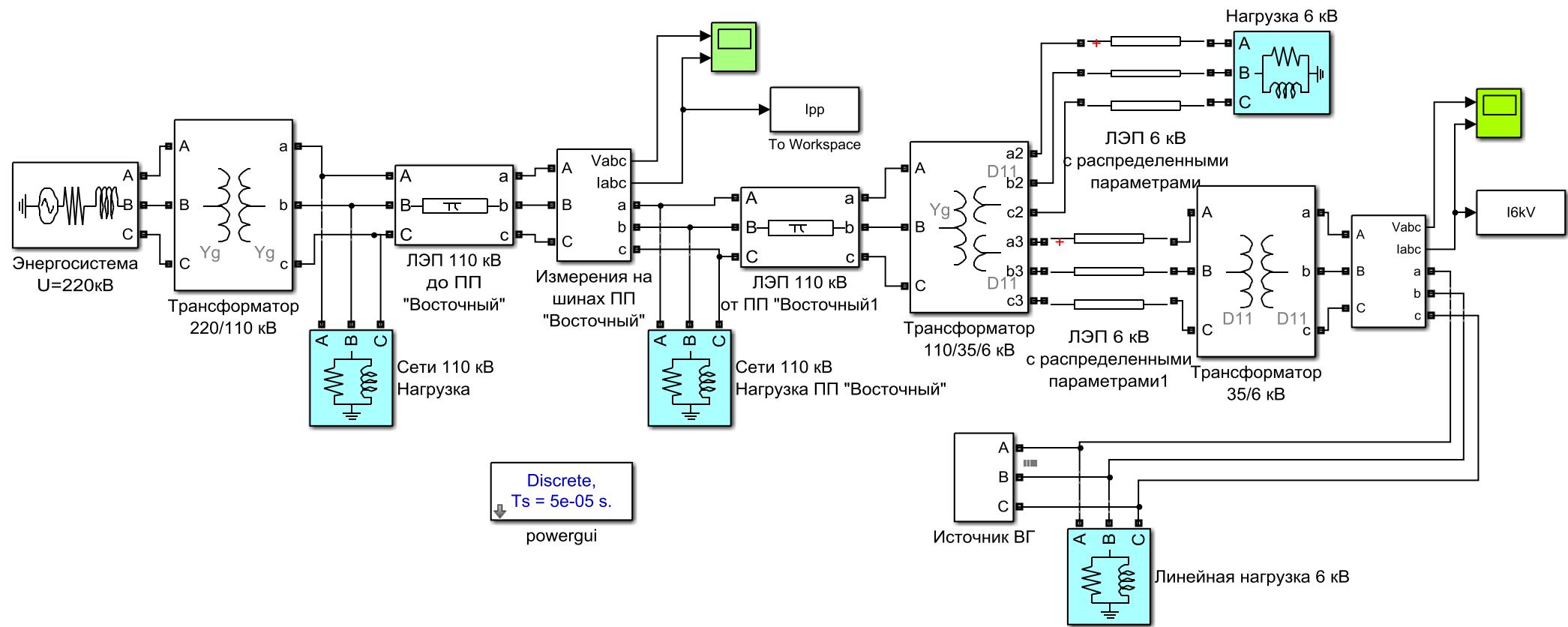


Рисунок 3.6 – Имитационная модель MATLAB Simulink

С помощью имитационной модели (рисунок 3.6) в ходе исследования были получены осциллограммы линейных напряжений на шинах 6 кВ (рисунок 3.7) и тока на вводном выключателе (рисунок 3.8).

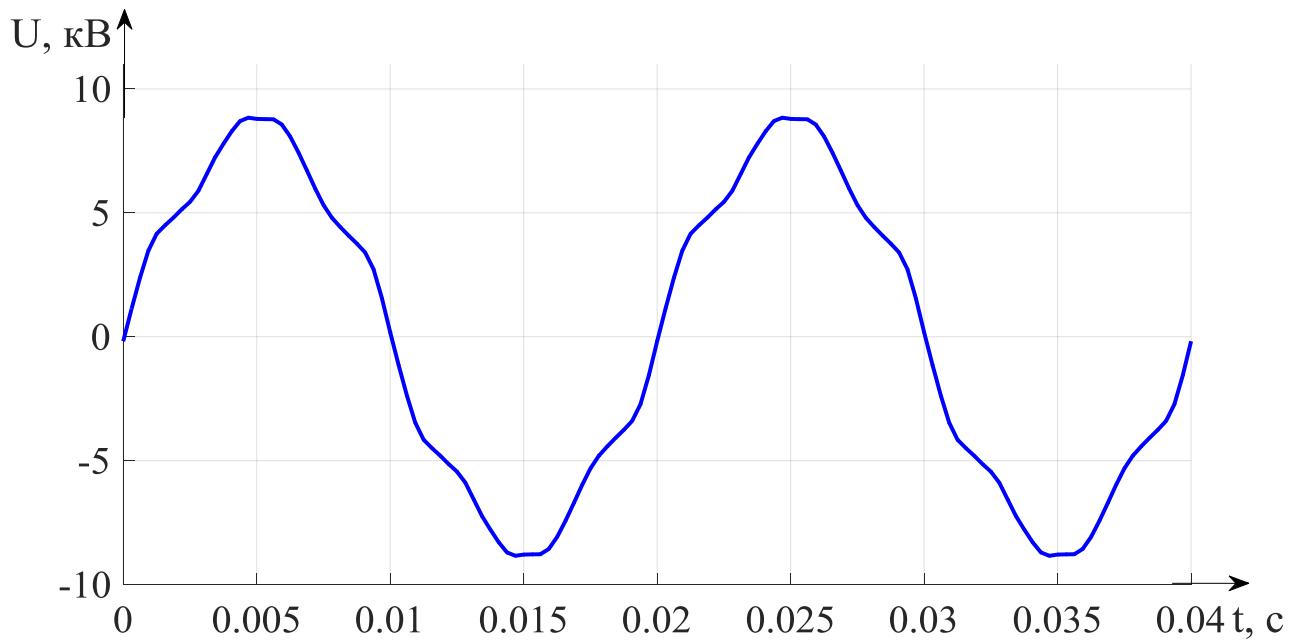


Рисунок 3.7 – Осциллограмма напряжения за время 0,04с

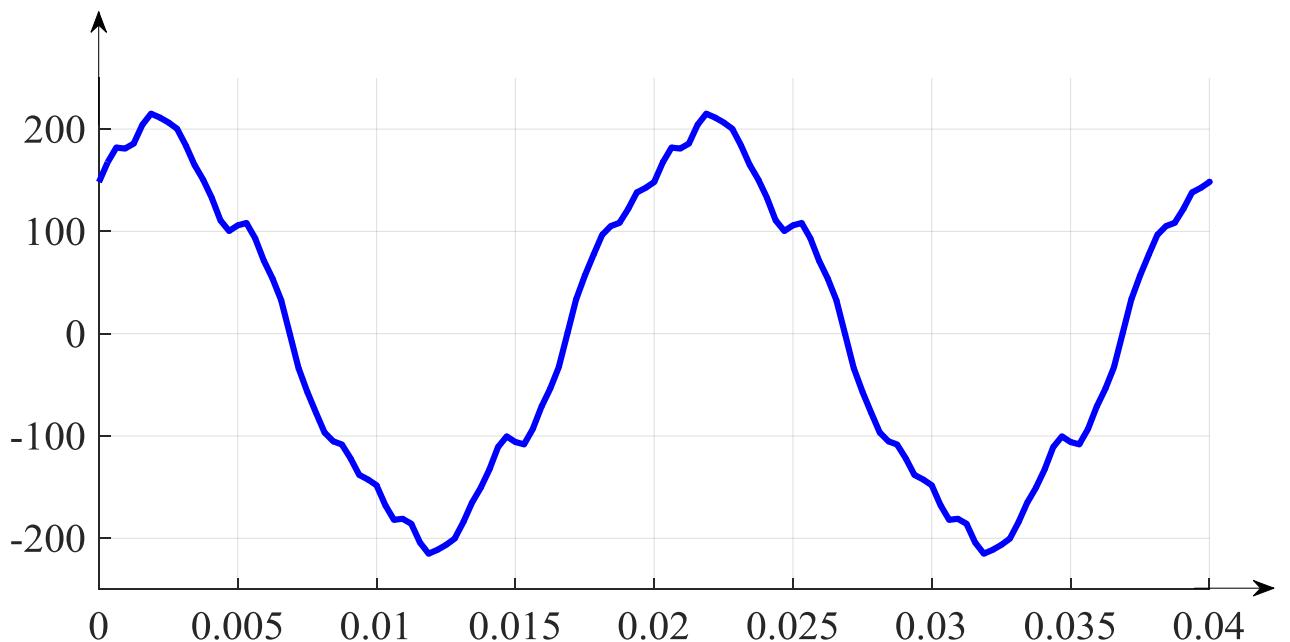


Рисунок 3.8 – Осциллограмма сигнала тока за время 0,04с

В соответствии с разработанной во второй главе настоящей диссертации методикой анализа несинусоидальных режимов проведем анализ токов и напряжений с целью расчета отдельных составляющих мощности для каждой

гармоники. В качестве базисной примем схему разложения, представленную на рисунке 3.9

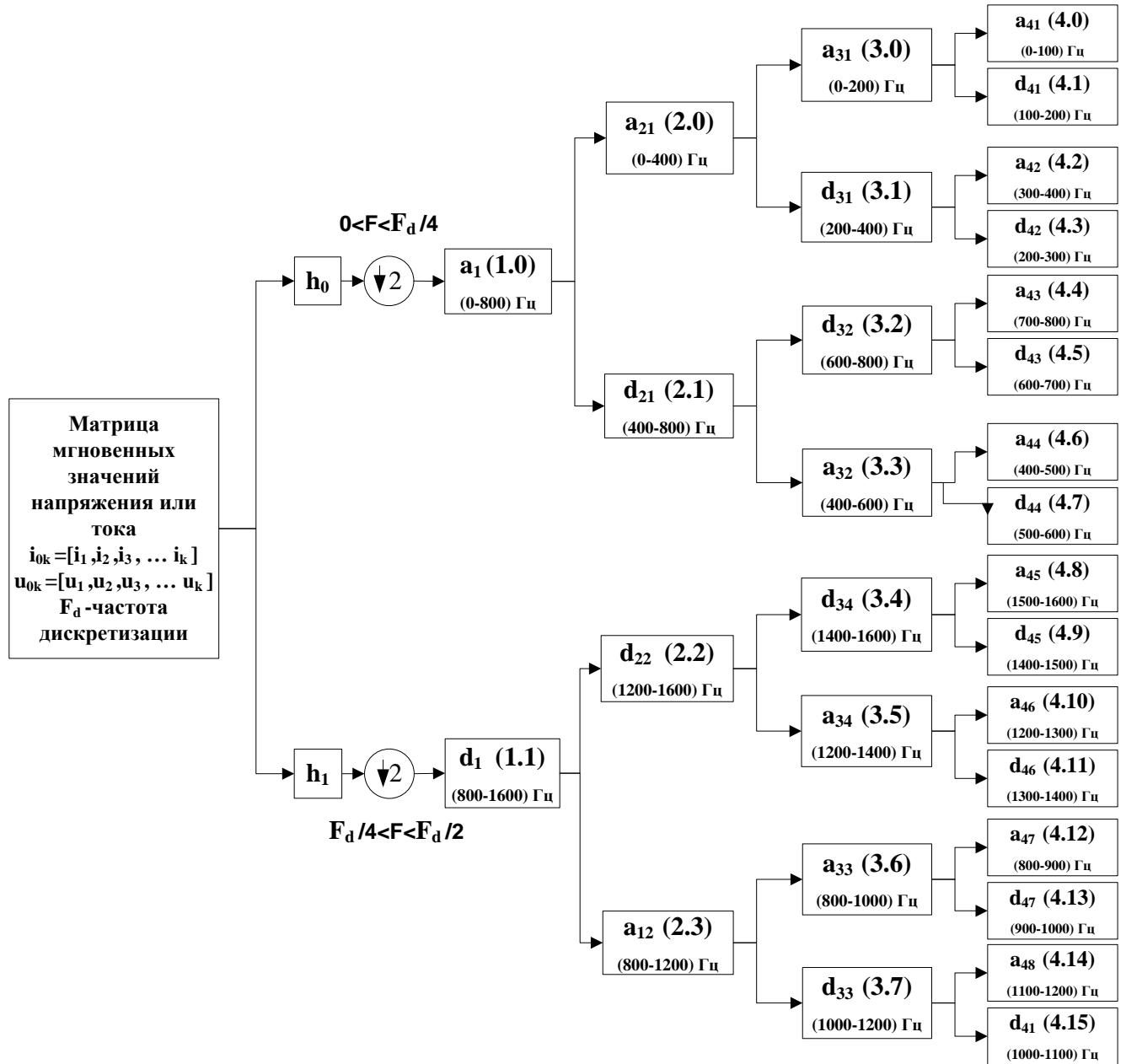


Рисунок 3.9 – Схема пакетного вейвлет разложения напряжения

В результате пакетного вейвлет преобразования получаем 16 матриц вейвлет коэффициентов одинаковой размерности. Общая графическая интерпретация полученных в результате анализа вейвлет коэффициентов представлена на рисунке 3.10

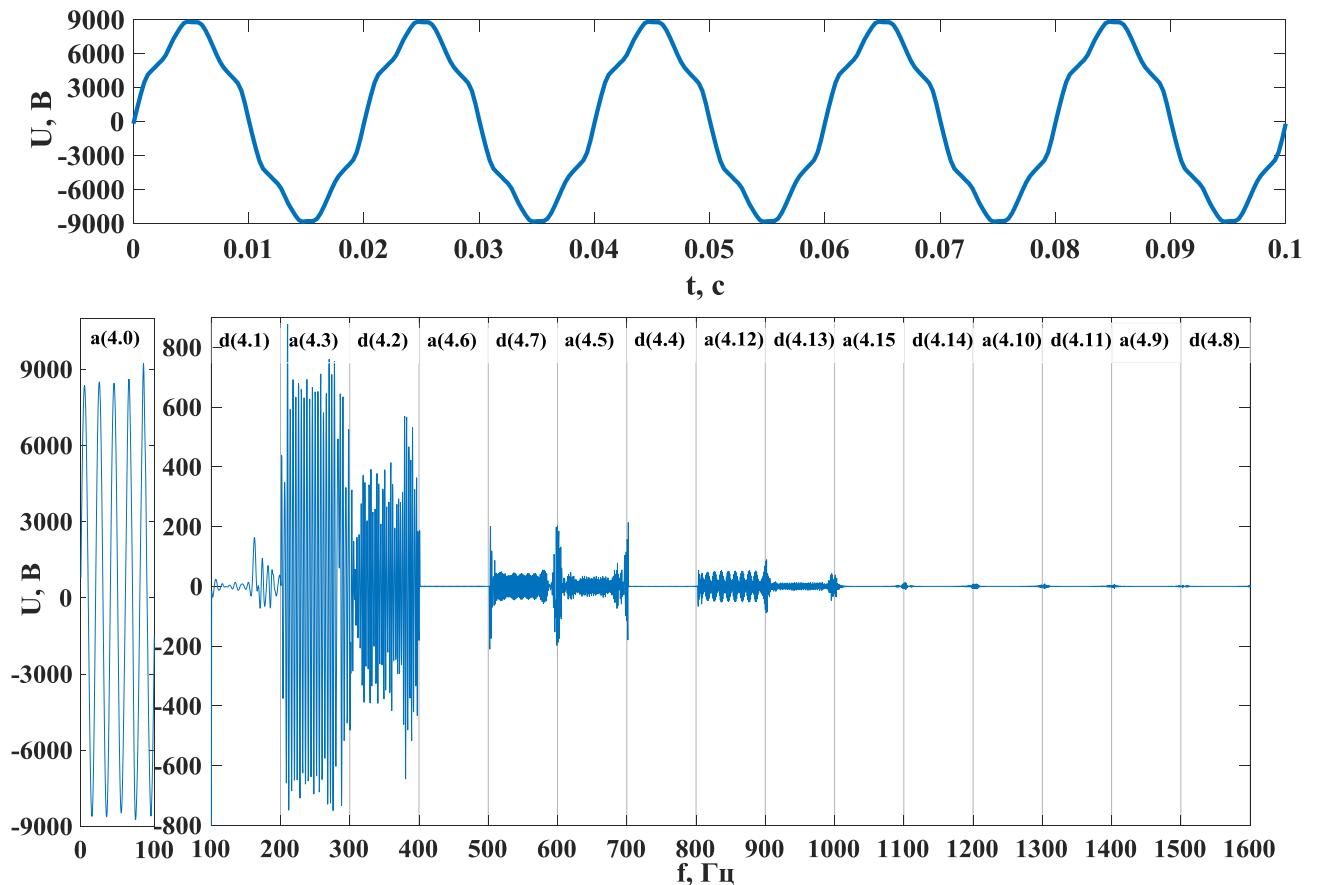


Рисунок 3.10 – Результат пакетного вейвлет преобразования сигнала напряжения

По предложенной в параграфе 3.3 настоящей диссертации методике расчета отдельных составляющих мощности был произведен расчет для основной частоты, 5-й и 7-й гармоник. Остальными гармониками пренебрегаем ввиду малости амплитуд токов. Дополнительно определены тока для каждой гармоники.

Результаты расчетов сведены в таблицу 3.2, из которой следует, что разработанная методика дает приемлемые по точности результаты. Относительная погрешность определения составляющих мощности по вейвлет коэффициентам не превысила 1%.

Таблица 3.2. Расчет параметров режима по вейвлет коэффициентам

Параметр	Час- тота, Гц	Обозначение, единица измерения	Фактическое значение	Значение, вычисленное через вейвлет коэффициенты
Активная составляющая тока	50	I_{a1} , А	402,3	402,2
	250	I_{a5} , А	68,4	69,1
	350	I_{a7} , А	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

Расчеты составляющих мощности в системе электроснабжения 0,4 кВ по разработанной в настоящей диссертации методике представлены в статье автора [177].

3.4 Методика идентификации, анализа и расчета интергармонических составляющих в токах и напряжениях по вейвлет коэффициентам

Несинусоидальные режимы характеризуются наличием различных гармонических составляющих – высших гармоник, субгармоник и интергармоник. Интергармоники – 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 IEC 61000-4-7:2 [292, с. 21] 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.

Наличие интергармоник в сети может приводить к возникновению относительных изменений напряжения. Характеристика изменения напряжения в соответствии с [62] определяется как «разность ΔU между двумя последовательными значениями огибающих среднеквадратичных значений фазных напряжений» [62, с. 3]:

$$\Delta U = U(t_1) - U(t_2). \quad (3.16)$$

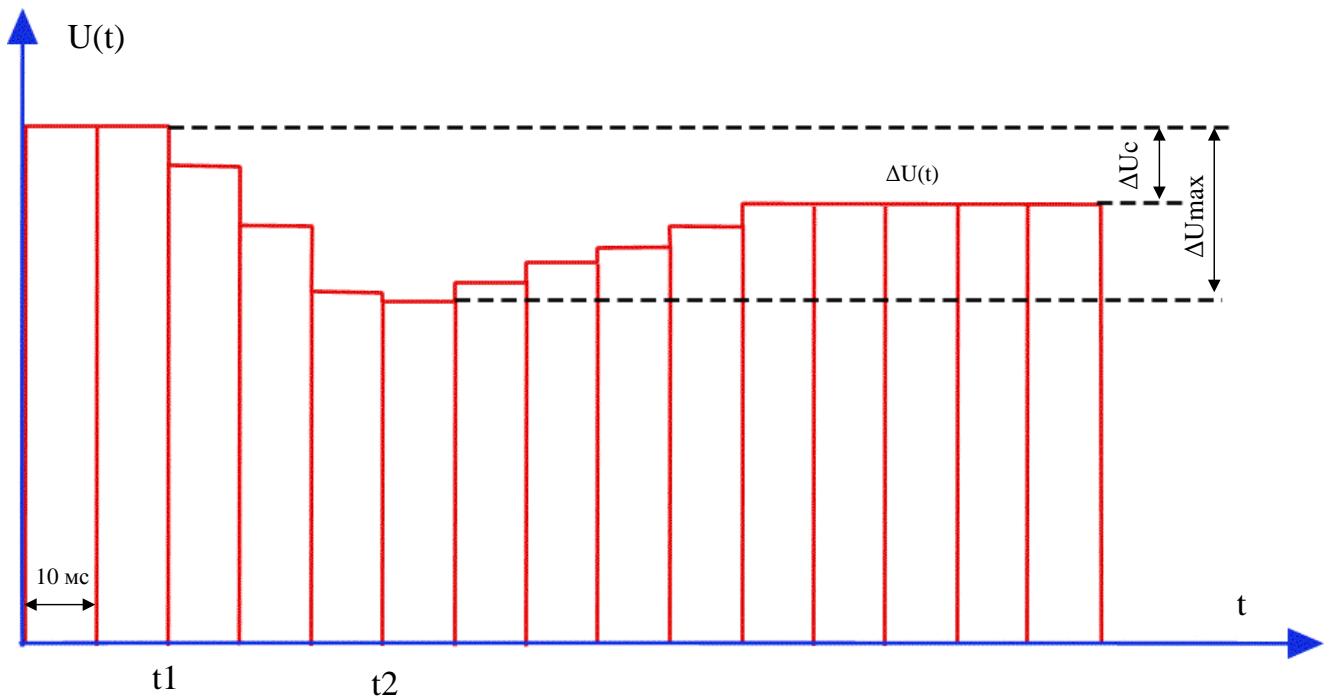


Рисунок 3.11 – Схема определения огибающей среднеквадратичных значений напряжения (привод. по [62, с. 9]).

Дополнительно к вышеперечисленным источникам ИГ, согласно [298] следует относить и лазерные принтеры, имеющие следующую функцию тока [298, с. 2338]:

$$i(t) = \frac{u(t)}{R(t)} = \frac{\sin 2\pi ft}{1 - r \sin 2\pi f_0 t} = \sin 2\pi ft \left(1 + r \sin 2\pi f_0 t + r^2 \sin^2 2\pi f_0 t + r^3 \sin^3 2\pi f_0 t + \dots\right), \quad (3.17)$$

где f_0 – частота изменения нагрузки

В статье [350] исследуются уровни ИГ, возникающих при работе ветроэнергетических установок (ВЭУ). В работе показано, что ИГ обусловлены пульсацией напряжения на шине постоянного тока. Дополнительные ИГ генерируют каскады выпрямитель-инвертор-выпрямитель [350]. Спектральный состав ИГ в ВЭУ и формула для расчета частот ИГ представлена в книге [264, с. 164, 167].

Аналогичным образом, по мнению авторов [298], может быть записана функция тока для определения спектра ИГ и для сварочных аппаратов.

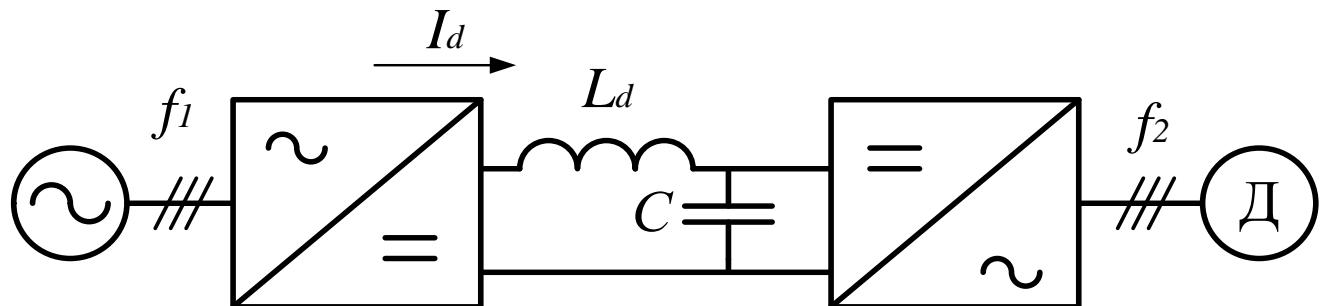


Рисунок 3.12 – Структурная схема преобразователя частоты с звеном постоянного тока (привод. по [85, с. 79]).

Спектр тока питающей сети может быть представлен следующим гармоническим рядом [85, с. 79]:

$$f_c = (kp_1 \pm 1)f_1 \pm p_2 n f_2, \quad n, k \in \mathbb{N}_0 \quad (3.18)$$

Анализ ИГ, генерируемых каскадом выпрямитель-инвертор для регулирования скорости АД при различных частотах f_2 , в том числе и на выходе инвертора производится в работах [318, 336].

В работе [27] показано, что «для анализа ИГ… разложение в ряд Фурье в общем случае не применимо из-за меняющегося периода в зависимости от относительной выходной частоты и ее кратности числу пульсаций преобразователя» [27, с. 142]. Для анализа ИГ автор [27] предлагает использовать метод спектрального анализа стационарных случайных процессов. Метод представляет собой преобразование Фурье корреляционной функции $K(\tau)$ случайного процесса $\xi(t)$ [27, с. 24]:

$$S(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} K(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau. \quad (3.19)$$

Для анализа ИГ в работе [27] предложено использовать формулу (3.19) для незатухающей части корреляционной функции.

В работе [39] приводится комплексный анализ влияния резкопеременной нагрузки (ускорительного комплекса У-70) на качество электроэнергии в сетях 10 кВ. За время цикла (≈ 10 с) пиковые значения потребления активной и реактивной мощности составляли 65 МВт и 71 Мвар соответственно, а момент паузы снижались практически до нуля. В ходе физических экспериментов с применением сертифицированного оборудования авторы [39] зафиксировали несоответствие требованиям ГОСТ значений колебания напряжения с помощью кратковременной и длительной доз фликера. Суммарный коэффициент гармонических искажений превышал величину 20% (для сетей 10 кВ предельное значение 8%). Было установлено, что гармоники от двух секций 10 кВ проникают в сеть 220 кВ через трансформатор [39, с. 63].

На основании данных, представленных в статье [152] можно косвенно оценить минимальный и максимальный уровни колебаний напряжения в системе электроснабжения с дуговыми сталеплавильными печами. Результаты численного эксперимента показали, что максимальный уровень колебаний составил $\Delta U_{max}=2,38\%$, минимальный $\Delta U_{min}= -5,96\%$ [152, с. 29]. Моделированию дуговых сталеплавильных печей для оценки фликера и оценки эффективности

использования статического компенсатора реактивной мощности посвящена работа [150].

В работе [232] для определения амплитуд и частот ВГ и ИГ токов и напряжений применяется метод цифровой фильтрации, где в качестве одного из фильтров применяется вейвлет Добеши 20 порядка (db 20).

С целью определить виновника в ухудшение ПКЭ – источника ИГ в работе [240] предлагается алгоритм, основанный на определении знака комплексного сопротивления. В точке замера ПКЭ определяется значение сопротивления ИГ [240, с. 334]:

$$Z_{\text{ИГ}} = \frac{U_{\text{ИГ}}}{I_{\text{ИГ}}} = \frac{|U_{\text{ИГ}}|}{|I_{\text{ИГ}}|} \cos \varphi_{\text{ИГ}} + j \frac{|U_{\text{ИГ}}|}{|I_{\text{ИГ}}|} \sin \varphi_{\text{ИГ}} = R_{\text{ИГ}} + jX_{\text{ИГ}}. \quad (3.20)$$

В статье [271] установлена положительная зависимость корреляционной связи между уровнем ИГ в питающей сети системы освещения и кратковременной дозой фликера P_{st} [65, с. 6]. Авторы отмечают, что в настоящий момент для определения дозы фликера производится оценка колебаний напряжения, но также обнаружена прямая зависимость колебаний напряжения и наличия интергармонических искажений. Таким образом, дальнейшие исследования, направленные на идентификацию ИГ позволяют производить оценку дозы фликера. Анализу прямой связи дозы фликера и быстрых изменений напряжения посвящена статья [330].

В статье [338] для обеспечения требуемых уровней дозы фликера предложено схемное решение для устройства СТАТКОМ для избирательной фильтрации ИГ. Авторы представили алгоритм идентификации ИГ на основании преобразований Парка [338].

На основании анализа колебаний напряжения в системе электроснабжения, содержащей асинхронные двигатели с резкопеременной нагрузкой авторы статьи [217] предложили оригинальную методику определения дозы фликера. В качестве исходных данных предложено использовать среднюю мощность нагрузки за

время цикла и статистические характеристики параметров режима (дисперсию, математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение).

В работе [279] исследованы светодиодные источники с точки зрения двух аспектов. Первый – исследован уровень ВГ, генерируемых светодиодами в систему электроснабжения. Результаты исследований показали, что спектральный состав и амплитуды отдельных гармоник могут в значительной степени отличаться в зависимости от фирмы (страны) производителя и технологии изготовления. Второе направление исследования в статье [279] связано с влиянием колебания напряжения на мерцание светового потока светодиодных источников света. В заключении авторы отмечают, что степень влияния не столь велика как для ламп накаливания, но эффект колебаний светового потока (дозы фликера) имеет место быть [279, с. 113].

Метод определения уровней ИГ в сети промышленного предприятия, где присутствует ЧРП на основе принципов линейной алгебры, предложен в статье [233]. Авторы с помощью предложенного метода (Matrix Pencil) определили амплитуды токов двух интергармонических составляющих – 185 Гц и 275 Гц.

Поскольку функции синуса и косинуса не локализованы по времени (распространены на всем интервале), БПФ не позволяет точно определить частоту и амплитуду ИГ. В статье [218] для спектрального анализа ИГ предлагается отказаться от прямоугольного окна в методе оконного преобразования Фурье и использовать окно Кайзера. В статье [329] предлагается модифицированный метод БПФ на основе процедуры интерполяции с использованием трех различных оконных функций (Блэкмана-Харриса, Райфа-Винсента). Идею использовать частотно-временной контур БПФ для анализа ИГ, представленную в работе [291], можно считать прообразом идентификации ИГ с помощью ВП. Преобразование в этом случае осуществляется «в ручном режиме». Считаем, что предложения, озвученные в [291] могут быть реализованы с помощью ВП более наглядно и более информативно.

В статье [281] для оценки параметров ИГ предложен алгоритм, заключающийся в совместном использовании метода оценки параметров сигнала

через алгоритм вращательной инвариантности (ESPRIT) и непрерывного вейвлет преобразования.

Разработанный в настоящей работе алгоритм идентификации ИГ и расчета дополнительных потерь от ИГ может быть реализован в следующем порядке (рисунок 3.13).

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). На рис.2.6 показан принцип локализации частоты вейвлет коэффициентов и гармонических (интергармонических) групп. Исходный сигнал делится на частотные отрезки (участки). На этих участках кроме высшей гармоники с частотой $k\omega$, имеются частоты, созданные интергармониками $k\omega \pm \Omega$.

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

Шаг 3. Если энергия спектра выше заданного значения $\Delta\varepsilon$, то выполняется обратное ВП. Это позволит восстановить сигнал тока, который согласно схеме (рисунок 2.6) отвечает за определенный частотный интервал гармонической группы.

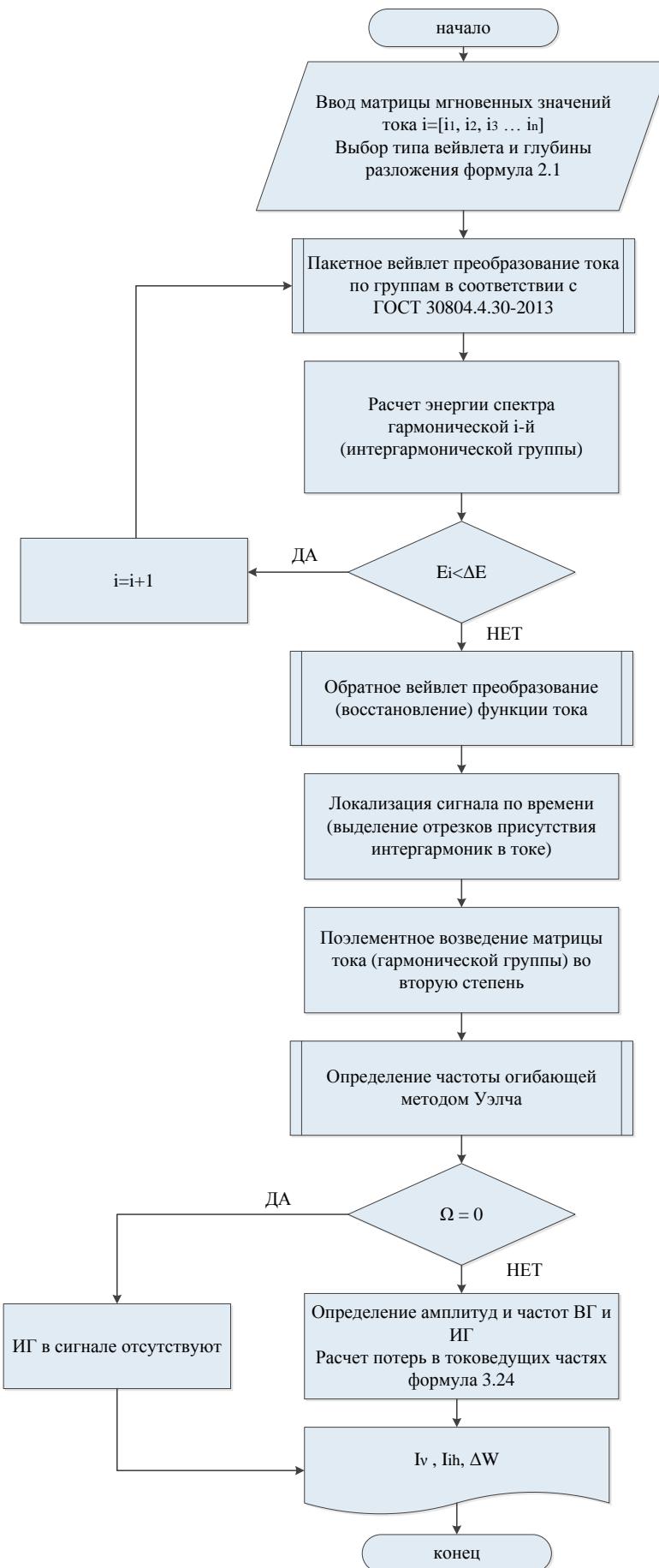


Рисунок 3.13 – Алгоритм расчета потерь от интергармоник

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 налицо изменение сигнала, проявляющееся не в самой функции тока $i(t)$, а в некоторой его высшей производной. Участок времени, на котором случилось столь существенное изменение сигнала, локализован по времени очень четкими всплесками детализирующих коэффициентов d_1 (рис. 3.14). 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.

Следует отметить, что аналогичный подход идентификации границ изменения режима по детализирующим вейвлет коэффициентам, только в отношении отклонения напряжения, был применён в статье [302, с. 133] и в работе [345, с. 276-277]

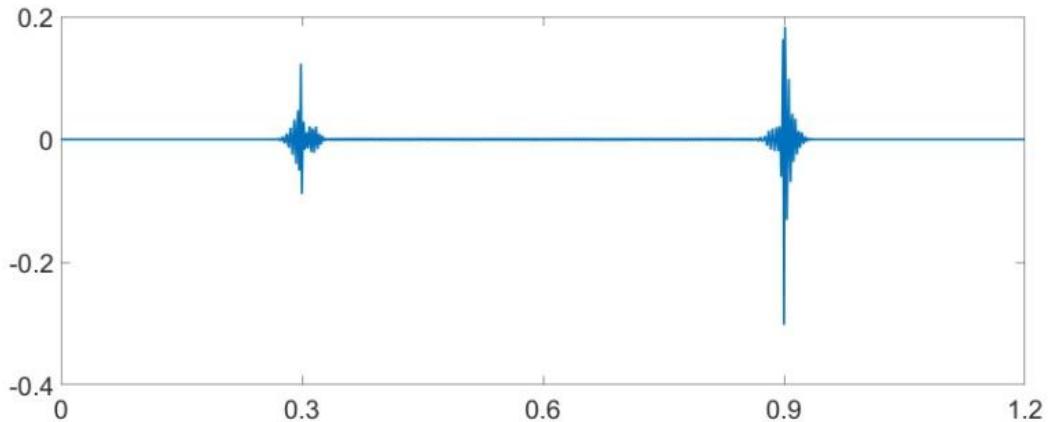


Рисунок 3.14 – График детализирующего коэффициента d_1

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

$$i_{jk}^2 = [i_1^2, i_2^2, \dots, i_k^2]. \quad (3.21)$$

Функция тока в общем виде может быть представлена выражением:

$$i(t) = I_m \cdot \sin(\omega t) + I_m \cdot m \cdot \sin((\omega \mp \Omega)t) \quad (3.22)$$

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:

$$\begin{aligned}
 i(t) &= I_m^2 \cdot \sin^2(\omega t) + I_m^2 \cdot m^2 \cdot \sin^2((\omega \mp \Omega)t) = \\
 &= I_m^2 \cdot \left(\frac{1}{2} + m^2 \right) + 2I_m^2 \cdot m \cdot \cos \Omega \cdot t + I_m^2 \cdot m^2 \cdot \cos 2\Omega t + \\
 &+ I_m^2 \cdot \left(m^2 - \frac{1}{2} \right) \cdot \cos 2\omega t - I_m^2 \cdot m \cdot \cos(\omega - \Omega) - I_m^2 \cdot m \cdot \cos(\omega + \Omega) - \\
 &- \frac{I_m^2 \cdot m}{2} \cdot \cos 2 \cdot (\omega - \Omega) - \frac{I_m^2 \cdot m}{2} \cdot \cos 2 \cdot (\omega + \Omega).
 \end{aligned} \tag{3.23}$$

Как следует из выражения (33) 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

$$\Delta W_{\Sigma} = \sum_{v=1}^n I_v^2 R t_i + \sum_{ih=1}^n I_{ih}^2 R t_j, \quad (3.24)$$

где I_v, I_k - действующие значение тока высшей гармоники и ИГ, R - активное сопротивление жилы кабеля, t_i, t_j - интервалы времени, на которых зафиксирована v -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.

Численные эксперименты и расчет потерь мощности и энергии в кабельной линии при наличии ВГ и ИГ по разработанной в настоящей диссертации методике представлены в работах автора [184, 267].

3.5 Основные результаты и выводы

1. Разработана методика расчета активной, реактивной (по Фризе) и полной мощности по коэффициентам пакетного вейвлет преобразования.
2. Предложена формула расчета коэффициента суммарных гармонических искажений на основе данных вейвлет преобразования.
3. Представлены результаты экспериментальных исследований показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения 6, 35 кВ. Для предприятий нефтедобывающей отрасли зафиксированы превышения допустимых уровней коэффициентов n -ной гармонической составляющей по 5-й и 7-й гармоникам. Превышения зафиксированы как в сети 6 кВ, так и в сети 35 кВ. Источниками гармоинк являются станции управления погружными насосами.
4. Обоснована актуальность введения в действующую нормативную документацию по качеству электроэнергии требований к допустимым уровням интергармонических составляющих.

5. Разработана методика идентификации и анализа интергармоник в электрических сетях с применением алгоритмов пакетного вейвлет преобразования.

6. Разработан алгоритм расчета дополнительных потерь в линиях электропередачи при наличии высших гармоник и интергармоник.

4 АНАЛИЗ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ АЛГОРИТМАМИ ПАКЕТНОГО И НЕПРЕРЫВНОГО ВЕЙВЛЕТ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

4.1 Обзор алгоритмов и устройств защиты и сигнализации замыкания на землю, работающих на использовании высших гармоник

В соответствии с п. 1.2.16 ПУЭ¹ работа электрических сетей 2–35 кВ в России «может предусматриваться как с изолированной нейтралью, так и с нейтралью, заземлённой через дугогасящий реактор или резистор». При этом установлены предельные допустимые значения ёмкостных токов для каждого класса напряжения, когда необходима компенсация.

В США и Канаде виды заземления нейтрали для различных классов напряжения определены стандартом [293].

Однофазные замыкания на землю являются наиболее распространённым видом повреждения в распределительных электрических сетях 6–35 кВ. Несомненно, главным достоинством сетей с изолированной (компенсированной) нейтралью является возможность работы потребителя электрической энергии без отключения в течение времени необходимого для обнаружения и ликвидации замыкания. В то же время существует опасность поражения персонала и гражданского населения током в месте ОЗЗ (шаговое напряжение) и вероятность перехода ОЗЗ в многофазные короткие замыкания.

Одним из вариантов исполнения защит от ОЗЗ, использующих значения величин нулевой последовательности установившегося режима является организация защит на токах высших гармоник тока $3i_0$ и напряжения $3u_0$.

Для сетей, работающих в режиме изолированной нейтрали характерно смещение нейтрали (особенно для воздушных линий). Смещение нейтрали может происходить даже в нормальном режиме работы энергосистемы вследствие

¹ Правила устройства электроустановок. – 7-е изд. – М.:ЭНАС, 2006. – 552 с.

естественной несимметрии. Анализу возможных вариаций смещения нейтрали посвящена работа [308]. В статье [190] авторы определили, что при высокой добротности контура при резонансной настройке реактора напряжение смещения нейтрали и напряжение нулевой последовательности «может превышать номинальное фазное напряжение» [190, с. 60].

В диссертационной работе [120] автор предлагает организовать защиту от ОЗЗ на основе принципа контроля пульсирующей мощности защищаемых присоединений. Для разработанной защиты положительным эффектом на устойчивость функционирования защиты оказывают ВГ токов и напряжений сети, поскольку с ростом суммарного коэффициента гармонического искажения повышается коэффициент чувствительности предложенных автором защит [120, с. 90].

Наиболее перспективным для определения места замыкания фазы на землю в кабельных сетях 6-10 кВ авторы [103] считают использование параметров электрических величин переходного процесса. В работе [103] подробно рассматривается возможность использования производной переходного напряжения $u_0(t)$, производной переходного тока $i_0(t)$, а также совместного использования напряжения поврежденной фазы $u_\phi(t)$ и производной переходного тока $i_0(t)$ в качестве основных измеряемых параметров для решения задачи поиска места возникновения ОЗЗ. Хронологический обзор организации защит и устройств, основанных на величинах переходного процесса приводит А.И. Левиуш в работе [131]. В заключении автор особо отмечает, что анализ деятельности научных центров, занимающихся разработкой и модернизацией защит от ОЗЗ показывает два центральных направления. Первый вектор внимания ученых касается развития импульсных микропроцессорных защит. Второе важное направление связано с «совершенствованием защит и сигнализации непрерывного действия, реагирующий на фазные соотношения высших гармонических» [131, с. 26].

Для моделирования и анализа переходных процессов при возникновении ОЗЗ наиболее широкое применение нашли программные комплексы ЕМТР

(Electro Magnetic Transient Program), MATLAB Simulink, представлен опыт расчета переходного процесса и остаточного тока замыкания в сети с компенсированной нейтралью 6 кВ в программе ANSYS [107].

Использование частотных характеристик (для симметричных и несимметричных режимов) линий для идентификации ОЗЗ и выявления места повреждения предложено в [2]. За счет волновых свойств воздушных линий электропередачи возможно резонансное увеличение напряжений высших гармоник в диапазоне от 2 до 10 кГц [2]. Для схем распределительных электрических сетей (РЭС), имеющих сложную древовидную структуру по величине амплитуд высших гармоник (относительное значение) в работе [3] показана возможность установления отпайки (локализации участка поиска) для идентификации ОЗЗ. Оценка влияния параллельно работающих фидеров на резонансные частоты при ОЗЗ производится в работе [46]. В статье [210] показана возможность идентификации ОЗЗ по «резонансным» частотам нулевой последовательности. Для реализации предложенной методики авторы [210] предлагают устанавливать на низкой стороне подстанций (0,4 кВ) измерительных органов напряжения прямой и обратной последовательности.

Для повышения динамической устойчивости функционирования максимальных токовых защит нулевой последовательности (ТЗНП) в кабельных сетях 6–10 кВ, работающих в режиме изолированной нейтрали, авторы [52] рекомендуют использовать фильтрацию гармонических составляющих тока нулевой последовательности.

Предельный максимальный уровень ВГ в токе ОЗЗ в работе [43] предложено оценивать по предельно допустимым значениям коэффициентов n -ной гармонической составляющей, регламентированной ГОСТ [65, табл. 1]. Руководствуясь аналогичными соображениями, авторы статьи [146] приняли допустимые значения согласно ГОСТ для 5, 7, 11 и 13 гармоник и получили наибольший уровень гармоник рабочего диапазона для моделирования защит [146, с. 39]:

$$\left(\frac{I_{BG}}{I_{50}} \right)_{\max} \leq 65\%. \quad (4.1)$$

Как было показано выше (параграф 3.3 настоящей диссертации) для действующих распределительных сетей 6 кВ предприятий нефтедобывающей отрасли с погружными электродвигателями, оснащенными станциями управления возможны превышения допустимых уровней коэффициентов отдельных (K_{u5} , K_{u7}) гармонических составляющих. В работе [8] авторы проводили анализ ПКЭ на рудничном предприятии Белгородской области, где для питания двигателей постоянного тока П2Ш-800-256-7К УХЛ 4 мощностью 5000 кВт в качестве управляемого выпрямителя используется двенадцатипульсный тиристорный преобразователь. Измерения производились на СШ 6 кВ. Как следует из полученных данных (рисунки 4.1, 4.2 [8, с. 80]) коэффициенты n-ной гармонической составляющей (для 11, 13, 23, 25, 35, 37 гармоник) существенно превышают допустимый уровень, регламентированный в [65].

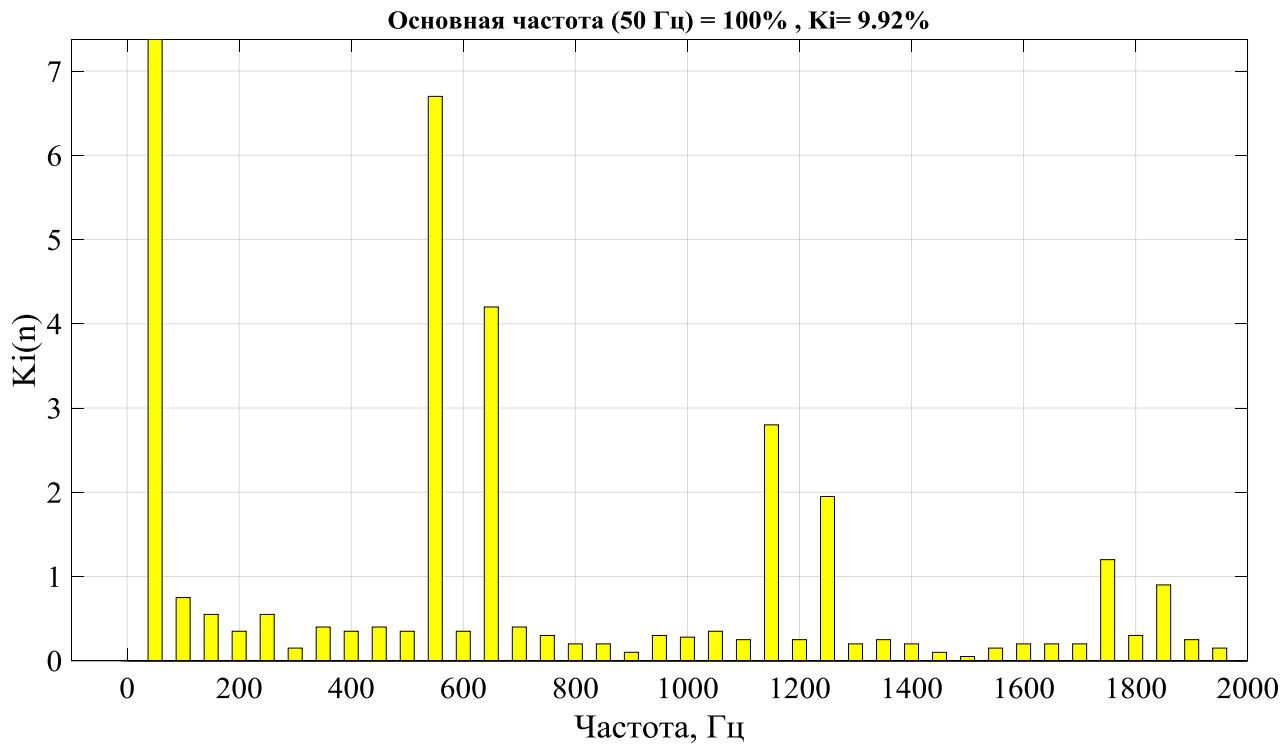


Рисунок 4.1 – (привод. по [8, с. 80]) Спектрограмма гармоник тока

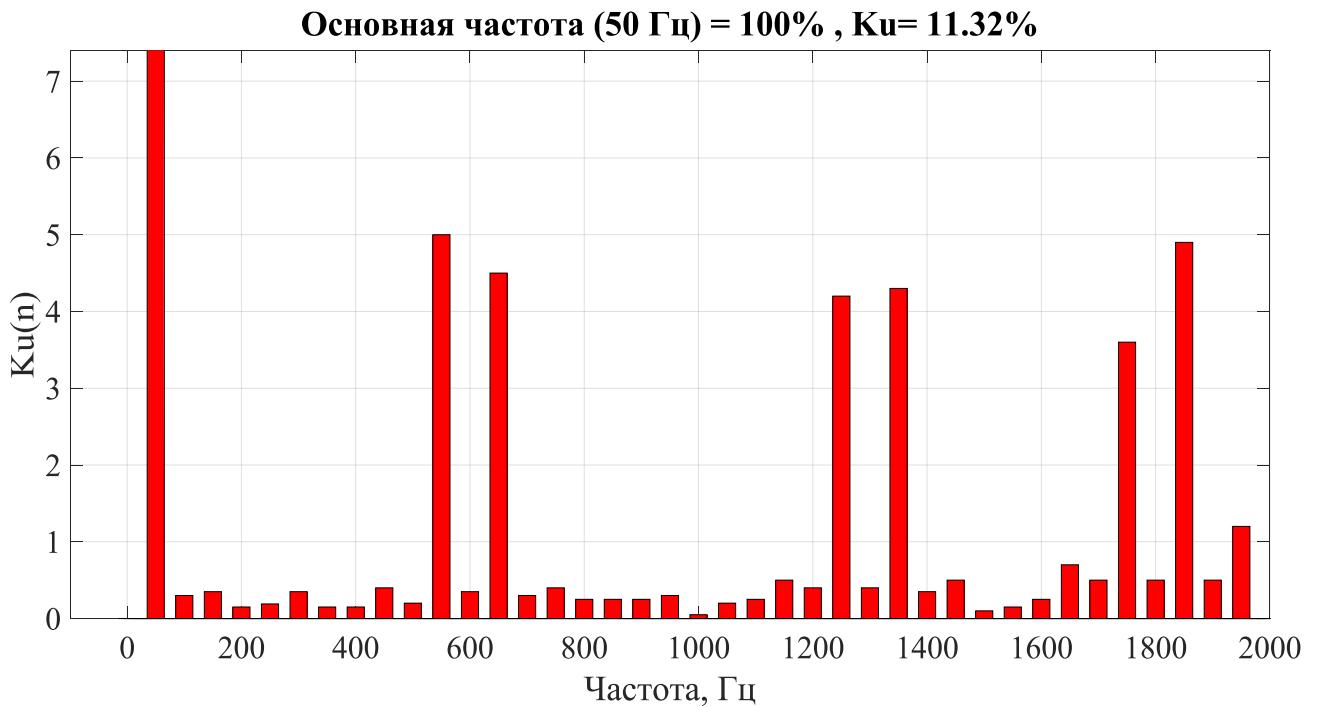


Рисунок 4.2 – (привод. по [8, с. 80]) Спектрограмма гармоник напряжения

Статистические данные по уровням ВГ в городских распределительных сетях 6–10 кВ приводит в своей диссертации А.А. Кузьмин [126]. Автор указывает, что в 45% случаев в сетях исследуемых объектов были обнаружены превышения уровней ВГ, что усугубляет процессы при дуговых ОЗЗ, в то же время в сетях 35 кВ городского назначения таких превышений автор не обнаружил [126, с. 79].

Негативное влияние частотно-регулируемого привода (ЧРП) компрессорной станции (два электропривода мощностью 4 МВт каждый) на уровень гармоник в сети 10 кВ при возникновении ОЗЗ отмечено в работе [171].

Таким образом, становится очевидно, что спектральный состав и уровни ВГ носят случайный характер. Происходит постоянное изменение количества, состава и мощности искажающей нагрузки, изменения конфигурации схемы. Это является причиной нестабильности уровня гармоник, что ограничивает эффективность функционирования защит от ОЗЗ, реагирующих на ВГ. Оценка уровня нестабильности в работе [176, с. 3] предлагается производить по формуле:

$$Z_{\max} = \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right)_{\max}, \quad (4.2)$$

где α_1 , α_2 – соответственно максимальный и минимальный возможный уровень ВГ.

На основе данных, полученных в результате имитационного моделирования авторы [176] получили расчетные значения уровней нестабильности отдельных гармоник для различных отраслей промышленности (цветная металлургия, химическая промышленность, черная металлургия и др.). Показательно, что полученные значения по ряду гармоник находятся в диапазоне от 0,85 до 11,1 – другими словами, имеют очень существенный разброс.

Высшие гармоники могут стать причиной опасных перенапряжений в режиме ОЗЗ при выполнении условий резонанса. В своей диссертации А.А. Кузьмин моделирует ОЗЗ с резонансом на 5 гармонике, в результате чего было зафиксировано перенапряжение кратностью 2,25 о.е. от максимального рабочего напряжения [126, с. 100].

Предложение идентифицировать дуговое ОЗЗ по уровню ВГ в сети 0,4 кВ и экспериментальные данные о проведении такого опыта представлены в работе [227]. Данная разработка основана на идее, что на ВГ дугового замыкания могут возникать резонансные режимы и соответственно, влиять на уровень несинусоидальности на шинах низкого напряжения подстанции потребителя. Аналогичные разработки представлены в работе [129, с. 66], где дополнительно определены резонансная частота и амплитуда гармоники в зависимости от места удаления ОЗЗ.

В работе [26] был произведен анализ тока ОЗЗ и тока дугогасящих реакторов типа РУОМ для сетей 6-10 кВ Монголии. Отмечается наличие явно выраженных нечетных гармоник (3, 5, 7), влияющих на гармонический состав остаточного тока замыкания. В приведённых исследованиях действующее значение гармоник остаточного тока превышало значение 5 А [26, с. 34].

В последнее время обсуждается разновидность компенсированного заземления – комбинированное заземление нейтрали [20]. Это режим, при котором параллельно дугогасящему реактору подключается резистор, создающий дополнительную активную составляющую тока (рис. 4.3).

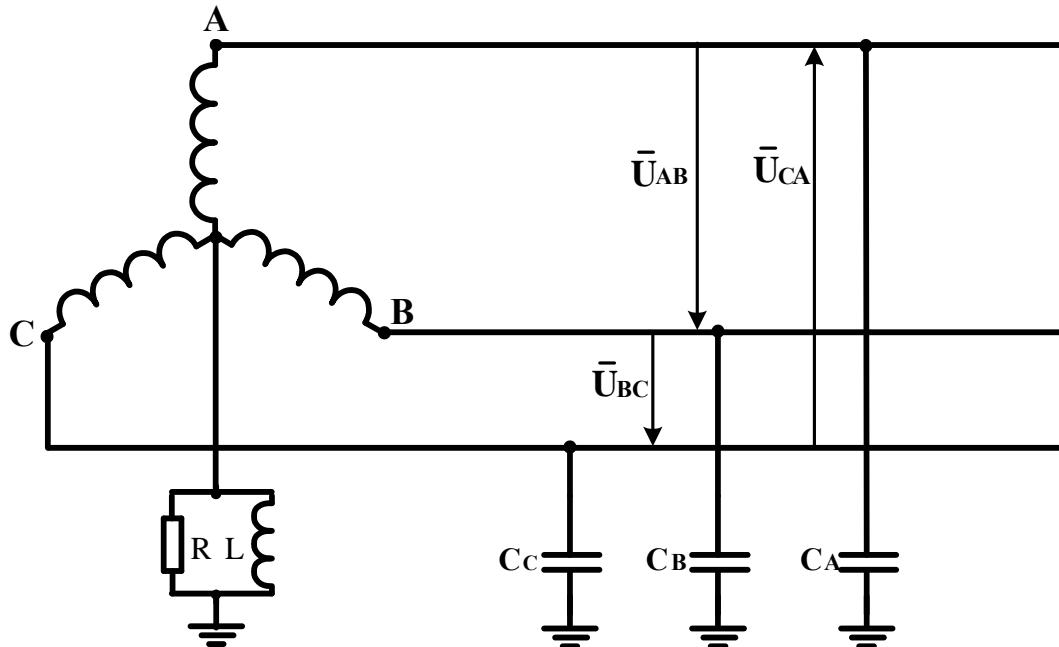


Рисунок. 4.3 – Упрощённая схема замещения сети с комбинированной нейтралью

Значение сопротивления резистора при этом выбирается из следующего условия:

$$R = \frac{U_\phi}{\Delta I}, \quad (4.3)$$

где ΔI – ток расстройки компенсационного реактора, А.

Теоретические вопросы и практические перспективы реализации перехода на комбинированный режим нейтрали находится в настоящий момент в активной фазе обсуждения в научных и научно-практических кругах. Продолжаются работа над усовершенствованием силовых резисторов («ПНП Болид», г Новосибирск), также ведется работа по развитию защит от ОЗЗ при режиме работы нейтрали с комбинированным активно-индуктивным заземлением. Накоплен богатый опыт теоретических и экспериментальных исследований, определяющих перспективу такого перехода. Однако следует отметить, что не все специалисты разделяют

положительное мнение о преимуществах комбинированного заземления нейтрали. Вопросы повышения чувствительности защит от ОЗЗ в сетях с комбинированным заземлением нейтрали затрагиваются в работе [136], где на основе проведенных исследований авторы рекомендуют установку двух соединенных последовательно резисторов вместо одного высокоомного. По мнению авторов, первый резистор обеспечит активный ток, достаточный для обеспечения чувствительности. Второй резистор должен быть зашунтирован в нормальном режиме и включается в цепь при возникновении ОЗЗ для ограничения тока, переводя сеть в режим высокоомного заземления нейтрали [136, с. 11].

В работе [33] производится анализ существующих способов диагностики однофазных замыканий на землю в сетях с малыми токами замыкания. При этом авторы отмечают, что существует необходимость «разработки устройства, не связанного с использованием трансформаторных фильтров токов нулевой последовательности. Перспективным направлением является применение алгоритмов вейвлет анализа выделения гармонических составляющих тока и напряжения сети [33, с. 58].

Кроме того, актуальной по-прежнему остаётся задача определения расстояния (удалённости) ОЗЗ в сетях с изолированной (компенсированной) нейтралью. В работе [143] приводится классификация существующих методов по направлению сбора информации о параметрах аварийного режима – односторонние и двухсторонние методы. В статье [273] производится общий обзор методов, применяемых для идентификации ОЗЗ и определения расстояния до места замыкания.

В настоящее время на подстанциях эксплуатируются устройства, реагирующие на значение суммы высших гармоник в линии при возникновении однофазного замыкания на землю – «Спектр», УСЗ-3М, блоки SPAC-801-13 и SPAC 801-113 (АББ) и др.

Целью настоящей главы диссертации является модернизация существующих методов организации защиты по относительному замеру токов высших гармоник с применением алгоритмов вейвлет преобразования.

4.2 Анализ энергии спектра тока нулевой последовательности на основе вейвлет коэффициентов

Для нахождения переходного тока нулевой последовательности в месте ОЗЗ $i_{03}(t)$ и напряжения нулевой последовательности $u_0(t)$ можно воспользоваться комплексной схемой замещения, представленной на рисунке 4.4 (привод. по [12, с. 40]).

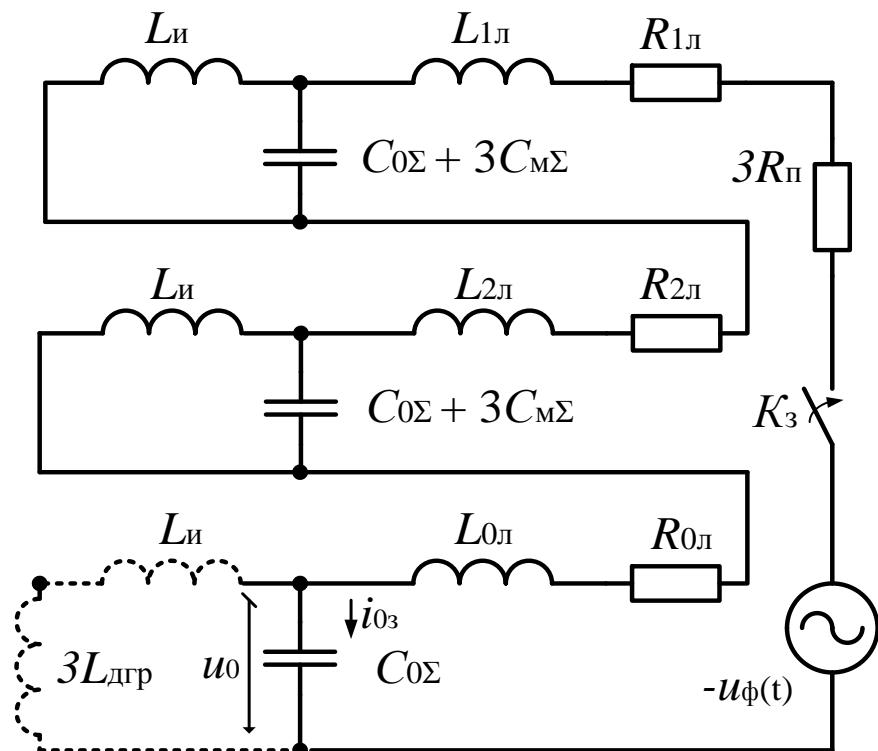


Рисунок 4.4 – Комплексная схема замещения для расчёта переходного процесса при ОЗЗ с использованием метода симметричных составляющих (привод. по [12, с. 40])

Для выделения слабого гармонического сигнала тока третьей гармоники в информационном потоке при организации защиты синхронного генератора от ОЗЗ в работе [185] предложено использовать активно-адаптивное устройство,

основная идея которого заключается в предварительном преобразовании сигнала в промежуточный непрерывный.

Анализ напряжения здоровых и поврежденной фазы при ОЗЗ с помощью ВП представлен в работе [162], где авторы фиксируют спектральный состав в режиме до и после возникновения замыкания. Вейвлет анализ в работе [162] используется исключительно для выделения сигнала помехи.

В настоящей диссертационной работе стоит задача определения интегральных и частотных характеристик токов и напряжений ОЗЗ в установившемся и переходном режимах. Исследуемый ток нулевой последовательности, полученный в виде цифровой последовательности дискретных отчетов в результате моделирования или осциллографирования, может быть разложен по вейвлет коэффициентам [175].

При организации защит относительного замера, реагирующих на ВГ, для уменьшения погрешности необходимо учитывать характеристики трансформаторов тока нулевой последовательности (ТТНП). В статье [163, с. 77] указывается, что производители ТТНП «не приводят данные о передаче трансформатором гармоник тока» что затрудняет правильный выбор и оценку коэффициента чувствительности такого рода защит. На несовершенство токовых защит нулевой последовательности (ТЗНП), организованной на электромеханической и микроэлектронной базе указывают авторы [165, с. 51], отмечаяющие актуальность развития цифровых ТЗНП на микропроцессорной базе.

Произведем гармонический анализ осциллограммы тока $3i_0$ металлического замыкания на землю (рисунок 4.5) с помощью непрерывного вейвлет преобразования.

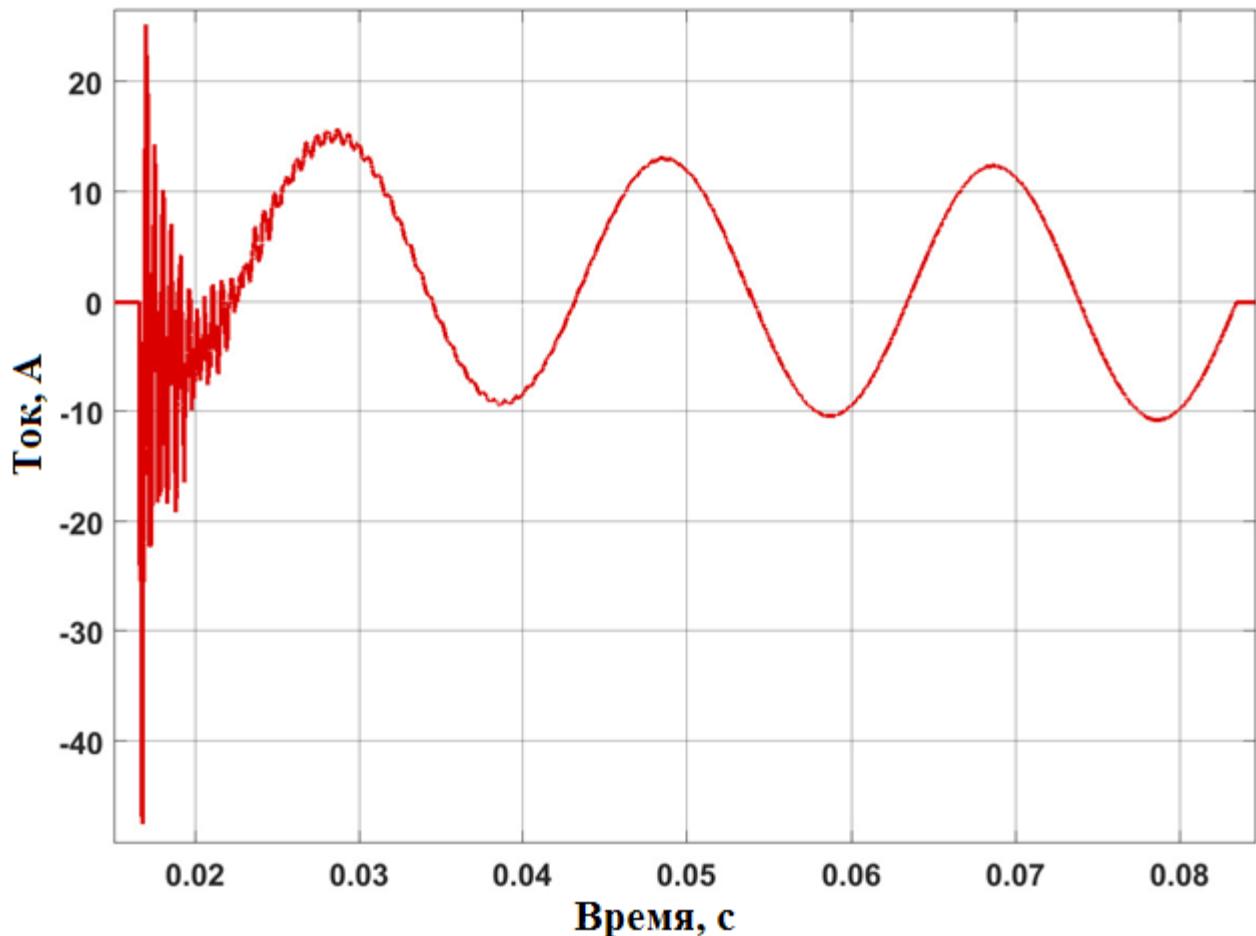


Рисунок 4.5 – Оциллограмма тока металлического замыкания на землю

В результате вейвлет анализа тока $3i_0$ были идентифицированы две частотные составляющие переходного процесса. Как видно по результатам быстрого преобразования Фурье (рисунок 4.6) в сигнале тока присутствует группа высокочастотных составляющих.

В соответствии с разработанной в главе 2 настоящей диссертации методикой проведем непрерывное преобразование тока $3i_0$ с помощью вейвлета Морсе (Morse). В результате имеем скалограмму (график энергии спектра вейвлет преобразования), представленную на рисунке 4.7. Анализируя скалограмму можно заключить, что 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 Т. Ю. Шадриковой [220] были

разработаны имитационные модели для анализа переходных процессов и определения спектров токов в поврежденных и неповрежденных линиях.

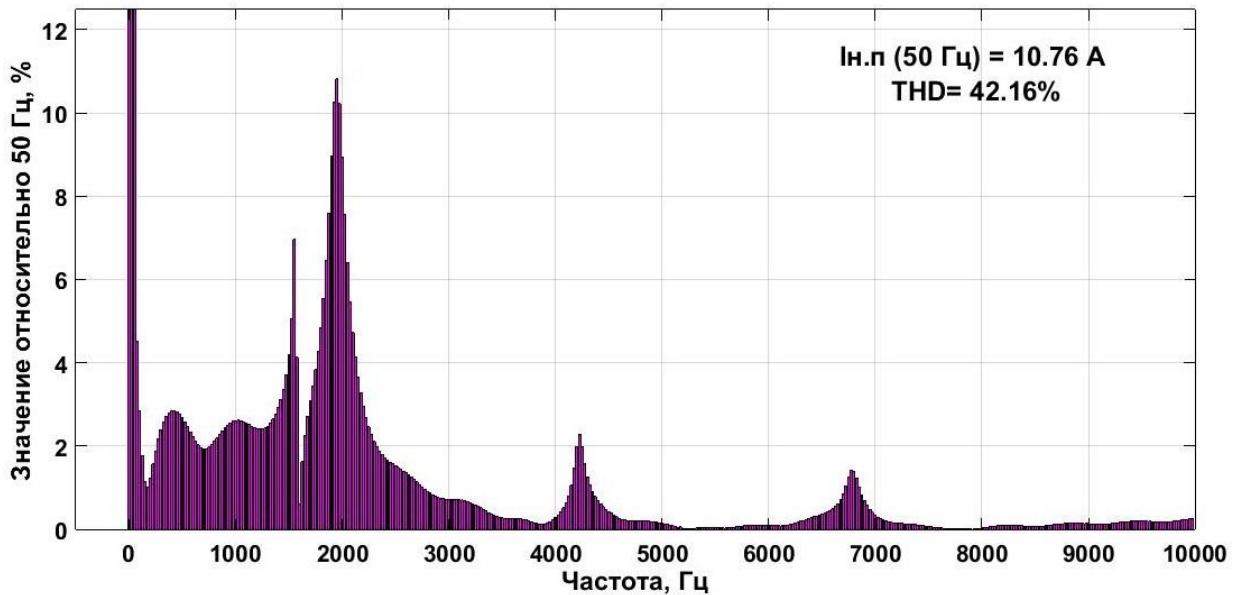


Рисунок 4.6 – Быстрое преобразование Фурье осциллограммы на рисунке 4.5

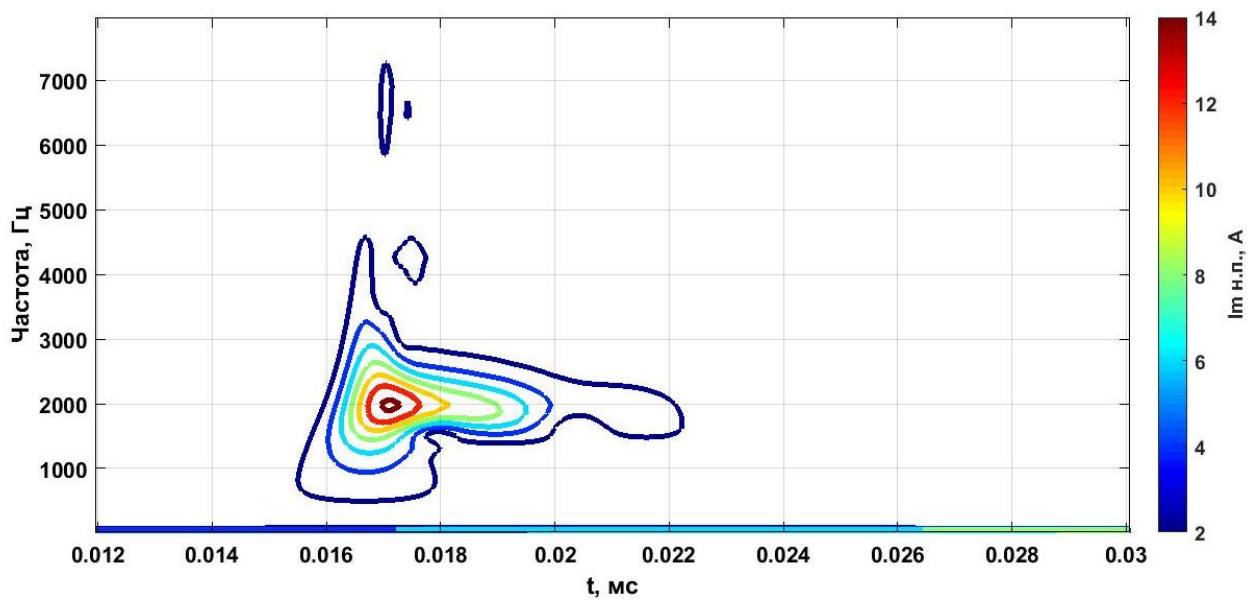


Рисунок 4.7 – Непрерывное вейвлет преобразование осциллограммы на рисунке 19

Для повышения чувствительности максимальной адмитансной защиты от ОЗЗ кабельных линий в статье [203] сотрудники ИГЭУ (В.А. Шuin и др.) предлагают контролировать емкость нулевой последовательности. Причем, как отмечают авторы для стабильности замера C_0 необходимо в токе нулевой

последовательности и производной напряжения подавлять высшие гармоники с частотами, превышающими 1,5-2 кГц [203, с. 25].

В настоящей диссертации предлагается решать задачу цифровой фильтрации высших гармоник более 1,5 кГц помощью ВП на программном уровне. Отказ от аппаратной фильтрации, совместно с использование цифровых оптических трансформаторов тока является вкладом в развитие технологии «цифровая подстанция» и национальной инициативы «Энерджинет».

4.3 Разработка алгоритма защиты и сигнализации ОЗЗ для цифровых устройств с применением алгоритмов вейвлет преобразования

В настоящее время эксплуатируется ряд устройств релейной защиты, функционирующих на принципе относительного замера высших гармоник в токе $3i_0$ (УСЗ-3М, УСЗ-2/2, выпускаемые ЧЭАЗ). Для успешной работы данных устройств необходима фильтрация высших гармоник (подавление основной частоты). В настоящей работе предложена модернизация существующих алгоритмов определения поврежденного присоединения по локальной энергии спектра высших гармоник с использованием математического аппарата вейвлет преобразования.

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.

Для вейвлет преобразования действителен аналог равенства Парсеваля, из которого следует, что полная энергия исследуемой функции напряжения и (тока i ,

мгновенной мощности p) может быть определена через амплитуды вейвлет коэффициентов:

$$E_u = \int u^2(t) dt = C_{\psi}^{-1} \iint V^2(a, b) \frac{da db}{a^2}. \quad (4.4)$$

Плотность энергии $E_{V(a,b)} = V_{2(a,b)}$ исследуемого сигнала может быть представлена раздельно 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 (Н.М. Астафьева [25] и др.) вводят термин «локальный энергетический спектр». Другими словами, ВП позволяет определять плотность энергии сигнала в локальной окрестности точки времени t_0 :

$$E_{\xi}(a, t_0) = \int E_V(a, b) \xi\left(\frac{b - t_0}{a}\right) db, \quad (4.5)$$

где ξ – оконная функция.

С учетом формул (4.4–4.5) имеем возможность определить энергию спектра отдельных гармоник (интергармоник), либо исследуемого частотного диапазона.

Расчет энергии спектра вейвлет коэффициентов позволит определить линию, в которой произошло ОЗЗ.

В работе [98] представлена имитационная модель MATLAB Simulink для моделирования переходных и установившихся режимов сети электроснабжения при ОЗЗ. Считаем необходимым отметить, что представленная в [98, с. 185] модель имеет недостаток, связанный с тем, что активно-емкостные поперечные ветви схемы замещения включены в схему как сосредоточенные параметры. Сами же линии электропередачи заданы простейшей RL ветвью. Для правильного моделирования процессов (в том числе при наличии в исследуемых сигналов

высокочастотных компонент) необходимо применять модели линий с распределёнными параметрами.

Имитационная модель для моделирования ОЗЗ в сетях с воздушными линиями 35 кВ (ПС «Щербакульская») представлена в работе [166]. Следует отметить, что авторы при создании модели не учитывали междуфазные ёмкости и индуктивности, не учитывалось изменение индуктивного сопротивления обмотки трансформатора при увеличении частоты.

Принципы моделирования основных элементов электроэнергетических систем для анализа переходных процессов с учетом возможных отклонений ПКЭ представлены в книге [245].

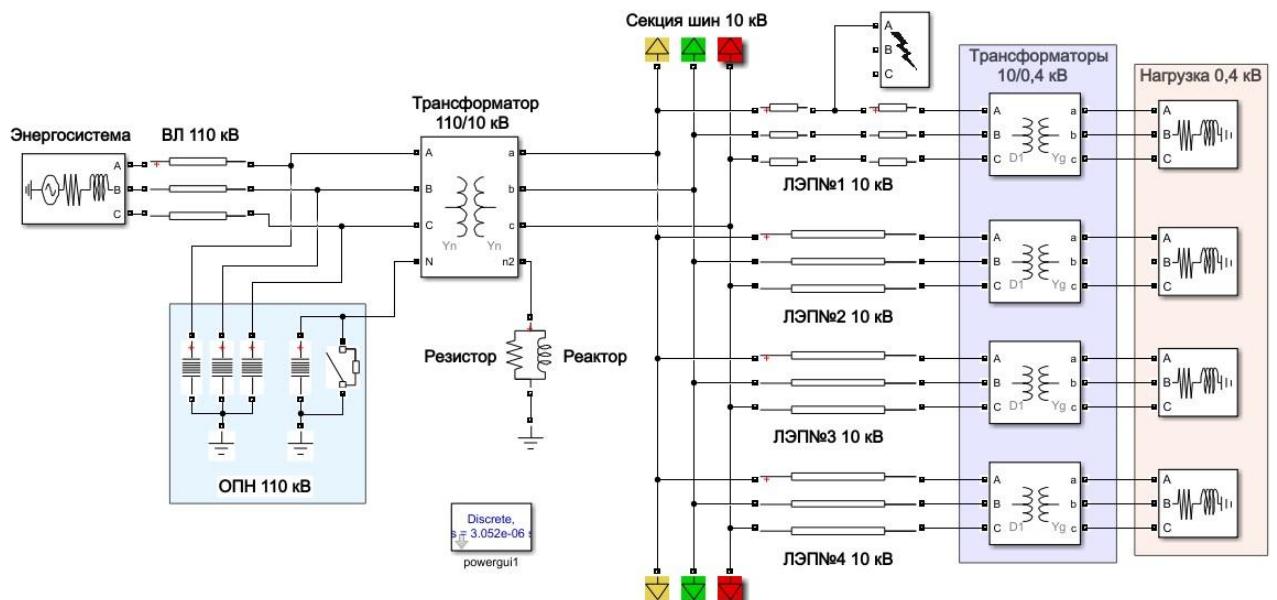


Рисунок 4.8 – Имитационная модель MATLAB Simulink для исследования ОЗЗ

В статье [178, с. 31] сотрудниками ИГЭУ для организации адаптивной токовой защиты от ОЗЗ были получены выражения для действующих значений токов нулевой последовательности в поврежденной и неповрежденной фазах. Перепишем данные выражения с учетом того, что цифровой сигнал тока нулевой последовательности предварительно подвергнут вейвлет разложению.

$$3I_{0_{hen}} = \frac{3C_{0_{coobc}}}{N} \sqrt{\sum_{k \in Z} \left(u_{J_{0,k}}^A \right)^2 + \sum_{k \in Z} \sum_{j=J_0}^{J-1} \left(u_{j,k}^D \right)^2}, \quad (4.6)$$

$$3I_{0noe} = \frac{3(C_{0\Sigma} - C_{0cooc})}{N} \sqrt{\sum_{k \in Z} (u_{J_{0,k}}^A)^2 + \sum_{k \in Z} \sum_{j=J_0}^{J-1} (u_{j,k}^D)^2}. \quad (4.7)$$

По выражению 4.5 определяется локальная энергия спектра каждой отходящей линии (рисунок 4.9).

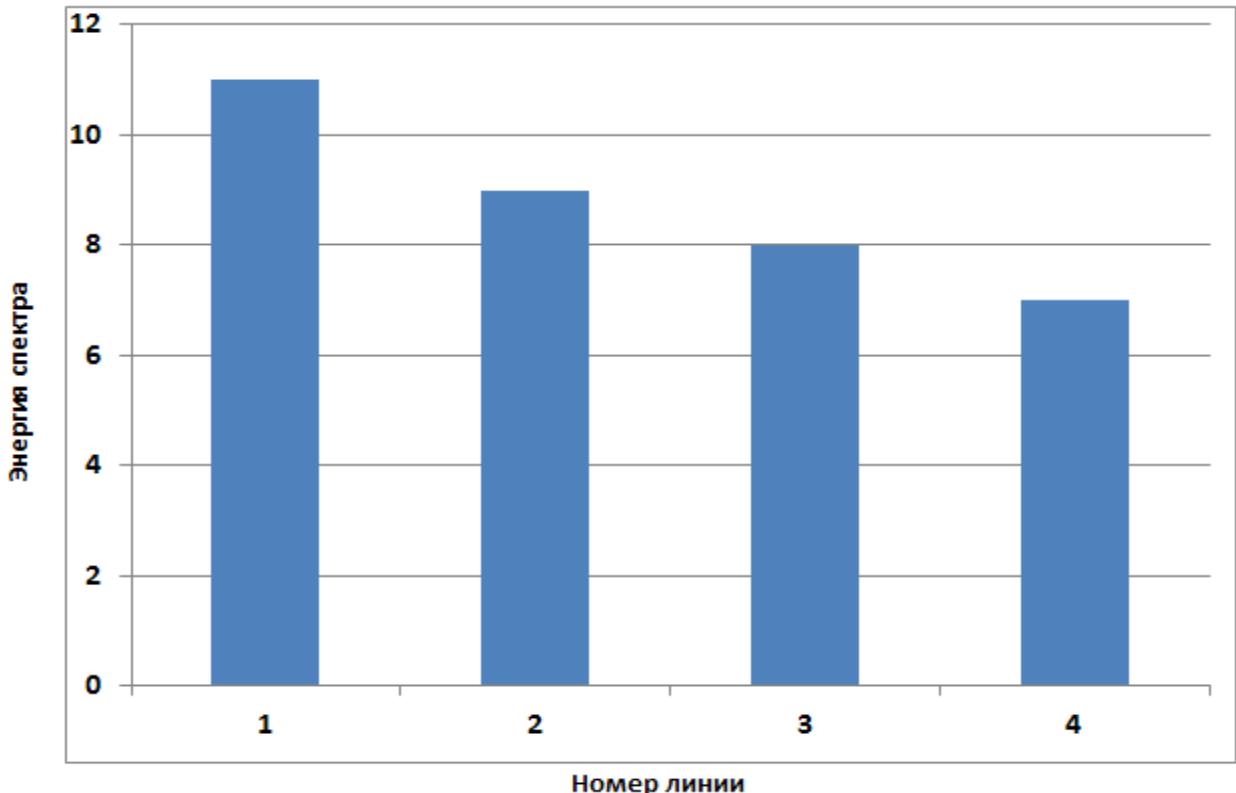


Рисунок 4.9 – Определение поврежденной линии по энергии спектра вейвлет преобразования

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.

4.4 Разработка способа управления дугогасящим реактором с применением алгоритмов вейвлет преобразования

Для компенсации ёмкостных токов при ОЗЗ применяются плавнорегулируемые или ступенчатые дугогасящие реакторы (ДГР). Для

организации автоматической компенсации ёмкостных токов может быть использована конструкция реактора, управляемого подмагничиванием (серии РУОМ) или ДГР плунжерного типа. Преимущества реактора РУОМ рассмотрены в работе коллектива МЭИ [141]. Однако, как известно, управляемые подмагничиванием реакторы сами могут являться источниками ВГ. На основе экспериментальных исследований, проведенных в городских сетях (г. Улан-Батор, Монголия) авторы статьи [125] отмечают наличие в остаточном токе ОЗЗ 3-й и 5-й гармоник и объясняют это влиянием реактора.

В настоящее время разработан широкий круг методов автоматической настройки ДГР для компенсации ёмкостных токов (по фазовым, амплитудным характеристикам, по частотным параметрам и др.) [158].

Метод автоматического управления реактором по частоте контура нулевой последовательности предложен в работах сотрудников кафедры электроснабжения промышленных предприятий Чувашского государственного университета (М.И. Петров, И.В. Соловьев, В.С. Петров)². Практическая реализация предложенного метода представлена в терминалах, производимых НПП «Бреслер» (г. Чебоксары). Метод основан на кратковременном токовом импульсе для измерения параметров контура нулевой последовательности. Частота колебаний контура нулевой последовательности определяется исключительно параметрами контура и не зависит от действующих в контуре других источников.

В рамках выполнения диссертационной работы, а также в соответствии с соглашением №14.577.21.0097 от 22.08.2014 г. «Разработка научно-технических решений по селективному определению поврежденных фидеров в сетях с компенсированной нейтралью» был разработан и запатентован [168] алгоритм управления ДГР (рисунок 4.10). Личный вклад автора заключается в оригинальной идеи выделить свободную составляющую напряжения контура

² Соловьев, И.В. Метод автоматического управления плунженными дугогасящими реакторами /И.В. Соловьев, В.С. Петров, М.И. Петров // Вестник Чувашского университета. – 2010. – №3. – С. 251-259.

нулевой последовательности с помощью вейвлет анализа (блоки 4-7). Дополнительно алгоритм предусматривает очистку напряжения от зашумления (высших гармоник) также на основе вейвлет преобразования.

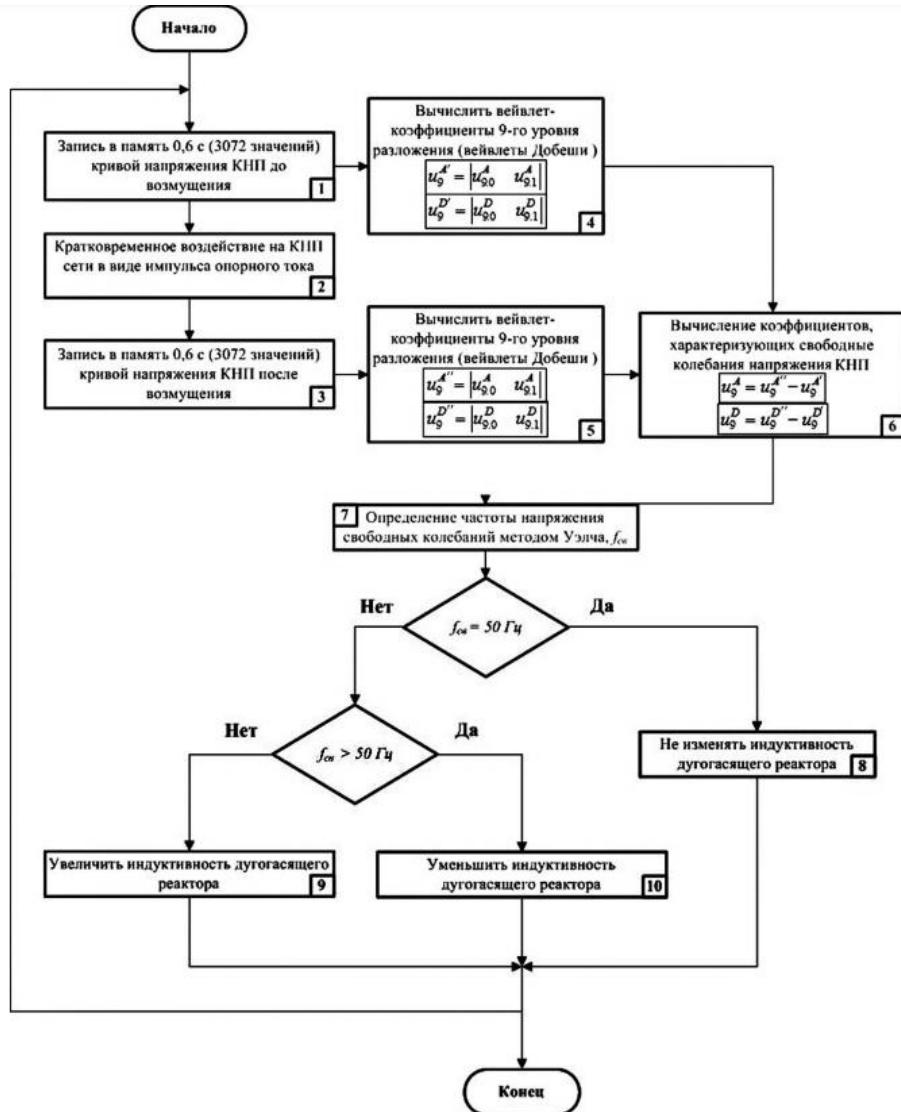


Рисунок 4.10 – Алгоритм управления дугогасящим реактором

Управление дугогасящим реактором, как и в работе сотрудников Чувашского государственного университета, осуществляется на основании сравнения частоты питающей сети и частоты свободной составляющей контура нулевой последовательности. Отличие разработанного в настоящей диссертации алгоритма заключается в применении вейвлет преобразования для очистки сигнала от шумов и выделения напряжения свободных колебаний контура нулевой последовательности.

Принципиально 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 4.11.

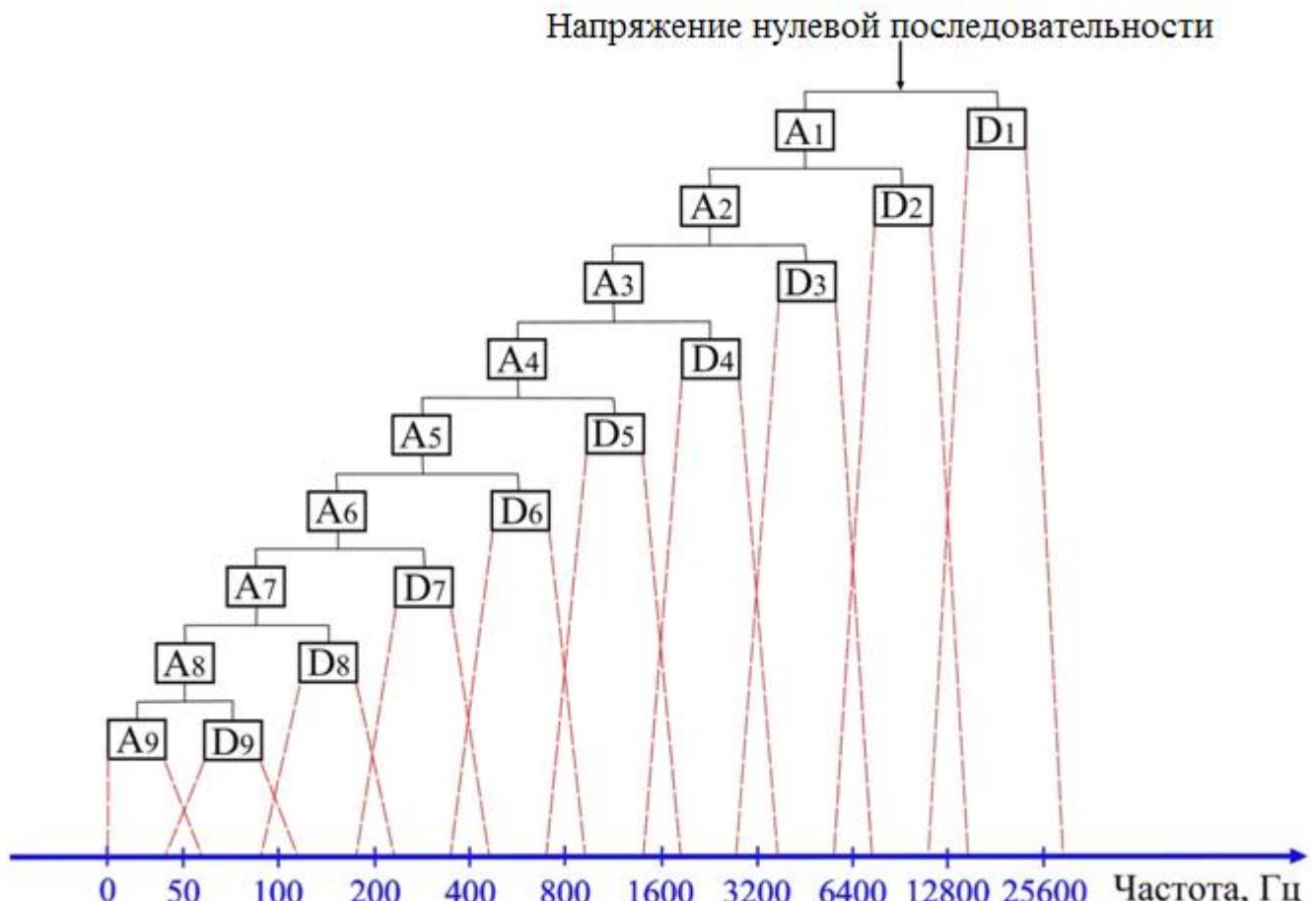


Рисунок 4.11 – Схема разложения напряжения нулевой последовательности

В соответствии с представленной схемой локализация частот вейвлет коэффициентами будет представлена коридорами, показанными в таблице 4.1.

Таблица 4.1. 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 вейвлет коэффициенты 9-го уровня (как отмечено в таблице 4.1) представляют собой вектор строки, состоящие из 2 элементов каждой:

$$u_9^A = \begin{vmatrix} u_{9,0}^A & u_{9,1}^A \end{vmatrix}, \quad (4.8)$$

$$u_9^D = \begin{vmatrix} u_{9,0}^D & u_{9,1}^D \end{vmatrix}. \quad (4.9)$$

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

Шаг 3. Подача токового импульса в контур нулевой последовательности. Вычисление коэффициентов 9-го уровня разложения из фрагмента напряжения после управляющего воздействия. Обозначим полученные коэффициенты с индексом «» (два штриха):

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

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

$$u_9^A = u_9^{A''} - u_9^{A'}, \quad (4.10)$$

$$u_9^D = u_9^{D''} - u_9^{D'}. \quad (4.11)$$

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

$$u_{ce}(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} u_{J,k}^A \varphi_{J,k}(t) + \sum_{j=J}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} u_{j,k}^D \psi_{j,k}(t). \quad (4.12)$$

или с учётом, что в алгоритме используем только коэффициенты $u_9^A(k)$ и $u_9^D(k)$, с учетом (4.10-4.11) формула (4.12) может быть переписана в виде:

$$u_{ce}(t) = \sum u_{9,0}^A \varphi_{9,0} + \sum u_{9,1}^A \varphi_{9,1} + \sum u_{9,0}^D \varphi_{9,0} + \sum u_{9,1}^D \varphi_{9,1}. \quad (4.13)$$

Шаг 5. Определение частоты напряжения свободных колебаний методом Уэлча.

По формуле (4.13) в результате обратного вейвлет преобразования получаем напряжение свободных колебаний контура нулевой последовательности. Для определения эффективности работы алгоритма на рисунке 4.12 приведено сравнение вычисленного сигнала напряжения свободных колебаний с истинным значением, заданным в рамках тестового расчета.

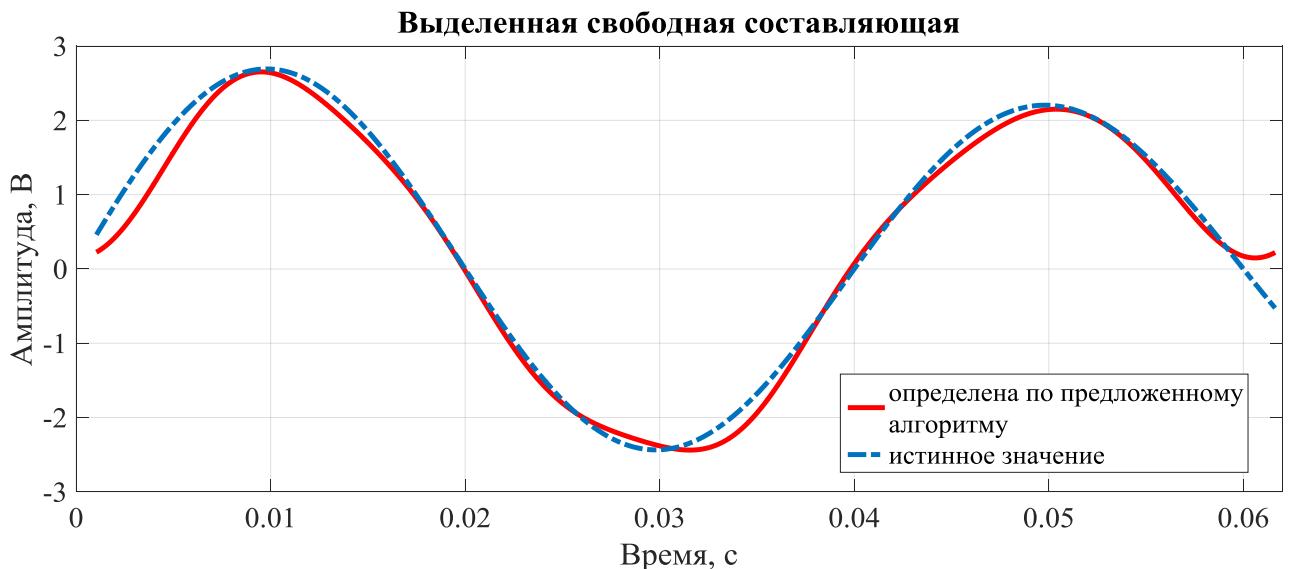


Рисунок 4.12 – Напряжение свободных колебаний контура нулевой последовательности

Напряжение контура нулевой последовательности при общем подходе является случайной величиной. Для случайных процессов преобразование Фурье в чистом виде не применяется. Для определения частоты колебаний контура нулевой последовательности может быть использован один из множества методов спектрального оценивания, разработанные специально для случайных величин. В результате операции обратного ВП по формуле (4.13) получаем напряжение свободной составляющей контура нулевой последовательности в виде

дискретных отсчетов $|u_0, u_1, u_2, \dots, u_{n-1}|$, представленных на интервале $T_k = (2N+1)T$, где $N \in \mathbb{Z}$.

Для случайной величины корректно говорить не о спектре сигнала, а о спектральной плотности мощности, которая для дискретного сигнала может быть определена:

$$S_x(\bar{\omega}) = \lim_{N \rightarrow \infty} E \left\{ \frac{1}{2N+1} \left| \sum_{n=-N}^N u[n] e^{-in\bar{\omega}} \right|^2 \right\} \quad (4.14)$$

где $\bar{\omega} = \omega T$ – безразмерная круговая частота, или циклическая частота f , нормированная посредством частоты дискретизации f_d

Для статистической оценки неизвестной спектральной плотности мощности исследуемого сигнала напряжения контура нулевой последовательности может быть использована периодограмма случайного сигнала $\tilde{S}_u(\bar{\omega})$. Функция $\tilde{S}_u(\bar{\omega})$ при каждой фиксированной частоте $\bar{\omega}$ также является случайной величиной, подверженной некоторому неконтролируемому разбросу при переходе от одной реализации к другой. Для построения периодограмм в цифровой обработке сигналов применяется большое количество методов спектрального оценивания. В данной работе предлагается использовать метод Уэлча.

Метод Уэлча, являясь модифицированным методом Барлетта, дает оценку энергетического спектра. Модификация заключается в том, что исходную последовательность величин, в нашем случае дискретных отсчетов напряжения $u[0], u[1], \dots, u[N-1]$, разбивать на подпоследовательности (сегменты) $u_i[n]$, которые пересекаются по времени. Далее, перед вычислением периодограммы каждой из последовательностей $u_i[n]$ этот сегмент обрабатывается с помощью окна данных $\omega[n]$.

Перекрытие сегментов обеспечивает увеличение числа усредняемых сегментов при заданной длине исходной записи и тем самым уменьшает дисперсию оценки энергетического спектра.

Результат применения метода Уэлча для нахождения частоты напряжения свободных колебаний представлен на рисунке 4.13.



Рисунок 4.13 – Определение частоты напряжения свободных колебаний по методу Уэлча

Для уменьшения боковых лепестков широко используются временные окна, позволяющие сглаживать исходную реализацию на ее начальном и конечном участках [140]. Одно из распространённых окон – окно для непрерывных сигналов (окно Ханна) или его дискретная версия (окно Хеннинга) [140, с. 180]:

$$u(nT) = 0,5 - 0,5 \cos \frac{2\pi n}{N} \quad n = 0, 1, \dots, N-1. \quad (4.15)$$

При обратном ВП возможно возникновение негативного «краевого эффекта». Причины появления данного явления рассмотрены в работе [134] на примере кратномаштабного анализа процесса короткого замыкания.

Возникающий негативный «краевой эффект» при процедуре прямого и последующего обратного ВП в работе [262] предложено устранять с помощью модели «скользящего окна» (в оригинале «sliding window»).

Фактически, на завершающем этапе работы алгоритма определения частоты свободных колебаний контура нулевой последовательности может быть применен один из широкого круга существующих методов оценки энергетического спектра.

В работе [77] производится сравнение методов Уэлча, Берга, Барлетта и Юла-Уокера. Погрешность всех этих методов в определении частоты свободных колебаний не превысила 1%, что означает погрешность в степени расстройки дугогасящего реактора не более 4% [77, с. 46].

Дискретное ВП было предложено в работе [14] для цифровой очистки полезного сигнала от присутствующего белого шума (в диапазоне 3-9 Гц) при вибрационной диагностике оборудования в режиме непрерывного поступления данных. В качестве материнского вейвлета авторы [14] применили вейвлет Добеши 8 порядка. Вейвлет фильтрация сигнала имеет преимущества перед фильтрацией на основе преобразования Фурье. Преобразование Фурье с его «бесконечно протяженным тригонометрическим базисом не подходит для анализа и фильтрации нестационарных сигналов» [15, с. 84].

При реализации задачи разработки активно-адаптивных сетей и внедрения цифровых подстанций возникает ряд трудностей с процессом обработки цифровых сигналов. Как справедливо отмечено в работе [22]: «Цифровые сигналы интеллектуальной электроэнергетики кроме информационных составляющих еще могут содержать шум преобразования и смещение нуля АЦП, выбросы или потери отсчетов» [22, с. 37]. Основы формирования адаптивного цифрового фильтра для зашумленного гармонического сигнала на основе вейвлета Добеши представлены в работе [133].

Применение пакетного вейвлет преобразования для цифровой фильтрации нерегулярных импульсных помех с алгоритмом выбора наилучшего дерева вейвлет разложения рассмотрено в работе [57].

Вейвлет преобразование позволяет производить цифровую очистку сигнала от шума. Активно-адаптивный алгоритм определения ВГ и ИГ в сетях 0,4 кВ с условием предварительной очистки сигнала от шума при изменяемом пороге предложен в работе [237].

4.5 Основные результаты и выводы

1. Приведено обоснование актуальности применения токов высших гармоник в токе $3i_0$ установившегося режима для организации защит и сигнализации ОЗЗ. Приведены результаты измерений уровней высших гармоник в распределительных сетях 6–35 кВ, которые свидетельствуют о росте доли нелинейных нагрузок. Обоснована актуальность применения вейвлет преобразования для организации цифровых защит. Вейвлет преобразование обеспечивает цифровую фильтрацию токов и напряжений нулевой последовательности на программном уровне.
2. Представлена методика анализа локального спектра энергии тока $3i_0$ с помощью непрерывного вейвлет преобразования. Полученные по предложенной методике данные о высокочастотных (зарядной и разрядной) составляющих имеют качественное совпадение с другими методиками, представленными в публикациях других авторов. С помощью вейвлет преобразования предложено осуществлять цифровую фильтрацию частот выше 1,5-2 кГц для повышения чувствительности максимальных адмитансных защит.
3. Произведена модернизация существующего алгоритма защиты и сигнализации ОЗЗ для цифровых устройств релейной защиты относительного замера высших гармоник. Предложенный алгоритм основан на определении локальной энергии спектра гармоник с помощью вейвлет преобразования. Поврежденная линия определяется по максимальной энергии спектра вейвлет коэффициентов, локализующих высшие гармоники.
4. Разработан способ определения частоты напряжения свободных колебаний контура нулевой последовательности на основе алгоритма дискретного вейвлет преобразования.
5. 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 2×1 каждая. В оригинальной методике необходимо было сравнивать значительно большее количество дискретных цифровых значений.

5 УЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТОКОВЕДУЩИХ ЧАСТЕЙ ПРИ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ РЕЖИМАХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

5.1 Математическое моделирование учета температурной зависимости сопротивления при наличии высших гармоник

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

$$\Delta P_{\Sigma\text{фази}} = I_1^2 R_1 + \sum_{\nu=2}^n I_{\nu}^2 R_{\nu} k_{\Pi\nu}, \quad (5.1)$$

где $k_{\Pi\nu}$ – коэффициент, учитывающий поверхностный эффект

Дополнительно к учету поверхностного эффекта в работе [28] при расчете потерь от ВГ предложено учитывать эффект близости фазных проводников в линии электропередачи [28, с. 88]:

$$k_{\delta\nu\phi} = \frac{1,18 + k_{\Pi\nu}}{0,27 + k_{\Pi\nu}} \left(\frac{d_{\phi}}{a} \right)^2, \quad (5.2)$$

где d_{ϕ} – диаметр жилы фазного проводника, мм; a – среднее расстояние между центрами жил, мм.

Для разработки математической модели учета зависимости сопротивления от температуры необходимо учесть изменение сопротивления в результате поверхностного эффекта. В статье [170] проводится экспериментальная оценка поверхностного эффекта самонесущего изолированного провода СИП-2 сечением 35 мм^2 . Авторы получили экспериментальную зависимость активного сопротивления от частоты в диапазоне от 50 до 1000 Гц. К сожалению, в работе [170] не представлен анализ полученной функции (не определена функциональная

зависимость). В работе [84, с. 64] для учета поверхностного эффекта была предложена простейшая формула:

$$R_n = R_0 \sqrt{v}. \quad (5.3)$$

где, v – номер гармоники.

Формула (5.3), как было показано в работе [138], «является достаточно грубым приближением и, начиная с 5 гармоники, дает значительную погрешность» [138, с. 188].

Увеличение активного сопротивления при протекании токов ВГ в работе [45] оценивалось по формуле:

$$R_n = R_0 \left(0,187 + 0,532\sqrt{n} \right), \quad (5.4)$$

где R_0 – сопротивление жилы на частоте 50 Гц; n – номер гармоники.

Проблеме оценки увеличения активного сопротивления кабельных линий при несинусоидальных режимах посвящена работа [239], где в качестве объекта исследования выбраны кабели с поливинилхлоридной (ПВХ) изоляцией в линейке сечений от 16 до 240 мм^2 . Авторы производили моделирование для типовых нагрузок (компьютерная нагрузка, каскад выпрямитель-инвертор и др.) при вариации суммарного коэффициента гармонических искажений (THD) от 32% до 98% [239, с. 588]. Целью исследований стало определение отношения активного сопротивления на переменном токе к активному сопротивлению на постоянном токе R_{ac}/R_{dc} , чтобы в дальнейшем использовать эту величину для расчета потерь. Считаем, что предложенный в [239] не отражает полной картины, поскольку не учитывает изменение сопротивления под влиянием температуры токоведущей жилы.

Общеизвестно, что сопротивление имеет следующую зависимость от температуры:

$$R = R_0 \left[1 + \alpha(t_{okp} + \Theta_{жc}) \right]. \quad (5.5)$$

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 $0,00435^{\circ}\text{C}^{-1}$ по формуле 5.5 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. Анализ нагрева защищённых проводов воздушных линий (СИП-3 1x240 35 кВ) для стационарного режима с учетом скорости ветра и солнечной радиации производится в работе [44]. Однако, в работе [44] не учтен дополнительный нагрев от токов ВГ.

Практические подходы, используемые в США для оценки дополнительных потерь в токоведущих частях при синусоидальных режимах представлены в работе [241]. В статье [343] представлен анализ дополнительных потерь от ВГ в кабельных линиях и трансформаторах при различных уровнях суммарного коэффициента гармонического искажения K_u (THD).

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 случае, 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.

Дополнительный нагрев токами ВГ может стать причиной отгорания нулевых проводников в сетях напряжением 380 / 220 В. Как отмечено в работе [40], это наиболее часто происходит в зданиях постройки до 1990 г., а в современных условиях проектирования для устранения возможности перегрева

нулевых проводников приходится учитывать нормы, заложенные в ГОСТ Р 50571.5.52-2011 (Установки низковольтные. Выбор и монтаж электрооборудования. Электропроводки) [40, с. 44]. Идея введения понижающих коэффициентов для учета ВГ при проектировании кабельных линий озвучена в работе [45], где производится моделирование картины теплового поля для кабеля АСБ 3х35 + 1x16 мм^2 при протекании несинусоидального тока (для торгового центра). В результате моделирования температура изоляции составила 135 °C, что значительно превысило предельно допустимую температуру (80°C) для бумажно-пропитанной изоляции [45, с. 41].

В статье [211] Е.П. Фигурнов указывает на существенные погрешности (до 40%) при определении температуры неизолированного провода вследствии принимаемых допущений при вычислении площади охлаждения витых и фасонных проводов. Фактическая температура провода определяется не только параметрами режима сети, но и климатическими факторами – мощностью солнечного излучения, скоростью ветра и др. Фактическая температура провода имеет существенное значение при определении пропускной способности линий [211, с. 41].

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.

5.2 Анализ нестационарных несинусоидальных режимов систем электроснабжения с помощью вейвлет преобразования

В настоящей диссертационной работе для анализа нестационарных несинусоидальных режимов предложено использовать представление токов и напряжений через вейвлет коэффициенты. Как уже было отмечено выше, вейвлет

преобразование удобно с точки зрения передачи цифрового потока информации с сохранением данных в трёхмерном виде (амплитуда, частота, время). Кроме того, вейвлет преобразование позволяет значительно сокращать объем передаваемых данных.

Алгоритм определения температуры жил кабелей на основе данных о токовой нагрузке и температуре экрана в режиме реального времени с применением тепловой схемы замещения представлен в работе [88]. Авторы в рамках численного эксперимента рассматривали кабель на напряжение 220 кВ с сечением жилы 1200 мм². Оценка точности предложенного алгоритма в развитии работы показала отклонение расчетной и экспериментальной температуры более чем на 2,5°C [130].

В общем случае, при нестационарных режимах электроэнергетических систем ток I и полная мощность S , являются функциями времени (определяются графиком и режимом работы нагрузок). Если пренебречь изменениями напряжения во времени, то средние потери мощности за интервал времени от t_1 до t_2 можно определить по формуле [54, 55]:

$$\Delta P = \frac{\alpha R_0}{U^2 (t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} S \left(\frac{1}{\alpha + T_{okp}} + T_n \right). \quad (5.6)$$

При математическом моделировании процессов нагрева и охлаждения кабелей нельзя пренебречь 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:

$$\frac{3(1 + \alpha \theta_{np,kl})}{N} \left(\sum_{k \in Z} (i_{J_0,k}^A)^2 + \sum_{k \in Z} \sum_{j=J_0}^{J-1} (i_{j,k}^D)^2 \right) = C_{kl} \frac{d\theta_{kl}}{dt} + \frac{\theta_{np,kl}^{1,25}}{A_k}, \quad (5.7)$$

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

Уравнения теплового баланса для масляного трансформатора будут иметь вид:

$$\begin{cases} P_{xx} + \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R_t + \frac{3R_{tv,0} \cdot (1 + \alpha \theta_{\text{пр.м}})}{N} \left(\sum_{k \in Z} (i_{J_0, k}^A)^2 + \sum_{k \in Z} \sum_{j=J_0}^{J-1} (i_{j, k}^D)^2 \right) = C_m \frac{d\theta_m}{dt} + A_m \theta_{\text{пр.м}}^{1,25}; \\ \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R_t + \frac{3R_{tv,0} \cdot (1 + \alpha \theta_{\text{пр.об}})}{N} \left(\sum_{k \in Z} (i_{J_0, k}^A)^2 + \sum_{k \in Z} \sum_{j=J_0}^{J-1} (i_{j, k}^D)^2 \right) = C_{ob} \frac{d\theta_{ob}}{dt} + A_{ob} \theta_{\text{пр.об}}^{1,25}. \end{cases} \quad (5.8)$$

Для учета фактического нагрева обмоток трансформатора от высших гармоник необходимо определить дополнительные потери активной мощности от влияния нелинейной нагрузки. Дополнительные потери активной мощности в трансформаторах от токов высших гармоник И. В. Жежеленко в монографии [85, с. 129] предлагает учитывать по формуле:

$$\Delta P = 1,291 \frac{P_k}{u_k^2} \sum_{n=2}^N \frac{1 + 0,05n^2}{n\sqrt{n}} K_{U(n)}^2, \quad (5.9)$$

где n – номер гармоники.

В работе [122] А.И. Троицкий и С.С. Костинский предложили метод расчета дополнительных потерь в трансформаторах при наличии нелинейной нагрузки с использованием среднеквадратичных значений токов гармоник:

$$\sum \Delta P_n = \sum I_n^2 A \frac{R_2 + R_h}{(R_2 + R_h)^2 + (X_2 + X_h)^2 n^2} = \sum I_n^2 A \frac{R_{2,h}}{Z_{2,hn}^2}, \quad (5.10)$$

где коэффициент A определяется для каждого конкретного типа трансформатора, является постоянной величиной и определяется напряжением холостого хода для обмотки низкого напряжения U_{2xx} и относительным током холостого хода обмотки высокого напряжения I_{10} [122, с. 62]:

$$A = \frac{10^4 U_{2xx}^2}{k^2 I_{1h}^2 I_{10}^2}. \quad (5.11)$$

Погрешность в определении потерь по выражению 5.10 не превысила 5% [122, с. 66]. Анализу дополнительных потерь в линейке мощности сухих и масляных силовых трансформаторов от 250 кВА до 1600 кВА посвящена работа [121], где авторы приходят к выводу, что при увеличении номинальной мощности трансформатора доля относительных потерь от ВГ уменьшается. Дополнительно авторы отмечают, что «потери мощности от высших гармоник сухих силовых трансформаторов меньше, чем масляных в среднем на 0,37%» [122, с. 57]

Для предотвращения перегрева и ускоренного старения изоляции трансформаторов необходимо предусматривать разгрузку трансформаторов, питающих нелинейную нагрузку [230] на величину дополнительных потерь от ВГ.

5.3 Алгоритм расчета дополнительных потерь в токоведущих частях по вейвлет коэффициентам с учетом высших гармоник и зависимости сопротивления от температуры

Оценке дополнительного нагрева, вызванного наличием ВГ с применением метода конечных элементов, посвящена работа [331], где авторы исследуют нестационарные режимы в соответствии с предложенным суточным графиком электрических нагрузок.

В статье [351] представлена практическая методика определения допустимого температурного режима четырёхжильных кабелей при наличии ВГ. Разработанная авторами методика позволяет осуществлять выбор сечения четырёхжильных кабелей, где в качестве исходных данных выступают суммарный коэффициент гармонического искажения и отношение тока нулевой последовательности и фазного тока. Разработанная в [351] методика позволяет на

уровне, достаточном для практических расчетов, учитывать перегрузку нулевой жилы токами ВГ и, как следствие, перегрев кабеля.

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 5.1).

Шаг 1. Производится выбор оптимального типа вейвлета (формула 2.1) и глубины разложения сигнала тока. Как было отмечено в параграфе 2.1 настоящей диссертационной работы, наиболее оптимальным деревом разложения считается такой вариант, когда локализация частоты вейвлет коэффициентами соответствует ширине гармонических групп [63]. Необходимо отметить, что уровни гармоник тока согласно ГОСТ [65] не нормируются. Тем не менее, ширину гармонических групп тока следует согласовывать с указаниями в [63], сделанными по напряжению.

Шаг 2. Производится пакетное вейвлет преобразование тока по формуле 2.18. Вейвлет коэффициенты, локализующие 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. 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 5.7–5.8).



Рисунок 5.1 – Алгоритм расчета дополнительных потерь от ВГ при учете фактического нагрева токоведущих частей

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.

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. Как показывают практические расчеты, после 4-6 шага итераций определяется установившееся значение температуры [54].

Новый цикл алгоритма начинается в случае изменения локальной энергии спектра, определяющего изменение гармонического состава или амплитуды токов.

С применением разработанного алгоритма был проведен ряд численных экспериментов по определению дополнительных потерь от высших гармоник с учетом зависимости сопротивления токоведущих жил от температуры. Необходимо отметить, что задача является нелинейной и многокритериальной. Влияние поверхностного эффекта определяется частотой гармоники. В то же время, одинаковый суммарный коэффициент гармонических искажений может быть получен суммой различных по составу и амплитуде гармоник. Дополнительно оказывает влияние температура окружающей среды и способы прокладки кабельных линий.

Считаем необходимым привести наиболее значимые выводы.

При увеличении суммарного коэффициента гармонического искажения тока (в ГОСТ не нормируется) происходит увеличение дополнительных потерь мощности в токоведущих частях. На рисунке 5.2 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%. На рисунке 2.43 настоящей диссертации рассмотрен узел нагрузок, состоящий из светодиодного освещения и выпрямительной установки с суммарным коэффициентом гармонического искажения по току 64%. В электрических сетях, питающих офисные и бытовые электроприёмники, такой уровень искажений по току также не является редкостью.

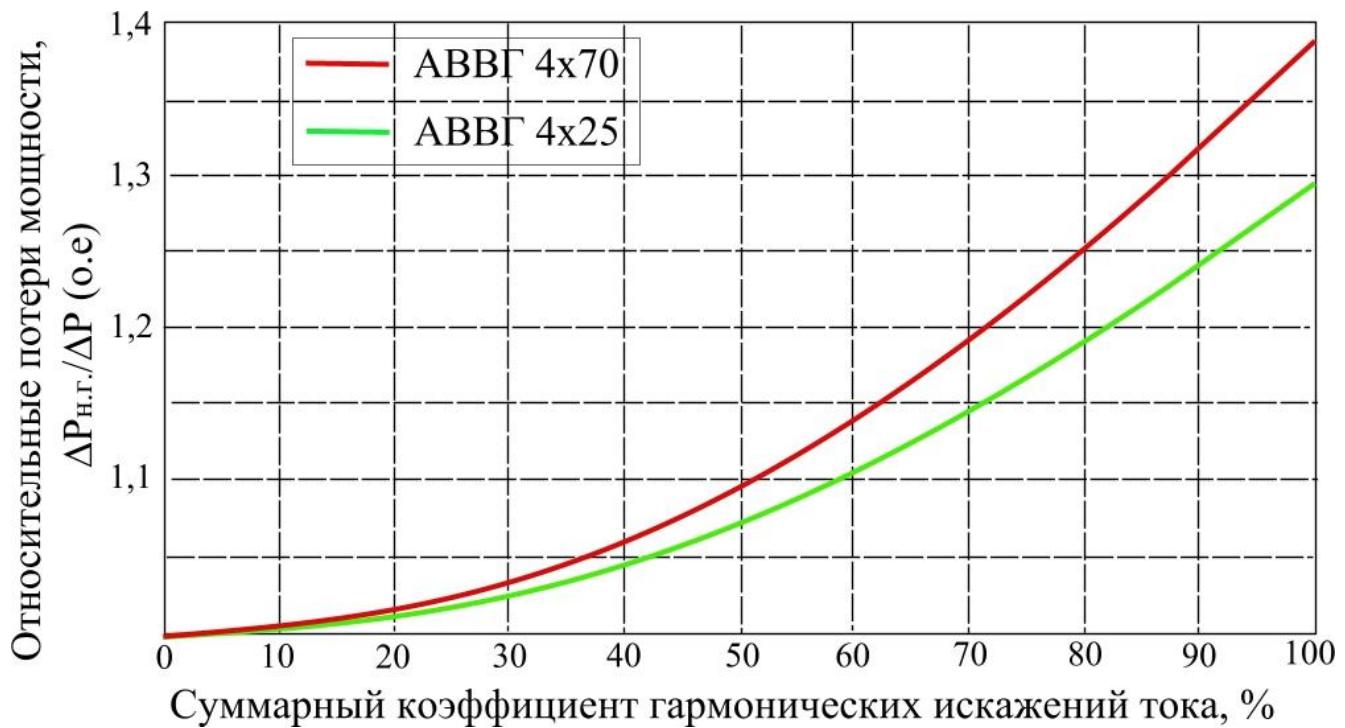


Рисунок 5.2 – Зависимость дополнительных потерь с учетом ВГ и температуры жилы

Учет дополнительного нагрева от высших гармоник и интергармоник обязателен для электроустановок, содержащих нелинейную нагрузку и работающих в длительном режиме.

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

На рисунке 5.3 представлены зависимости увеличения фактической температуры жилы кабелей АВВГ при увеличении суммарного коэффициента

гармонического искажения по току. В расчетах принималось, что длительно допустимой температурой 80°C, жила кабеля достигла при синусоидальном токе. Для сетей 0,4 кВ при отсутствии проверки кабельных линий на термическую стойкость токам КЗ этот вариант развития событий возможен.

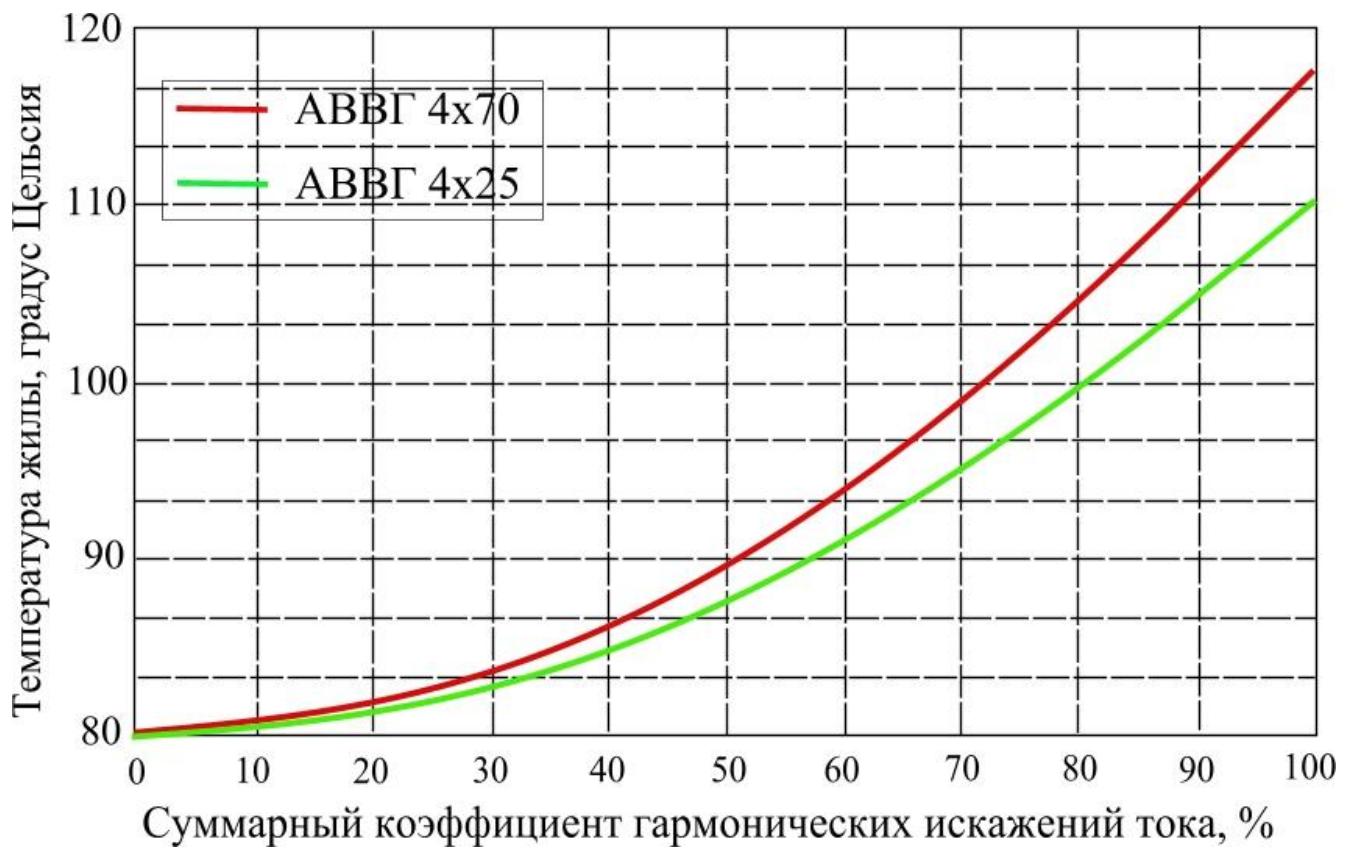


Рисунок 5.3 – Зависимость фактической температуры жилы от суммарного коэффициента гармонических искажений тока

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.

5.4 Основные результаты и выводы

1. Обоснована актуальность учета дополнительных потерь мощности и дополнительного нагрева токоведущих частей от действия высших гармоник и

интергармоник в электрических сетях. Показано, что сопротивление проводника в диапазоне рабочих температур может принимать значения от $R=0.87 \cdot R_0$ до $R=1,87 \cdot R_0$, т.е. изменяться в широком диапазоне. Высшие гармоники и интергармоники являются причиной дополнительного нагрева фазных и нулевых жил линий.

2. Предложены уравнения теплового баланса для кабеля и трансформатора с масляным охлаждением для расчета фактической температуры токоведущих частей. В представленных уравнениях использовано вейвлет разложение тока, что позволяет их применять в системе цифровой обработки данных.

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

4. Разработан алгоритм расчета дополнительных потерь в токоведущих частях с учетом зависимости сопротивления от температуры при наличии нагрузок, искажающих синусоидальность формы кривой напряжения и тока. Алгоритм использует предложенные в диссертации уравнения теплового баланса и основан на математическом аппарате вейвлет преобразования.

6 УСТОЙЧИВОСТЬ УЗЛОВ НАГРУЗОК СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРИ НАЛИЧИИ ВЫСШИХ ГАРМОНИК В СЕТЯХ

6.1 Методика анализа самозапуска асинхронных двигателей при несинусоидальном напряжении питающей сети

Высшие гармоники, действуя как отдельные последовательности, вызывают дополнительные моменты, действующие на ротор асинхронного двигателя (АД). Гармонический ряд, удовлетворяющий равенству (6.1) образует систему токов (напряжений) обратной последовательности:

$$\begin{cases} s_v = \frac{v + (1 - s_{hom})}{v}; \\ v = 6n - 1, \quad n \in \mathbb{N}. \end{cases} \quad (6.1)$$

Гармонический ряд, соответствующий равенству (6.2) соответствует системе прямой последовательности и формирует критическое скольжение высшей гармоники на неустойчивой части характеристики результирующего момента (рисунок 6.1–6.2)

$$\begin{cases} s_v = \frac{v - (1 - s_{hom})}{v}; \\ v = 6n + 1, \quad n \in \mathbb{N}. \end{cases} \quad (6.2)$$

Дополнительные электромагнитные моменты, обусловленные высшими гармониками могут стать причиной «застrevания» асинхронного двигателя на скоростях, меньших номинальной.

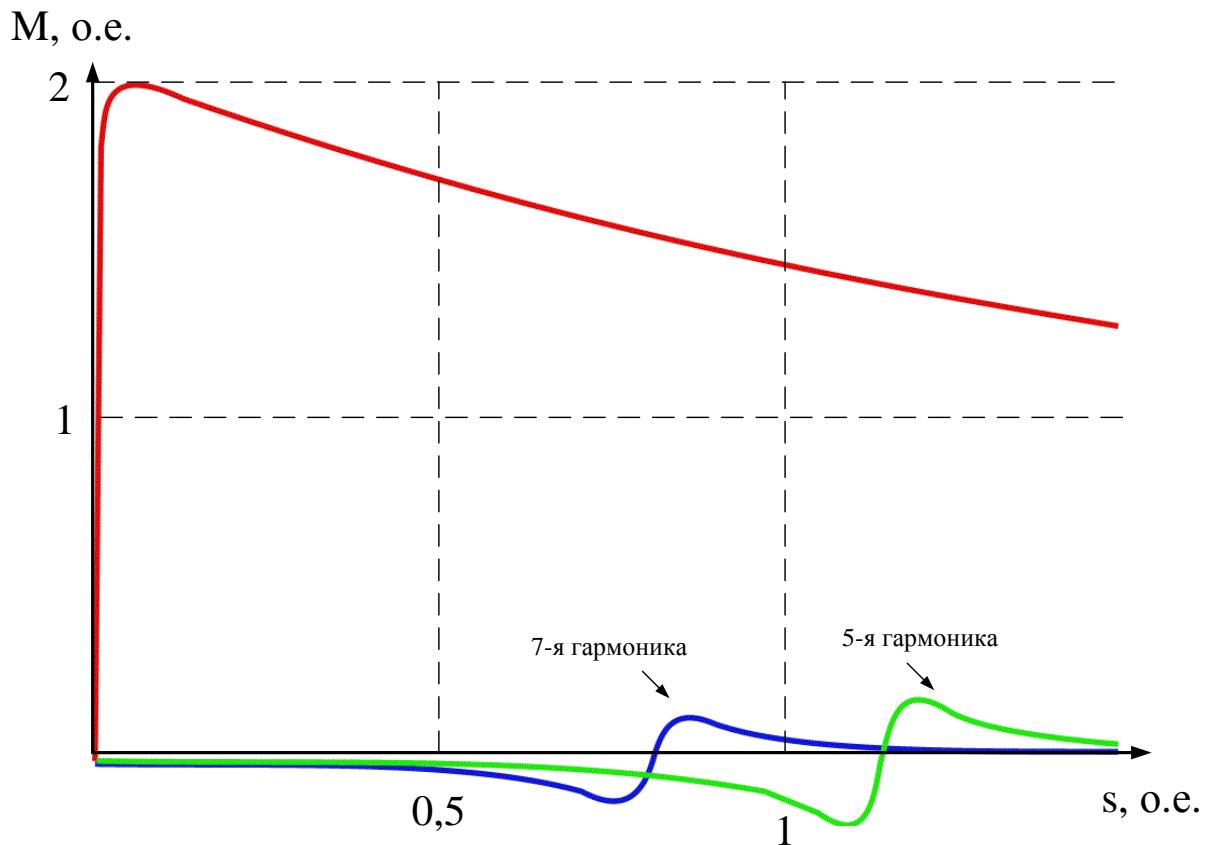


Рисунок 6.1 – Вращающие и тормозящие моменты основной и высших гармоник

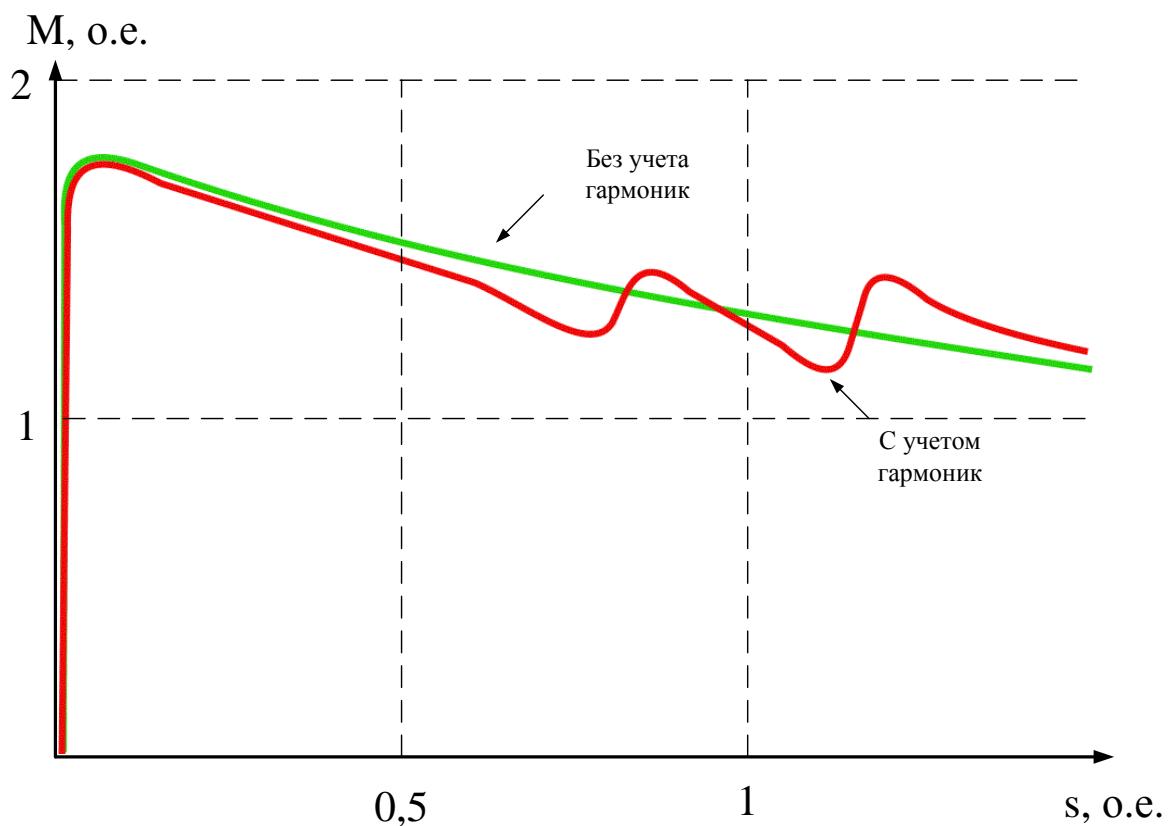


Рисунок 6.2 – Механическая характеристика АД с учетом и без учета высших гармоник

Анализ добавочных потерь мощности, а также оценка дополнительных колебательных моментов от воздействия ВГ в асинхронных двигателях (АД) производится профессором Сальниковым В.Г. (и др.) в работе [41]. Поскольку амплитуды колебательных моментов не зависят от величины нагрузки на валу, авторы отмечают, что «при небольшой нагрузке в режиме, близком к холостому ходу, амплитуда колебательных моментов может превзойти величину основного электромагнитного момента двигателя» [41, с. 134]. Помимо вибрационного воздействия и возникновения дополнительных колебательных моментов, установлено, что несинусоидальность напряжения влияет еще и на шумовые характеристики АД. Так, в работе [109] на основании разработанной методики расчетным путём доказано возрастание шума АД на 5-6 дБ при питании от несинусоидального напряжения [109, с. 4].

Для многих промышленных предприятий характерна схема электроснабжения, когда от одной секции шин питается частотно-регулируемый привод (ЧРП) и нерегулируемая асинхронная нагрузка. В своей диссертации Д. С. Лимаров [132, с. 30] производит анализ ПКЭ для системы электроснабжения мостового крана, где станции управления ЧРП являются источниками искажений, влияющих на нерегулируемую (спокойную) нагрузку.

Обзор технических решений (устройств) для обеспечения динамической устойчивости узлов нагрузки по напряжению приводится в [100], как правило, действие этих устройств направлено на компенсацию провалов напряжения.

Для моделирования динамических характеристик АД с учетом высших гармоник уравнения могут быть представлены в системе координат α, β, θ^3 :

³ Планков, А. А. Учет несинусоидальности напряжения при исследовании устойчивости узлов систем электроснабжения с асинхронной нагрузкой: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Планков Александр Анатольевич. – Омск: Омский гос. техн. ун-т, 2013. – 125 с.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\Psi_{1\alpha}}{dt} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} u_{j,k}^A \varphi_{j,k}(t) + \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} u_{j,k}^D \psi_{j,k}(t) - r_2 \frac{x_{\mu} \Psi_{2\alpha} - x_1 \Psi_{1\alpha}}{x_{\mu}^2 - x_1 x_2} \\ \frac{d\Psi_{1\beta}}{dt} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} u_{j,k}^A \varphi_{j,k}(t) + \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} u_{j,k}^D \psi_{j,k}(t) - r_2 \frac{x_{\mu} \Psi_{2\beta} - x_1 \Psi_{1\beta}}{x_{\mu}^2 - x_1 x_2} \\ \frac{d\Psi_{2\alpha}}{dt} = \Psi_{2\beta} \omega - r_1 \frac{x_{\mu} \Psi_{1\alpha} - x_1 \Psi_{2\alpha}}{x_{\mu}^2 - x_1 x_2} \\ \frac{d\Psi_{2\beta}}{dt} = \Psi_{2\alpha} \omega - r_1 \frac{x_{\mu} \Psi_{1\beta} - x_1 \Psi_{2\beta}}{x_{\mu}^2 - x_1 x_2} \\ \omega = \frac{x_{\mu} (x_{\mu}^2 \Psi_{1\beta} \Psi_{2\alpha} + x_1 x_2 \Psi_{2\beta} \Psi_{1\alpha} - x_{\mu}^2 \Psi_{2\beta} \Psi_{1\alpha} - x_1 x_2 \Psi_{1\beta} \Psi_{2\alpha})}{J (x_{\mu}^2 - x_1 x_2)} - \frac{m_c}{J} \end{array} \right. , \quad (6.3)$$

где $\Psi_{1\alpha}$, $\Psi_{1\beta}$, $\Psi_{2\alpha}$, $\Psi_{2\beta}$ – проекции потокосцепления обмотки статора и ротора АД на оси α и β соответственно.

На основе разработанного в главе 2 метода расчета переходных процессов произведем расчет переходного процесса пуска АД.

С помощью системы уравнений (6.3) для асинхронного двигателя АИР80В4 ($P_h=1,5$ кВт; $n_0=1500$ об/мин) построим динамические характеристики электромагнитного момента при пуске. Для синусоидального номинального напряжения переходный процесс представлен на рисунке 6.3.

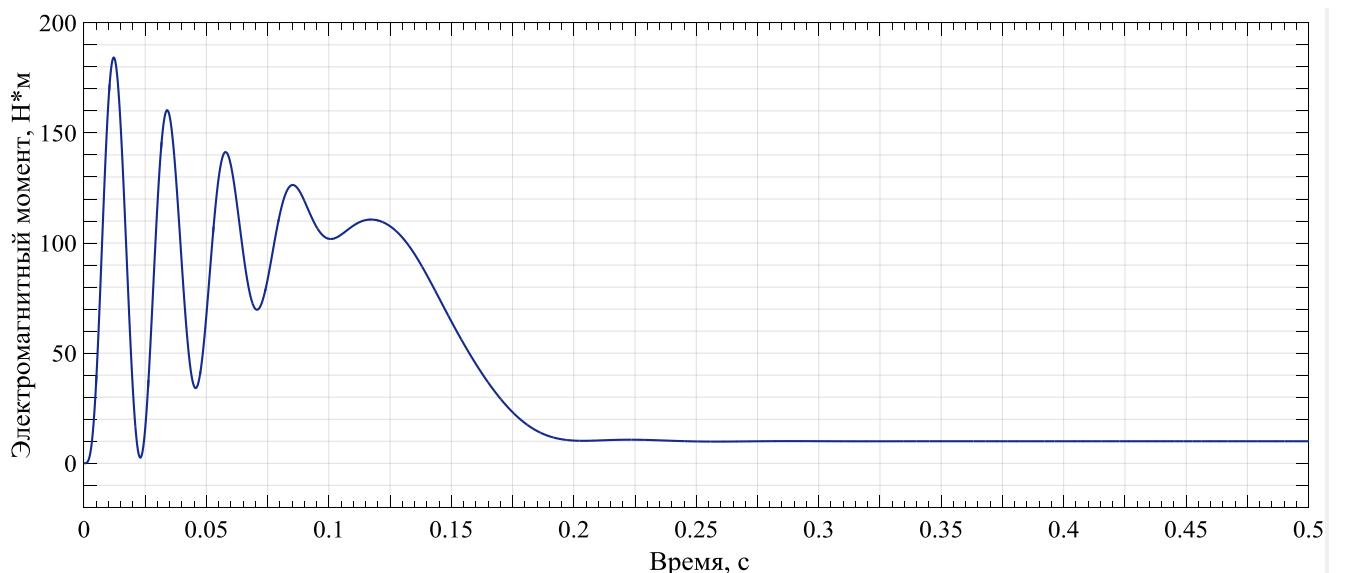


Рисунок 6.3 – Переходный процесс электромагнитного момента при пуске АД без учета ВГ

Вторая характеристика переходного процесса построена при условии питания АД несинусоидальным напряжением. Уровень высших гармоник при моделировании был принят в соответствии с данными измерений показателей качества электроэнергии (параграф 3.3 настоящей диссертации). Динамическая характеристика пуска АД при искажении синусоидальности формы кривой напряжения приведена на рисунке 6.4.

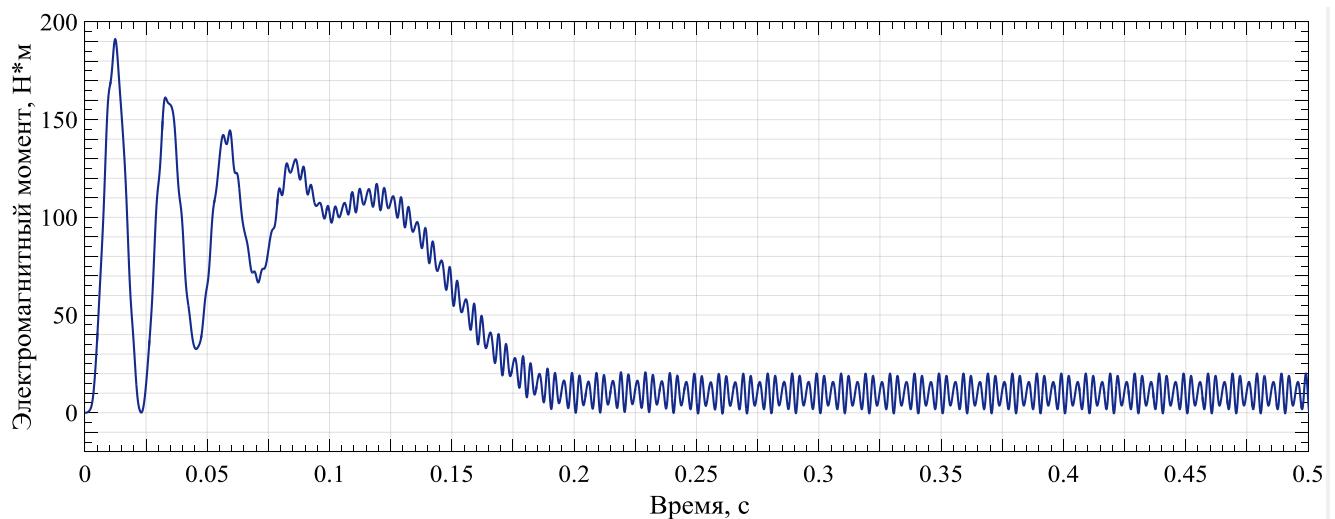


Рисунок 6.4 – Переходный процесс электромагнитного момента при пуске АД с учетом ВГ

На рисунке 6.4 видны колебания момента, причиной являются несинусоидальные токи статора (рисунок 6.5)

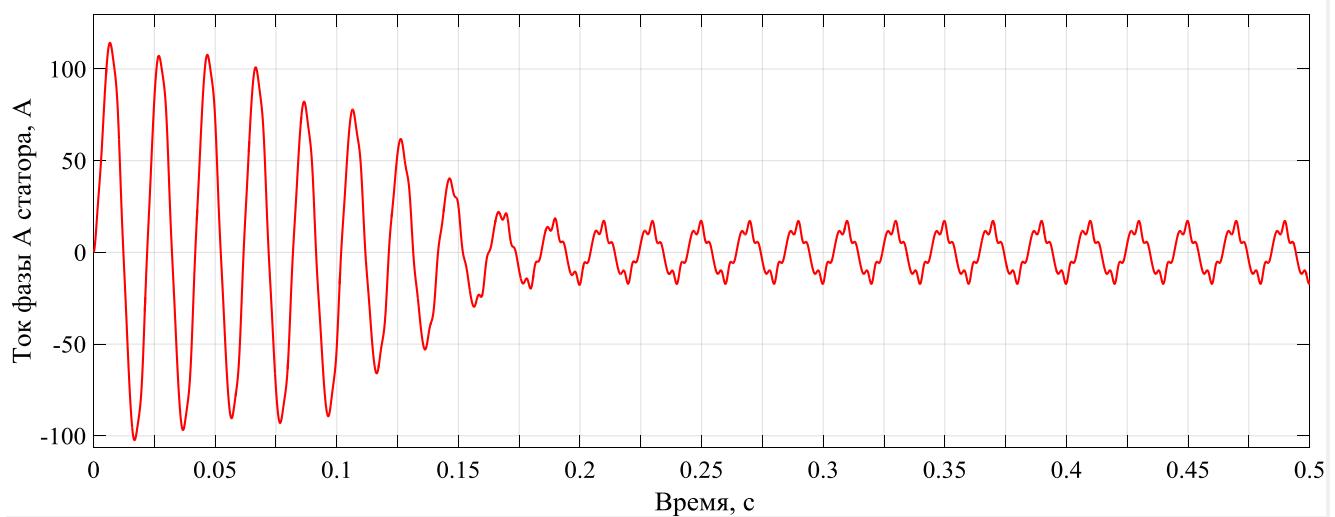


Рисунок 6.5 – Ток статора пуске АД с учетом ВГ

Проведем быстрое преобразование Фурье тока статора на отрезке, когда завершился переходный процесс (рисунок 6.6 – исследуемый фрагмент осциллограммы тока выделен красным цветом).

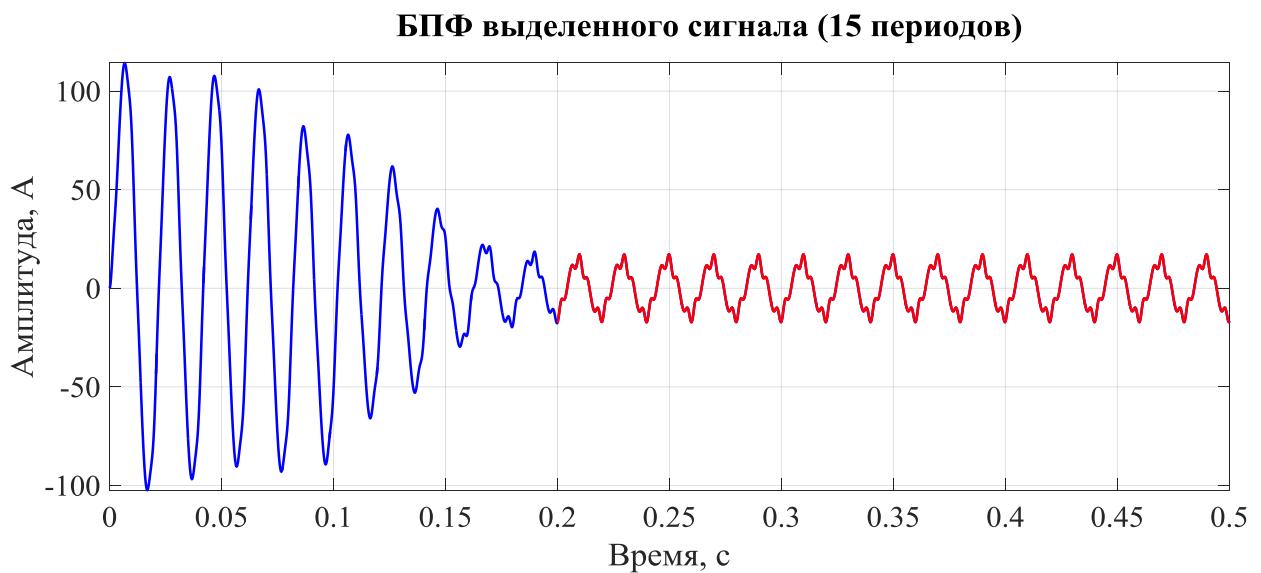


Рисунок 6.6 – Окно преобразования Фурье для анализа тока статора

В результате БПФ установившегося тока (рисунок 6.7) видно, что в токе присутствует 5-я и 7-я гармоника.

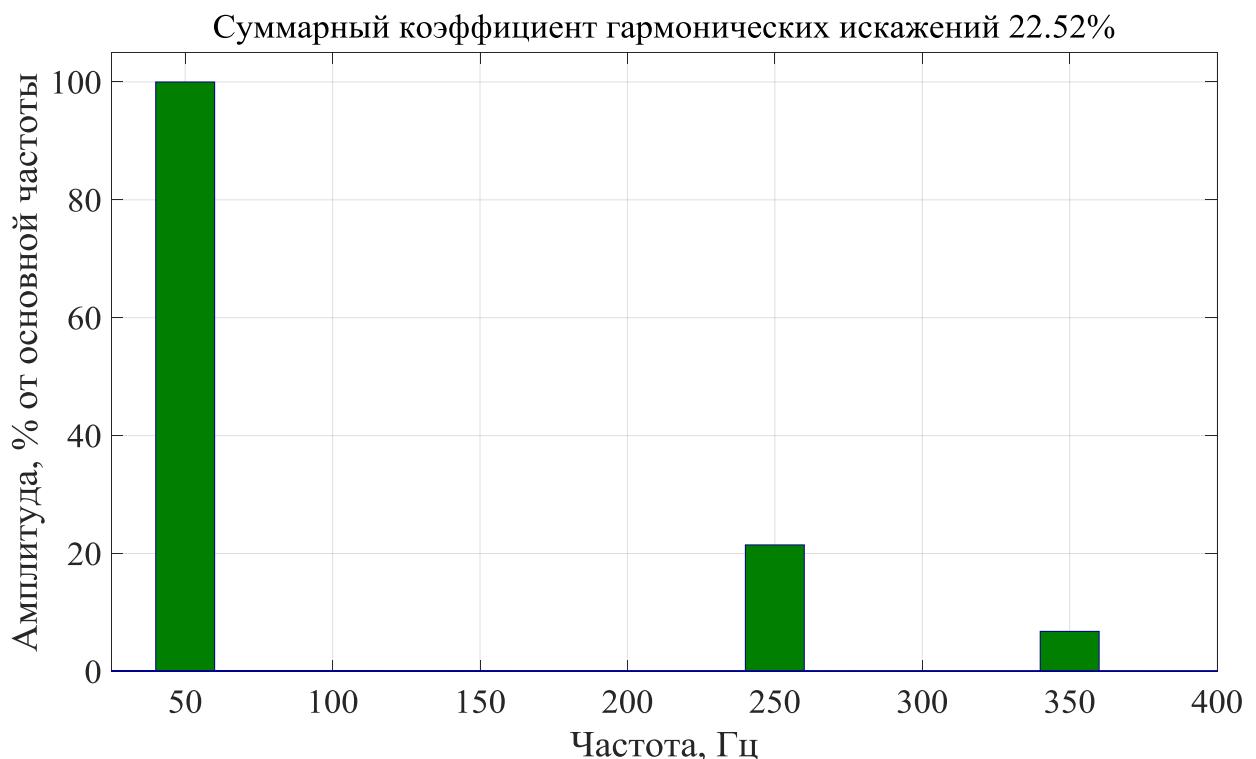


Рисунок 6.7 – Спектральный состав тока статора АД

Динамическая механическая характеристика исследуемого АД при синусоидальном напряжении представлена на рисунке 6.8. После завершения переходного процесса двигатель достигает номинального момента $10\text{Н}\cdot\text{м}$ и номинальной скорости $n_{\text{ном}}=1480$ об/мин.

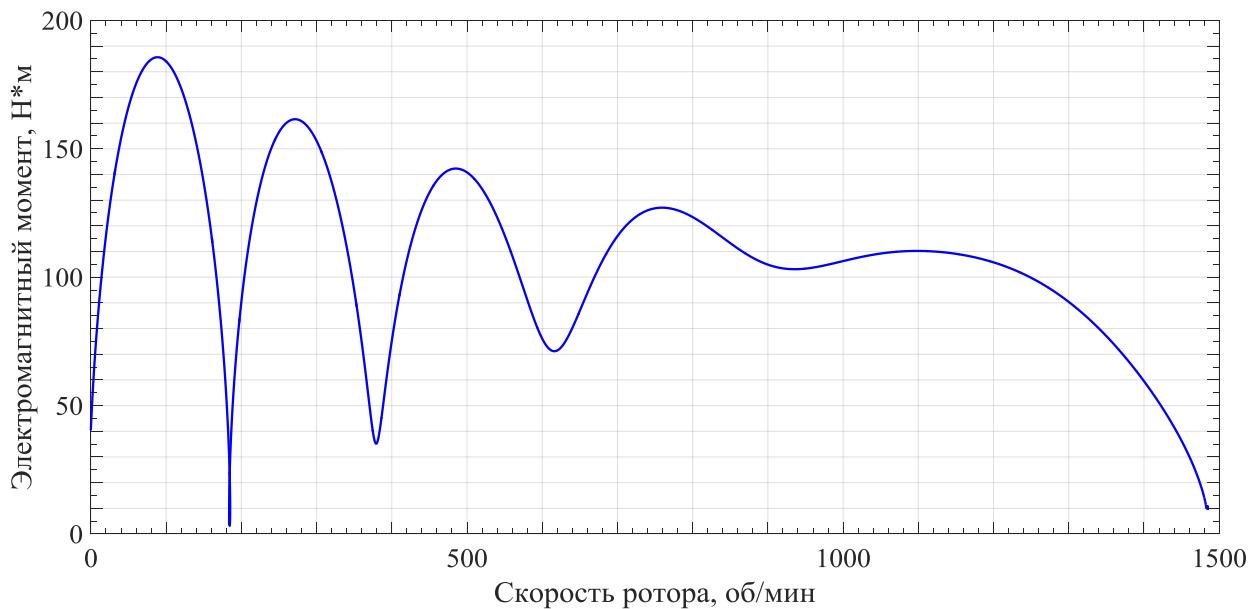


Рисунок 6.8 – Динамическая механическая характеристика АД без учета ВГ

При искажении питающего напряжения высшими гармониками имеют место колебания момента и колебания скорости, когда переходный процесс должен был завершиться (рисунок 6.9).

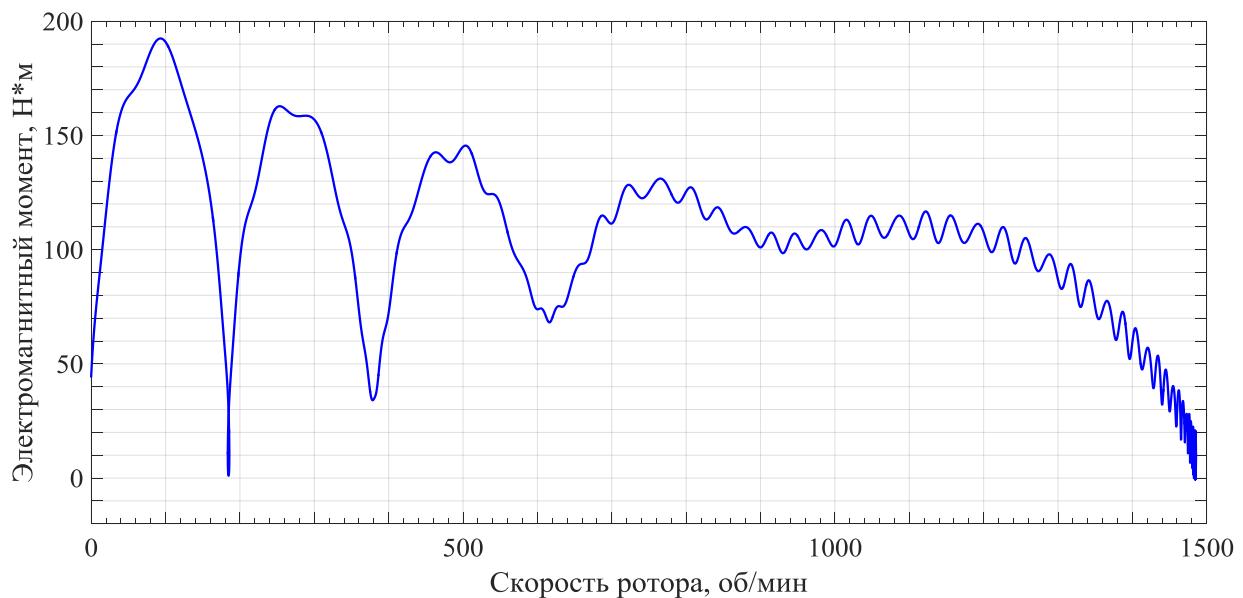


Рисунок 6.9 – Динамическая механическая характеристика АД с учетом ВГ

Для оценки влияния несинусоидальности питающего напряжения на динамическую устойчивость АД необходимо решить систему уравнений:

$$\begin{cases} T_j \frac{ds}{dt} = m_c - m_a; \\ \sum_{\nu=1}^{40} U_{\nu} = \frac{E_c}{1 + \frac{z_c}{z_d}}. \end{cases} \quad (6.4)$$

При этом необходимо учесть, что напряжение U_{ν} представляет собой гармонический спектр, заданный набором вейвлет коэффициентов:

$$\sum_{\nu=1}^{40} U_{\nu} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} u_{j,k}^A \varphi_{j,k}(t) + \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} u_{j,k}^D \psi_{j,k}(t). \quad (6.4 \text{ a})$$

График разгона АД при наличии и отсутствии ВГ представлен на рисунке 6.10.

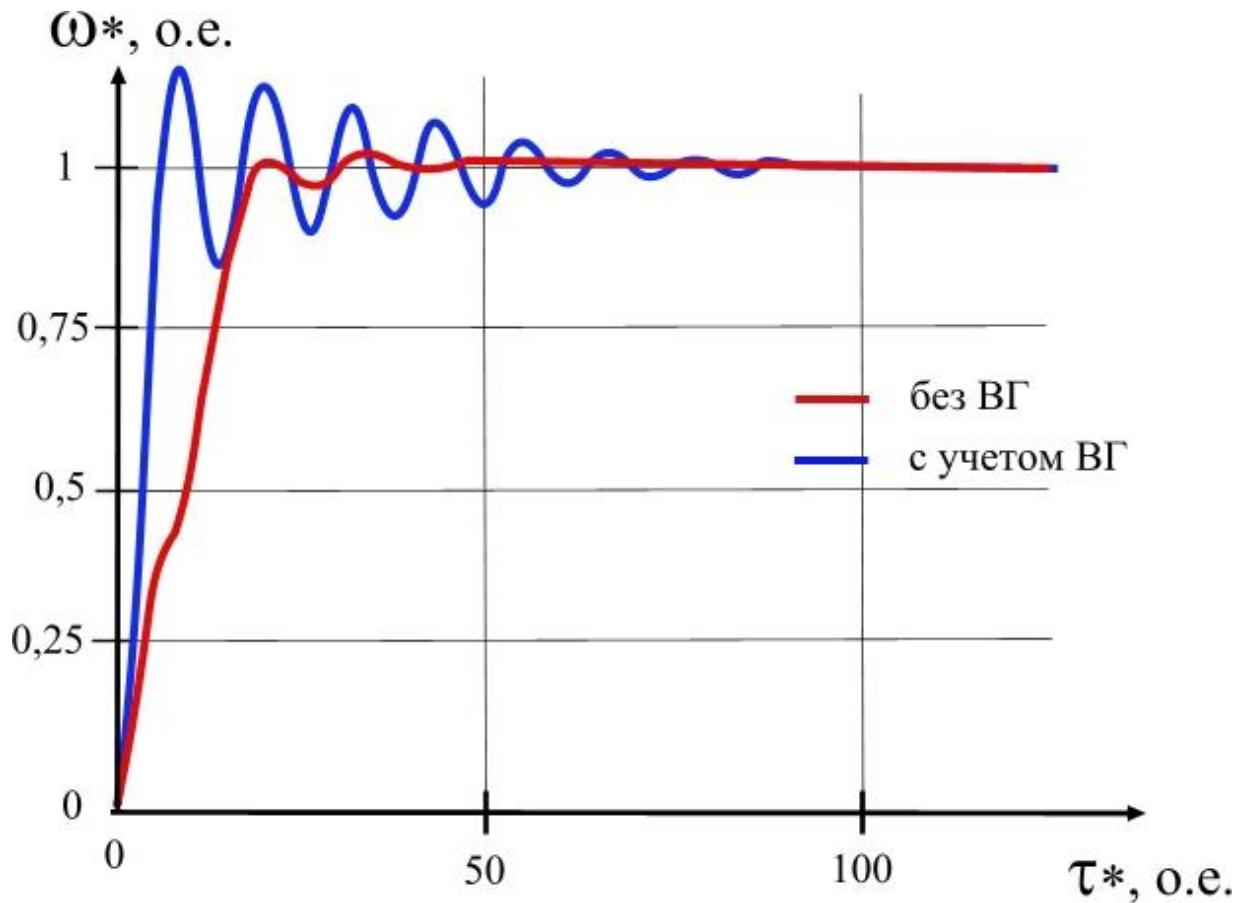


Рисунок 6.10 – Увеличение времени разгона АД в режиме СЗ при наличии ВГ

Расчеты, проведенные по уравнениям 6.3–6.4 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.

6.2 Анализ статической устойчивости узла нагрузок при наличии высших гармоник

В настоящее время разработан ряд методик проведения активного эксперимента (Ю. В. Хрущев и др. сотрудники ТПУ) и статистической обработки полученных в ходе эксперимента данных (В. И. Нагай и др. сотрудники ЮРГПУ им. М.И. Платова; А.В. Паздерин и др. сотрудники УрФУ). Фундаментальные алгоритмы в условиях ограничений, обусловленных факторами надёжности и электробезопасности, могут быть дополнены и модернизированы [71].

Анализу статической устойчивости узлов комплексной нагрузки (в составе которой присутствуют асинхронные двигатели) посвящена работа [99]. Авторами предложен метод контроля ограничений по статической устойчивости в режиме реального времени. Для схемы замещения комплексного узла нагрузки, сформированной на базе упрощенной Г-образной схемы замещения АД, рекомендуемой для анализа статической устойчивости (рисунок 6.1.2) можно записать систему уравнений [99, с. 198]:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_i = I_{si}^2 \frac{R}{s_i} + I_{cmi}^2 R_{cm} = \left(\frac{U_i}{\sqrt{\left(\frac{R}{s_i} \right)^2 + X_s^2}} \right)^2 \frac{R}{s_i} + \left(\frac{U_i}{\sqrt{R_{cm}^2 + X_s^2}} \right)^2 R_{cm}; \\ Q_i = I_{si}^2 + I_{cmi}^2 X_{cm} + I_{\mu i}^2 X_{\mu} = \left(\frac{U_i}{\sqrt{\left(\frac{R}{s_i} \right)^2 + X_s^2}} \right)^2 X_s + \left(\frac{U_i}{\sqrt{R_{cm}^2 + X_s^2}} \right)^2 X_{cm} + \frac{U_i^2}{X_{\mu}}. \end{array} \right. \quad (6.5)$$

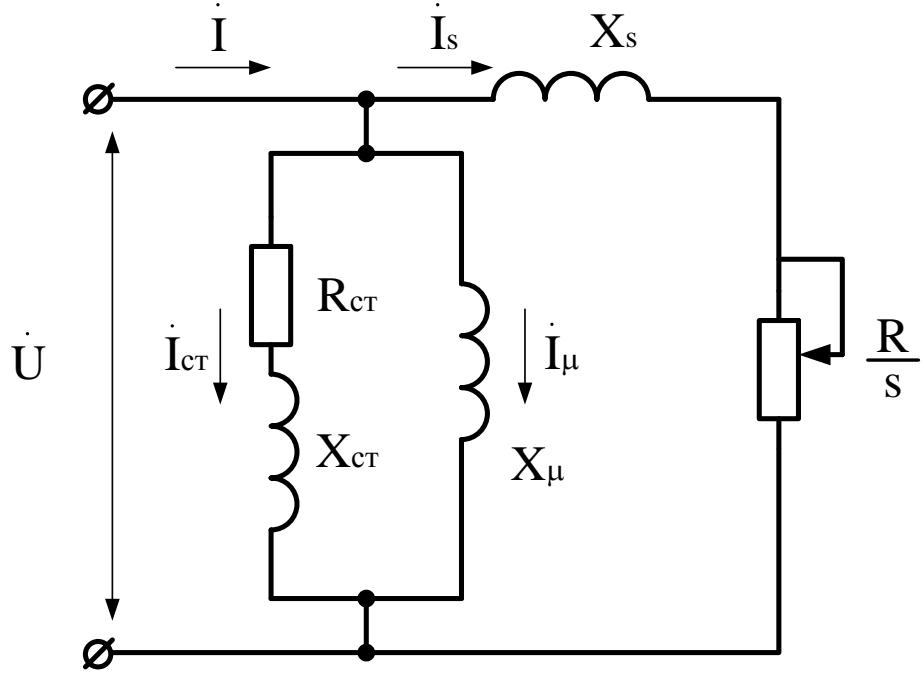


Рисунок 6.11 – Схема замещения комплексного узла нагрузки с АД, представленного упрощенной Г-образной схемой для анализа статической устойчивости

Параметры схемы замещения в условиях, когда АД находится в эксплуатации, могут быть определены по методике, предложенной в статье [195], по мгновенным величинам тока и напряжения статора, полученным с цифровых измерительных приборов.

Критическое напряжение асинхронной нагрузки может быть найдено по формуле [99]:

$$U_{kp} = \sqrt{\left(\frac{R}{s_{kp}}\right) / \left[\left(\frac{R}{s_{kp}}\right)^2 + X_s^2 \right] + \frac{R_{cm}}{\left(R_{cm}^2 + X_{cm}^2\right)}}. \quad (6.6)$$

Проверка достоверности предложенного в работе [99] метода определения критических напряжений узлов нагрузки в режиме реального времени была произведена на физической модели энергосистемы НГТУ [99, с. 199].

Программа для расчета коэффициентов запаса по статической устойчивости с использованием критериев

$$\frac{dQ}{dU} \rightarrow -\infty, \quad \frac{dE}{dU} > 0. \quad (6.7)$$

но без учета высших гармоник, представлена в работе [147]. При наличии ВГ в сети возникает мощность искажения. Влияние мощности искажения на критерии (6.7) рассмотрено в работе [207], где авторы отмечают снижение коэффициента запаса по напряжению при наличии ВГ.

Задача определения резерва статической устойчивости комплексной нагрузки (в состав которой входит АД) при нормальном режиме работы для сетей ОАО «Тюменьэнерго», питающих Сургутские месторождения решена в работе [123]. Авторами были определены коэффициенты запаса статической устойчивости по напряжению и по скольжению.

Отклонения ПКЭ от нормативных значений оказывают негативное влияние на превышение температуры обмоток АД, что вызывает ускоренное старение изоляции. Как показано в [86, с. 290] нагрев обмоток АД вызван совместным действием следующих факторов: температуры окружающей среды, коэффициента относительной загрузки двигателя по мощности, медленными изменениями напряжения (отрицательные и положительные отклонения напряжения), напряжениями обратной последовательности и высших гармоник. Статистические характеристики измерений медленных изменений напряжения приведены в статье [155].

Определение статических характеристик нагрузки по напряжению в настоящей диссертационной работе выполнялось для электроприемников, питаемых от секции шин 6 кВ подстанции 35/6 кВ № 358. Согласно действующей нормативно-правовой документации, подстанция № 358 находится на балансе ООО «РН-Юганскнефтегаз».

Следует отметить, что ООО «РН-Юганскнефтегаз» относится к потребителям нефтехимической отрасли с непрерывным циклом производства и нарушение любого из показателей качества электрической энергии влечет за собой массовое расстройство технологического процесса и простоям на

производство (например, недоотпуск нефти). Особенностью режима работы предприятия является однородный по времени технологический процесс с, практически постоянным (малоизменяющимся) во времени, режимом работы электрооборудования.

Однолинейная схема участка электрической сети, на которой проводились экспериментальные исследования, приведена на рисунке 6.12.

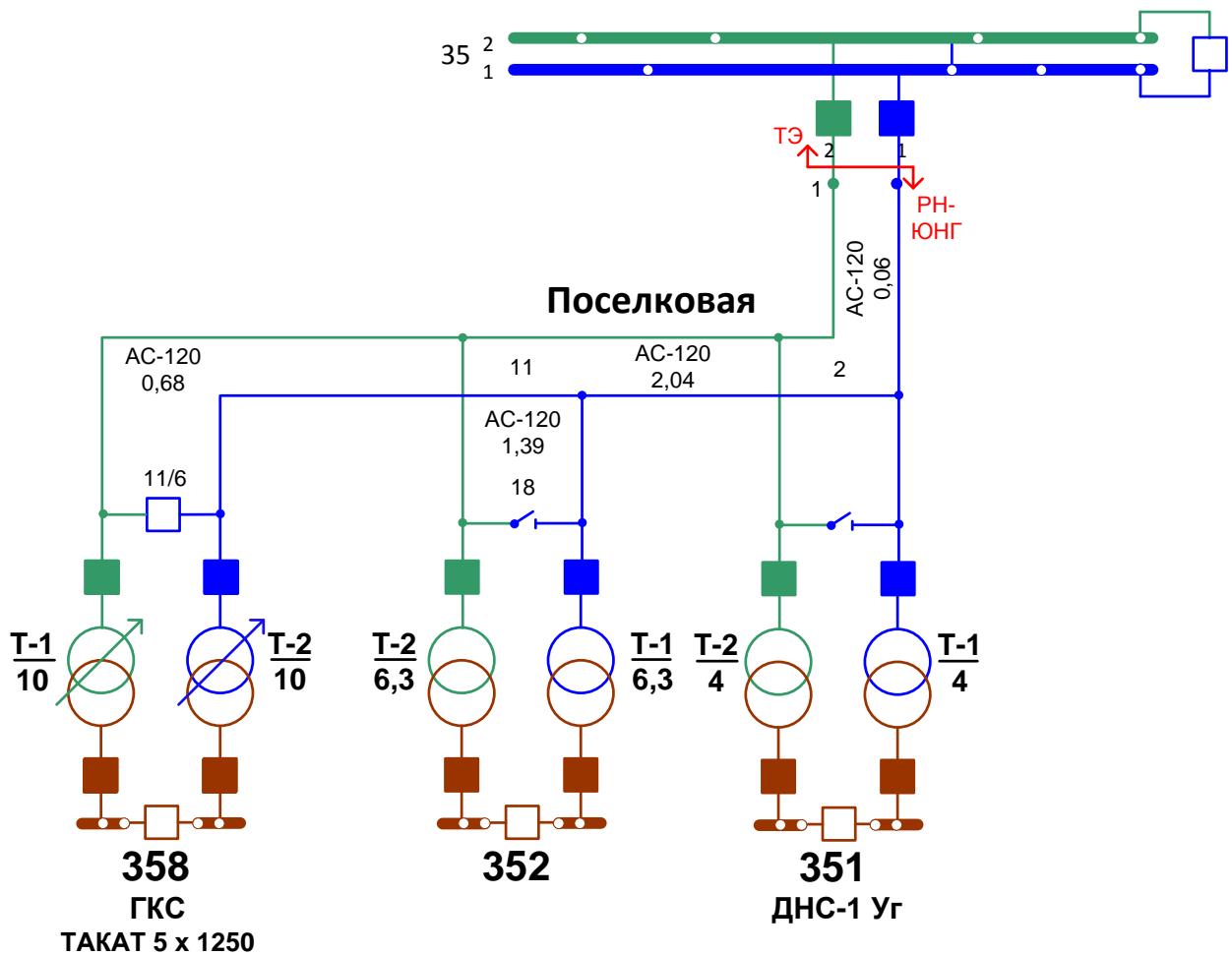


Рисунок 6.12 – Схема исследуемого участка электрической сети в однолинейном исполнении

Согласно схеме подстанции, представленной на рисунке 6.12, на ней установлены два трансформатора марки SFZ9–10000/36,75/6,3 с диспетчерскими номерами Т-1 и Т-2, имеющие технические характеристики, представленные в таблице 6.1.

Таблица 6.1. Паспортные данные трансформаторов

Тип	Мощность $kV \cdot A$	Напряжение обмотки, kV		Потери, kVt		$U_k, \%$	$I_{xx}, \%$
		ВН	НН	P_{xx}	P_{k3}		
SFZ9-10000/36,75/6,3	10000	36,75	6,3	11,6	50,5	7,85	0,63

Пределы регулирования напряжения $\pm 8 \times 1,5 \%$.

Исследуемые электроприемники питаны от трансформатора с диспетчерским номером Т-1. Точки подключения приборов указаны на рисунке 6.13.

Известно, что статические характеристики нагрузки (СХН) при расчете режимов представляются полиномами второй степени [157, 167, 204]:

$$\begin{cases} \frac{P_n}{P_\delta} \left(\frac{U}{U_\delta} \right) = a_0 + a_1 \frac{U}{U_\delta} + a_2 \frac{U^2}{U_\delta^2}; \\ \frac{Q_n}{Q_\delta} \left(\frac{U}{U_\delta} \right) = b_0 + b_1 \frac{U}{U_\delta} + b_2 \frac{U^2}{U_\delta^2}. \end{cases} \quad (6.8)$$

Пример расчета коэффициентов полиномов для различных узлов комплексной нагрузки в узлах 6 и 110 кВ для подстанции 110 кВ «Ивановская-12» приводится в работе [157].

В работе [204, с. 68] СХН строились двумя способами. Первый способ предполагал использование метода наименьших квадратов. Второй способ построения СХН – по коэффициентам, полученным на основе расчётных выборок производных активной и реактивной мощности (регулирующий эффект):

$$K_p = \frac{dP_{H^*}}{dU_*}, \quad K_q = \frac{dQ_{H^*}}{dU_*}. \quad (6.9)$$

$$\begin{aligned} K_{pi} &\approx \frac{(P_{2i^*} - P_{2i-1^*})}{(U_{2i^*} - U_{2i-1^*})}, \\ K_{qi} &\approx \frac{(Q_{2i^*} - Q_{2i-1^*})}{(Q_{2i^*} - Q_{2i-1^*})}. \end{aligned} \quad (6.10)$$

При расчете производных принимались средние значения P_{i*} , Q_{i*} из 5 измерений на каждом положении переключателя.

В работах [102, 164] при определении статических характеристик нагрузки в узле сети 6 кВ системы электроснабжения предприятия нефтегазодобывающей отрасли с учетом электромагнитной обстановки функции $P=f(U)$, $Q=f(U)$ были разложены в ряд Тейлора относительно номинального напряжения U_n . При этом были использованы уравнения баланса мощностей [102, с. 142]:

$$\begin{cases} P(U) = P(U_n) + \frac{\partial P}{\partial U} \Delta U; \\ Q(U) = Q(U_n) + \frac{\partial Q}{\partial U} \Delta U. \end{cases} \quad (6.11)$$

На основании выполненных исследований, авторы [102, 164] получили коэффициент запаса по напряжению $Ku=43\%$.

В статье [253] авторы предлагают при моделировании узла нагрузок в полиноме второй степени учитывать фактор высших гармоник. При вынесении номинальных мощностей P_0 и Q_0 за знак скобки, а также используя обозначения в соответствии с теорией ZIP-модели (по обозначению электрических величин, входящих в полином в качестве постоянных Z – комплексного сопротивления, I – тока, P – мощности) уравнения (6.11) можно представить в виде [253, с. 369]:

$$\begin{cases} P_h = P_{0h} \left[p_z \bar{U}_h^2 + p_I \bar{U}_h + p_p \right]; \\ Q_h = Q_{0h} \left[q_z \bar{U}_h^2 + q_I \bar{U}_h + q_p \right]; \\ \Delta S_h \sum_{\nu=1}^N |U_{\nu}|^2 Y_h^{\nu} \quad \nu \neq h. \end{cases} \quad (6.12)$$

Таким образом, авторы [253] предлагают учитывать напряжения гармонических составляющих U_h и характеристики мощностей (мощность искажения) на высших гармониках ΔS_h .

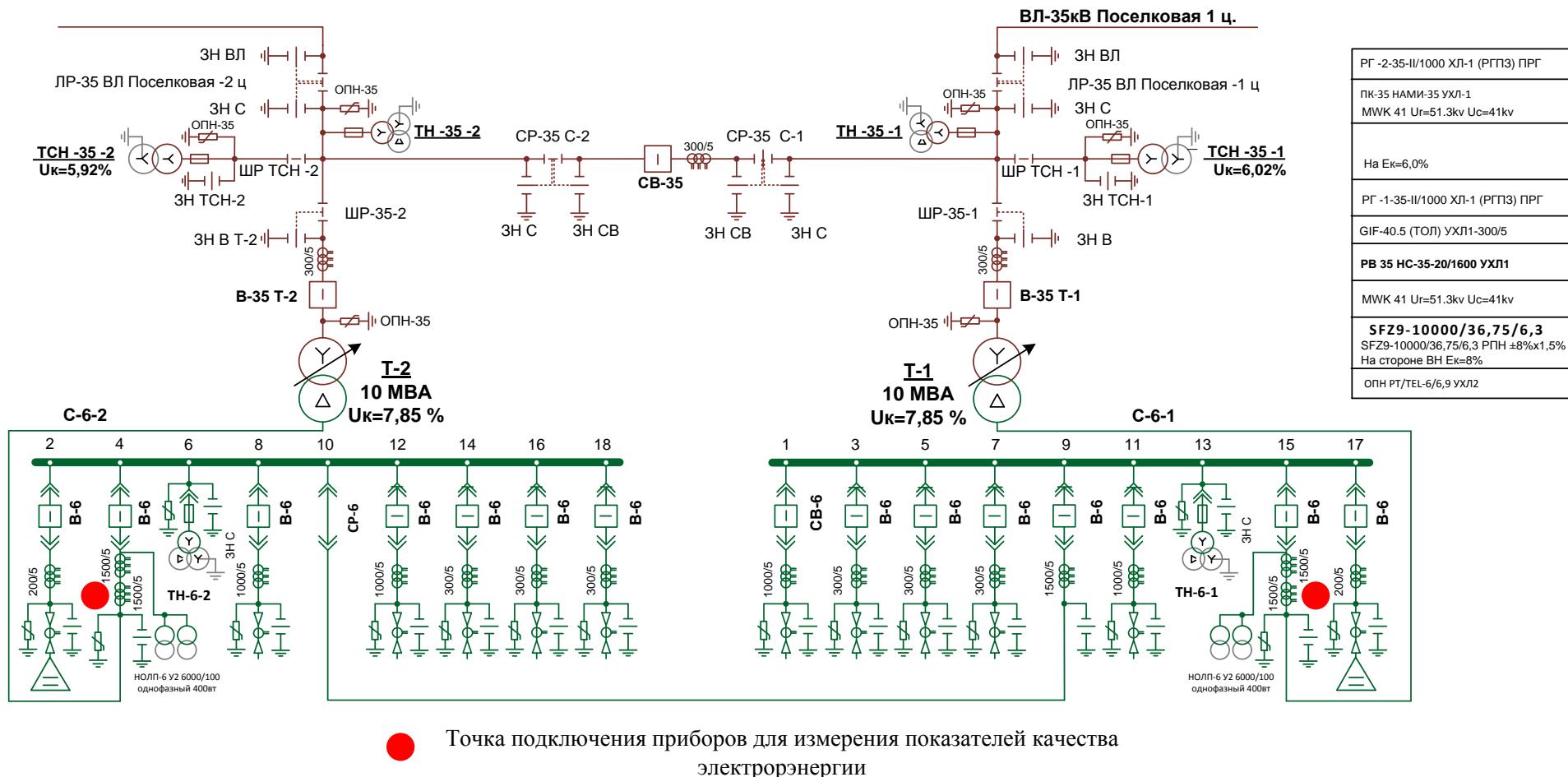


Рисунок 6.13 – Схема подстанции. Точки подключения приборов при проведении активного эксперимента

В результате анализа электрических схем ООО «РН-Юганскнефтегаз» было установлено, что при проведении активного эксперимента изменение напряжения будет осуществляться при помощи РПН Т-1 подстанции № 358.

Из большого массива полученных экспериментальных данных приведем результаты измерений напряжения, активной и реактивной мощности. Эти данные сведены в таблицу 6.2.

Таблица 6.2. Значения измеренных в эксперименте величин

Время измерения	U ₁ , В	P, кВт	Q,квар	Время измерения	U ₁ , В	P, кВт	Q,квар
15:40:18	6075,8	2222,6	763,8	15:53:33	6172,5	2242,5	830,5
15:40:36	6076,9	2235,4	765,9	15:54:21	6174	2239,2	825,5
15:40:55	6076,3	2234,9	766,6	15:55:39	6084,9	2224,5	759,5
15:41:13	6075,6	2235,2	766,1	15:55:57	6084,7	2228,3	761,2
15:41:31	6075,4	2231,6	764,9	15:56:15	6086,5	2229,8	763,7
15:41:49	6076,8	2236,6	764,7	15:56:34	6087,5	2232,8	765,9
15:42:07	6076,7	2231,6	763,5	15:56:52	6076	2228,3	757,8
15:42:25	6077,8	2230,9	761,9	15:57:10	6090,8	2222,4	766,6
15:42:43	6079,3	2237,5	764,5	15:57:28	6002,6	2224,3	717,6
15:43:02	6078,1	2249,6	770,2	15:58:16	6002,1	2222,6	712,7
15:43:20	6079,2	2235	763,3	15:58:34	6003,3	2230,5	720
15:43:38	6077	2235	763	15:59:23	6003,9	2230,9	720,7
15:43:56	6076,1	2238,3	764	15:59:41	6005,7	2225,3	715,5
15:44:14	6157,3	2244,9	833,3	15:59:59	6006,2	2220,5	714,8
15:44:32	6163,7	2240,9	830,5	16:00:17	5992	2224,1	695,1
15:45:21	6162,9	2242,8	827,4	16:01:05	5921,5	2216,7	671,5
15:45:39	6163,3	2240,9	821,5	16:01:24	5910,7	2221	664,9
15:45:57	6162,8	2242,7	827,7	16:01:42	5922,5	2218,6	671
15:46:15	6167,3	2230,9	819,8	16:02:00	5919,8	2212	666
15:47:18	6255,5	2244,2	891,7	16:02:18	5920,3	2216	669,4
15:48:07	6255,2	2238,7	889,4	16:02:36	5921,9	2217,4	668,2
15:48:25	6256	2244,6	892,5	16:03:24	5885,2	2209,6	638,6
15:48:43	6255,5	2244,2	896	16:03:43	5834,7	2213,7	627,7
15:49:31	6350,7	2244,2	970,5	16:04:01	5839,4	2210,4	627,9
15:49:49	6350,1	2253,1	974,3	16:04:19	5839,5	2208,9	633,6
15:50:37	6349,7	2254,6	985	16:04:37	5840,3	2217,7	635,8
15:50:55	6349	2252	981,4	16:04:55	5757,9	2220	603,1
15:51:14	6349,5	2256,3	988	16:05:13	5756,4	2220,8	607,3
15:51:32	6349,2	2252,2	987,4	16:05:32	5756,4	2215,1	605,9
15:51:50	6348,9	2253,7	982,8	16:06:50	5756,5	2210,6	605,2
15:52:08	6257,3	2244,9	899,6	16:07:08	5836,6	2219,8	638,8
15:52:56	6263,5	2234,5	901,9	16:07:26	6003,1	2224,8	717,8
15:53:14	6172	2236,9	831,4	16:07:44	6090,7	2217,2	765,2

Графики зависимостей частоты, напряжения, активной и реактивной мощности от времени (полученные экспериментально), приведены на рис. 6.14-6.16).

При проведении активного эксперимента частота сети изменялась в очень узком диапазоне (49,96-50,03 Гц). Согласно п. 4.2.1 [65] отклонение частоты в синхронизированных системах электроснабжения не должно превышать $\pm 0,2$ Гц в течение 95 % времени интервала в одну неделю и $\pm 0,4$ Гц в течение 100 % времени интервала в одну неделю. Таким образом, отклонение частоты, полученные в результате выполнения активного эксперимента, не превышает предельных значений, регламентированных ГОСТом. Ниже приведена таблица и график зависимости частоты (рисунок 6.14) за время проведения активного эксперимента.

Таблица 6.3. Изменение частоты в исследуемой сети при проведении активного эксперимента

Время измерения	Частота, Гц	Время измерения	Частота, Гц	Время измерения	Частота, Гц
15:40:18	49,98	15:48:43	49,97	15:59:23	50,01
15:40:36	50,01	15:49:31	50,00	15:59:41	50,01
15:40:55	49,98	15:49:49	50,03	15:59:59	49,96
15:41:13	49,96	15:50:37	50,03	16:00:17	49,97
15:41:31	50,00	15:50:55	49,99	16:01:05	49,99
15:41:49	49,98	15:51:14	50,01	16:01:24	49,96
15:42:07	50,00	15:51:32	50,00	16:01:42	49,99
15:42:25	50,00	15:51:50	50,00	16:02:00	49,98
15:42:43	50,01	15:52:08	50,00	16:02:18	49,97
15:43:02	49,98	15:52:56	49,96	16:02:36	49,99
15:43:20	49,99	15:53:14	49,98	16:03:24	50,01
15:43:38	50,01	15:53:33	49,98	16:03:43	50,03
15:43:56	49,97	15:54:21	50,02	16:04:01	50,01
15:44:14	49,98	15:55:39	49,99	16:04:19	49,97
15:44:32	49,99	15:55:57	50,00	16:04:37	50,01
15:45:21	49,99	15:56:15	50,00	16:04:55	49,97
15:45:39	50,00	15:56:34	49,98	16:05:13	49,99
15:45:57	49,98	15:56:52	49,98	16:05:32	49,96
15:46:15	49,99	15:57:10	49,99	16:06:50	49,96
15:47:18	49,99	15:57:28	49,97	16:07:08	49,98
15:48:07	49,99	15:58:16	49,97	16:07:26	49,97
15:48:25	49,99	15:58:34	49,98	16:07:44	49,96

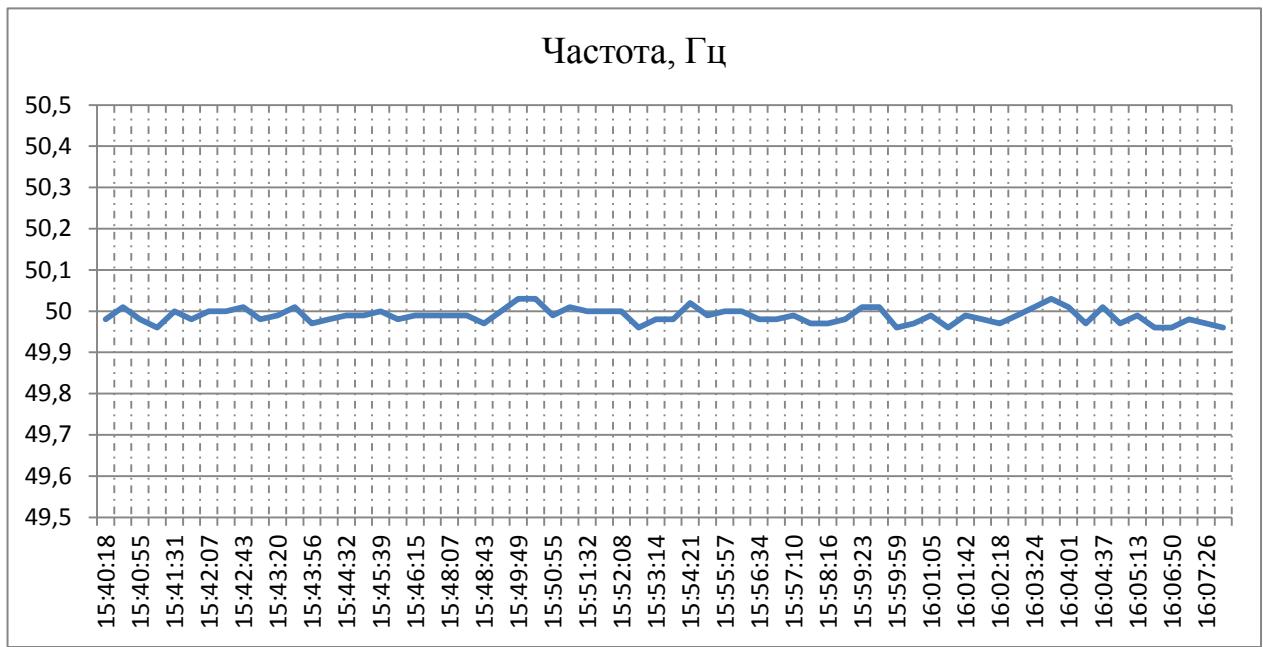


Рисунок 6.14 – График зависимости частоты сети за время проведения активного эксперимента

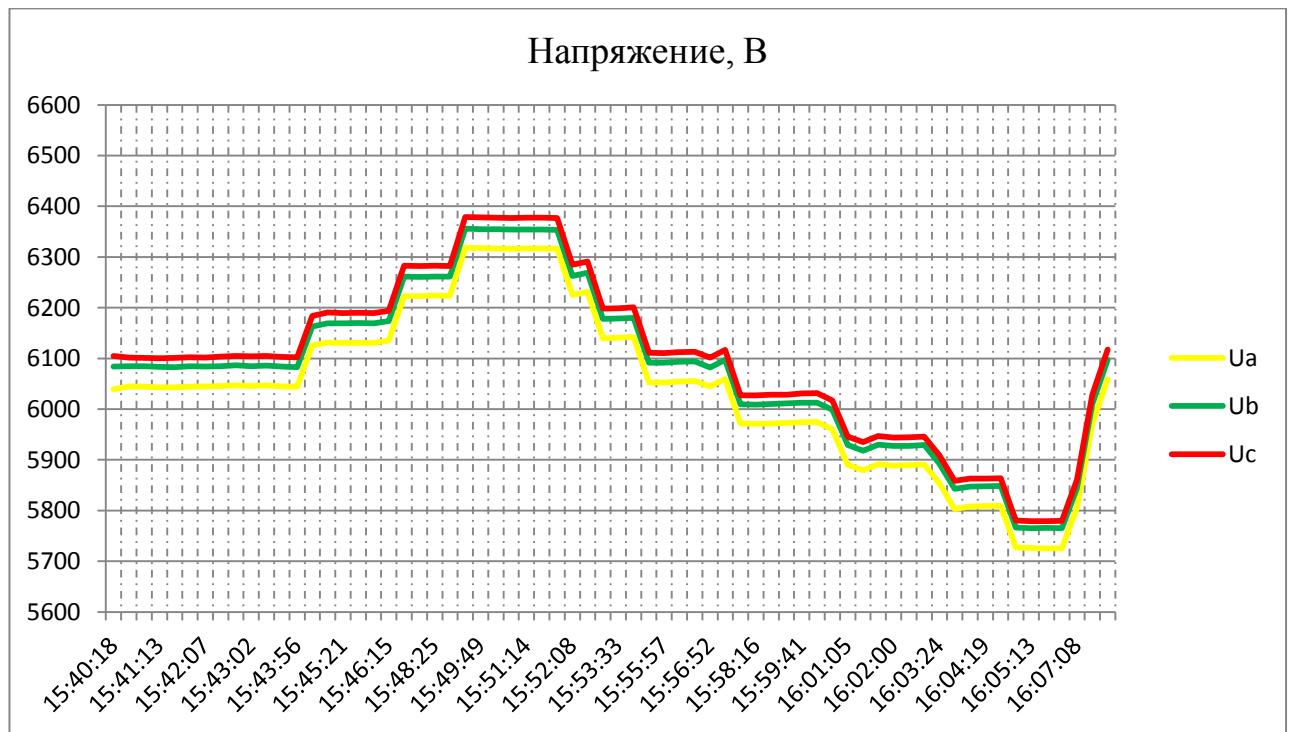


Рисунок 6.15 – Зависимость $U=f(t)$

Зависимости активной и реактивной мощности от напряжения $P=f(U)$ и $Q=f(U)$ представлены на рисунке 6.16

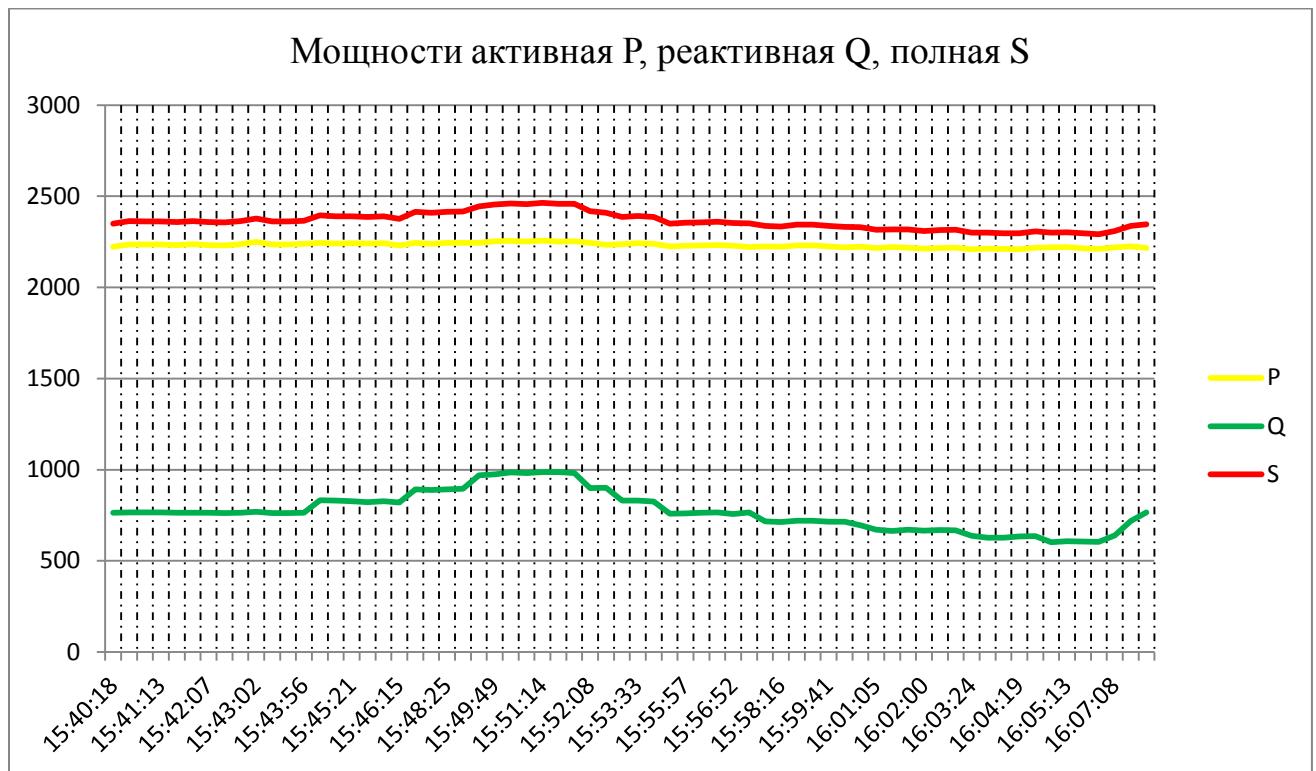


Рисунок 6.16 – График электрических нагрузок ПС № 358 (зависимости $P=f(t)$, $Q=f(t)$, $S=f(t)$)

Для построения статических характеристик узла нагрузки, необходимо экспериментально полученные величины перевести в относительные единицы. За базисное значение напряжения принималось напряжение наиболее близкое к номинальному значению. За базисное значение активной и реактивной мощности принимались значение мощностей, соответствующих базисному напряжению.

$$U^* = \frac{U_1}{U_6}, \quad P^* = \frac{P}{P_6}, \quad Q^* = \frac{Q}{Q_6}, \quad (6.13)$$

где $U_6=6002,1$ В, $P_6=2222,6$ Вт, $Q_6=712,7$ вар.

Полученные таким образом данные представлены в таблице 6.4.

Таблица 6.4. Статические характеристики узла нагрузки

U^*	P^*	Q^*	U^*	P^*	Q^*
1,012	1,000	1,072	1,028	1,009	1,165
1,012	1,006	1,075	1,029	1,007	1,158
1,012	1,006	1,076	1,014	1,001	1,066

1,012	1,006	1,075	1,014	1,003	1,068
1,012	1,004	1,073	1,014	1,003	1,072
1,012	1,006	1,073	1,014	1,005	1,075
1,012	1,004	1,071	1,012	1,003	1,063
1,013	1,004	1,069	1,015	1,000	1,076
1,013	1,007	1,073	1,000	1,001	1,007
1,013	1,012	1,081	1,000	1,000	1,000
1,013	1,006	1,071	1,000	1,004	1,010
1,012	1,006	1,071	1,000	1,004	1,011
1,012	1,007	1,072	1,001	1,001	1,004
1,026	1,010	1,169	1,001	0,999	1,003
1,027	1,008	1,165	0,998	1,001	0,975
1,027	1,009	1,161	0,987	0,997	0,942
1,027	1,008	1,153	0,985	0,999	0,933
1,027	1,009	1,161	0,987	0,998	0,941
1,028	1,004	1,150	0,986	0,995	0,934
1,042	1,010	1,251	0,986	0,997	0,939
1,042	1,007	1,248	0,987	0,998	0,938
1,042	1,010	1,252	0,981	0,994	0,896
1,042	1,010	1,257	0,972	0,996	0,881
1,058	1,010	1,362	0,973	0,995	0,881
1,058	1,014	1,367	0,973	0,994	0,889
1,058	1,014	1,382	0,973	0,998	0,892
1,058	1,013	1,377	0,959	0,999	0,846
1,058	1,015	1,386	0,959	0,999	0,852
1,058	1,013	1,385	0,959	0,997	0,850
1,058	1,014	1,379	0,959	0,995	0,849
1,043	1,010	1,262	0,972	0,999	0,896
1,044	1,005	1,265	1,000	1,001	1,007
1,028	1,006	1,167	1,015	0,998	1,074

При проведении активного эксперимента исследователь непременно сталкивается с необходимостью учета того, что мощности P и Q зависят не только от изменения напряжения, но и от случайных колебаний нагрузки при выполнении измерений. Возникает задача, при обработке экспериментов «необходимо выделить первую составляющую и по возможности избавиться от второй» [167, с. 12]. Для решения указанной задачи существует множество подходов, но ни один не является универсальным. В работе [167] предложена методика, основанная на выделении соседних пар отсчетов с существенными

изменениями напряжения, дальнейшей процедуры фильтрации и выделения случайной составляющей [167, с. 18].

После получения значений в относительных единицах было выполнено построение графиков, используя 2 альтернативных инструмента: табличный процессор MS Excel и программный комплекс Mathcad. При построении графиков применялась экстраполяция и интерполяция данных, которые позволили выполнить графики в расширенных пределах ($0,7-1,2U_{\text{ном}}$). При проведении процедур интерполяции и экстраполяции активной мощности использовалась линейная функция, а при интерполяции и экстраполяции реактивной мощности – функция полинома второй степени.

Полученные зависимости представлены на рисунках 6.17–6.20.

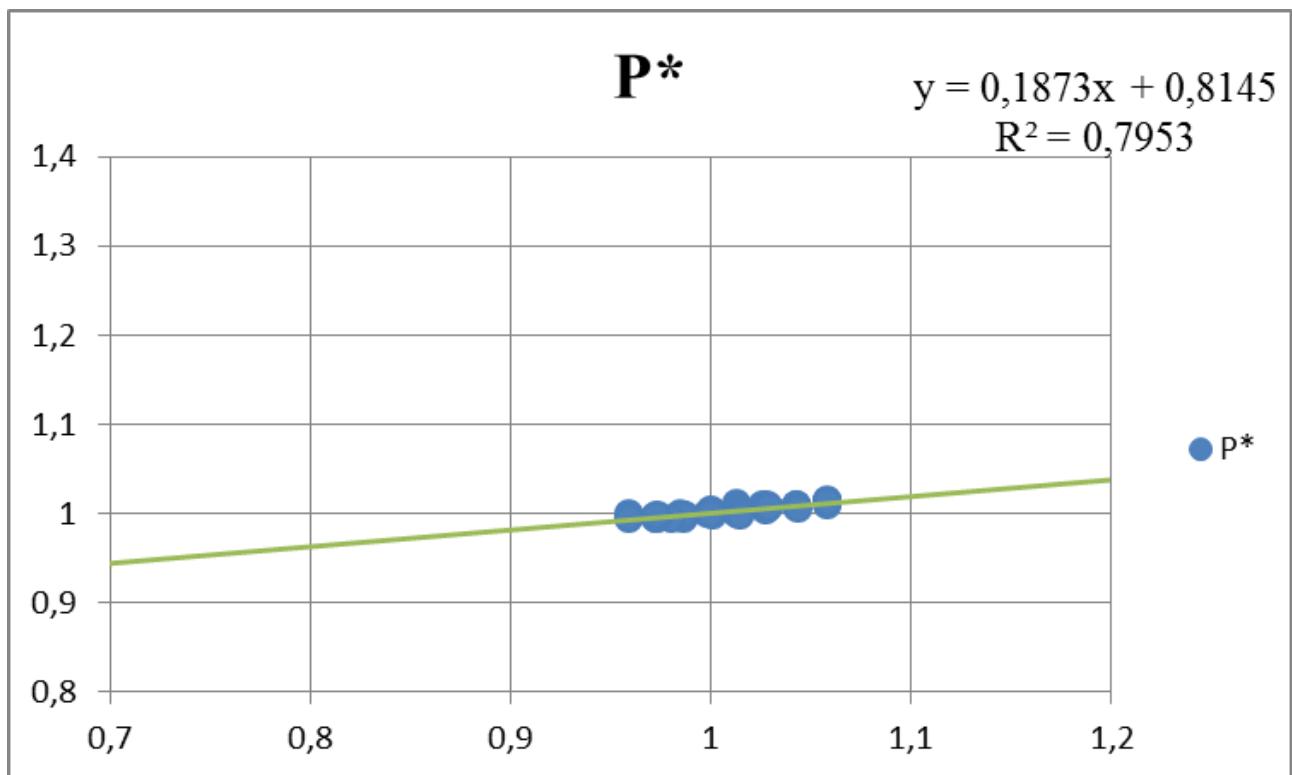


Рисунок 6.17 – Экстраполяция зависимости P(U)

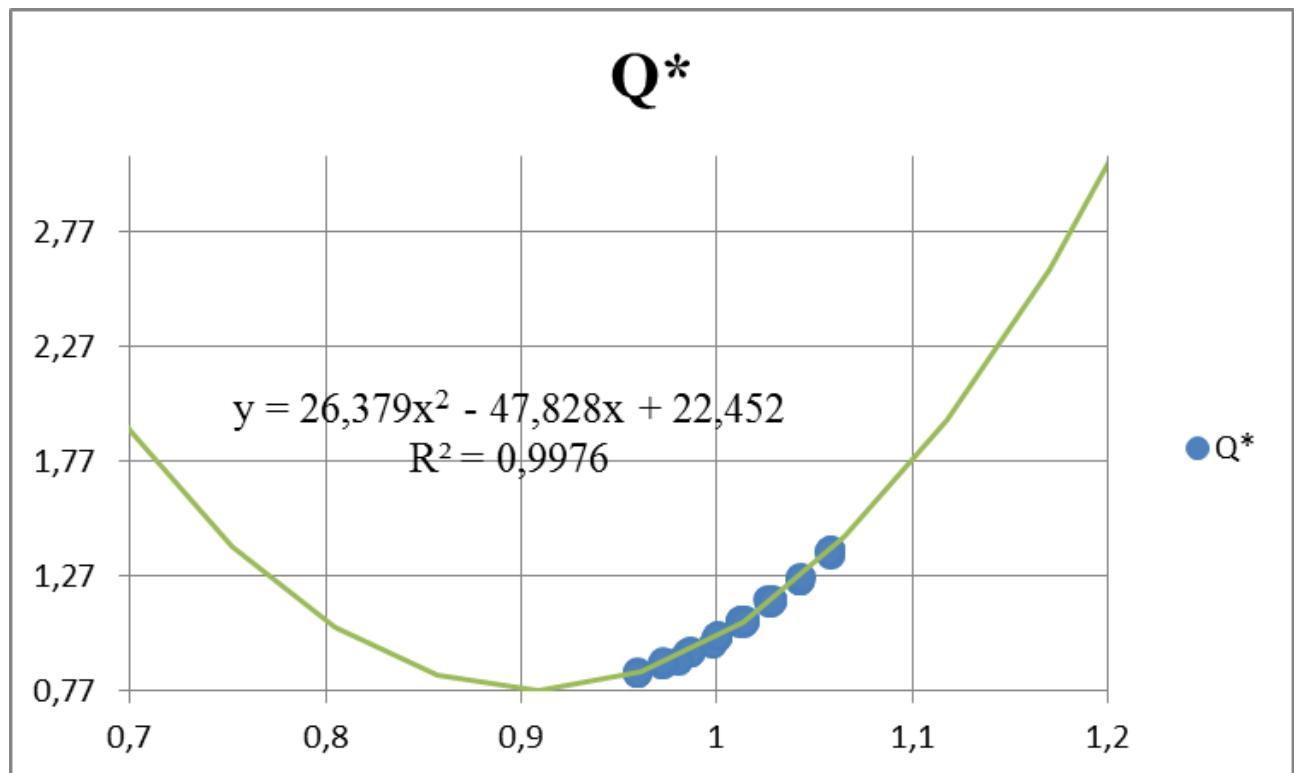


Рисунок 6.18 – Экстраполяция зависимости $Q(U)$

Регрессию активной мощности определим по формуле (6.14), а регрессию реактивной – по формуле (6.15)

$$P(U) = 0.2059 \cdot U + 0.7953 \quad (6.14)$$

$$Q(U) = 26.379 \cdot U^2 - 47.8276 \cdot U + 22.4518 \quad (6.15)$$

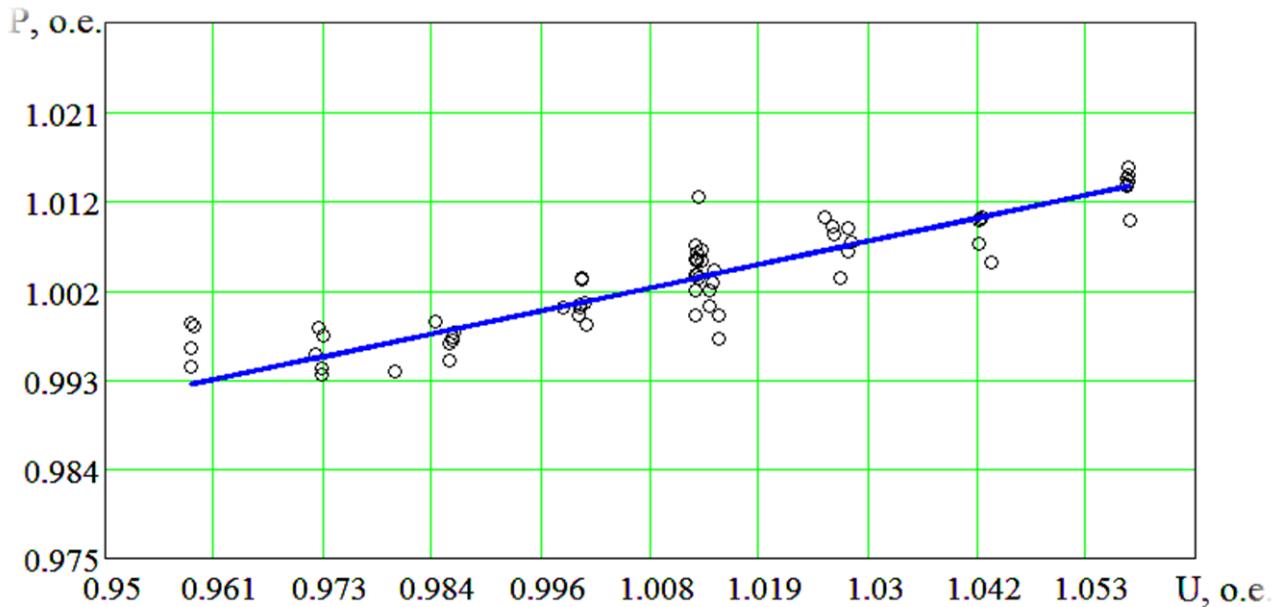


Рисунок 6.19 – Результат регрессии измерений активной мощности

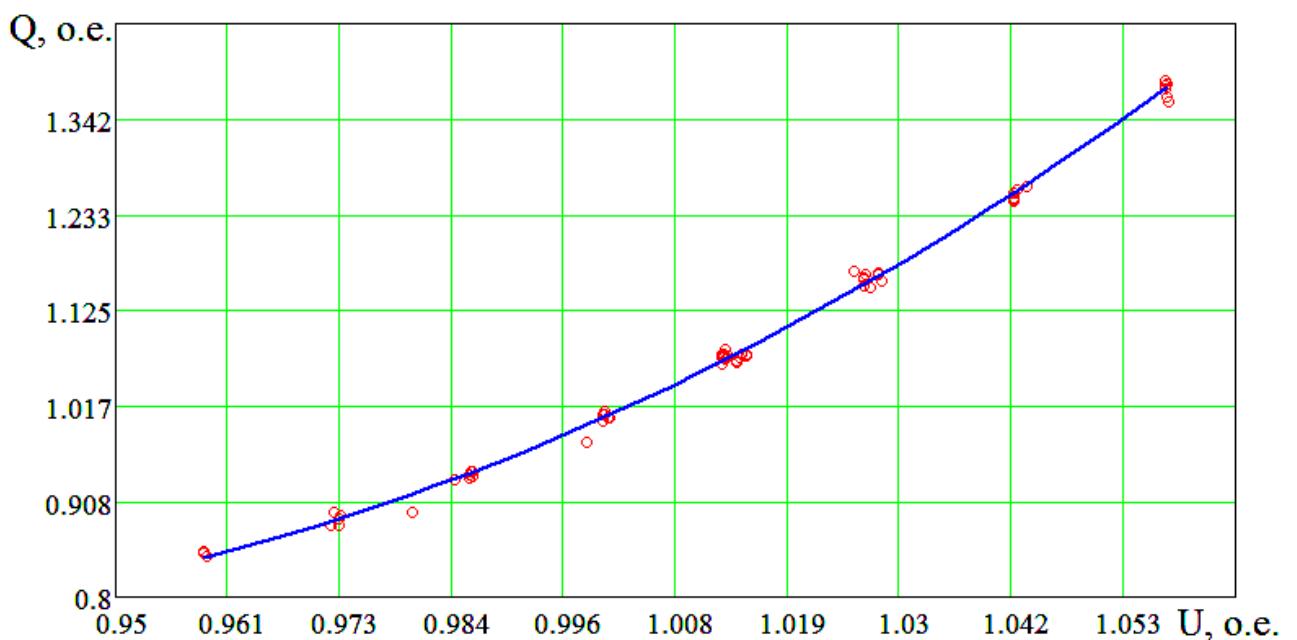
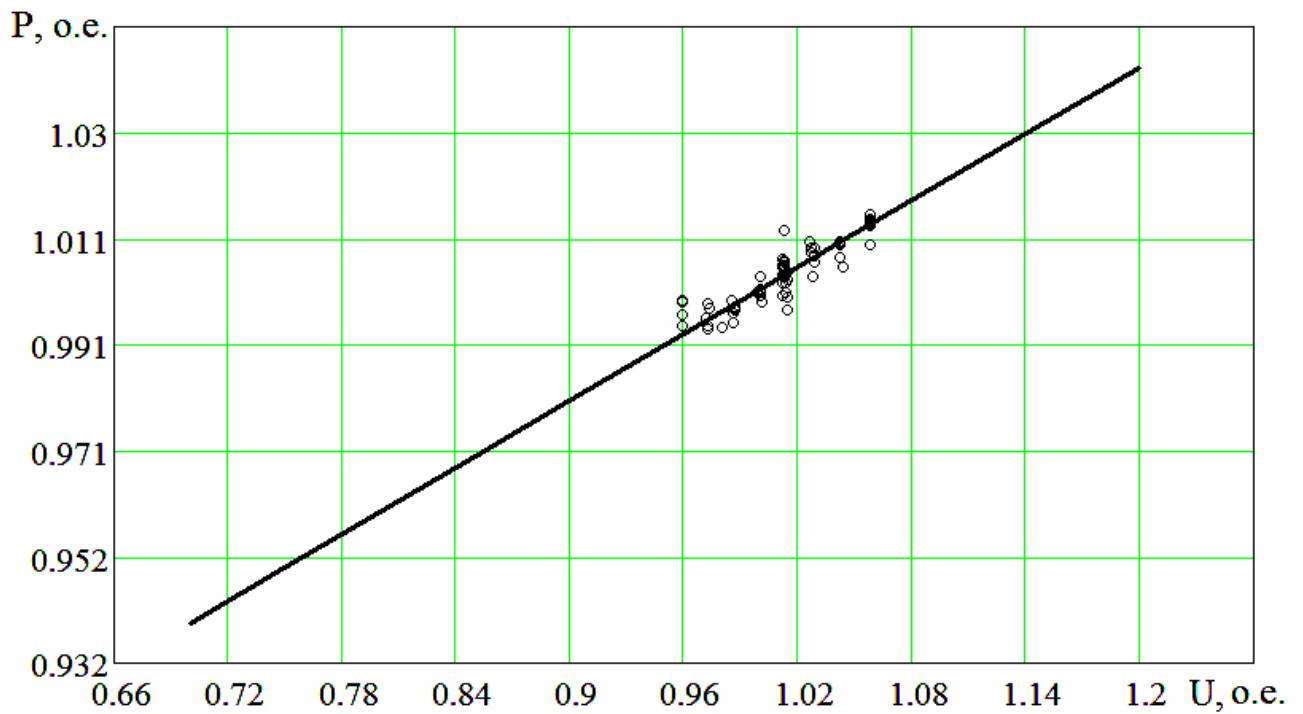


Рисунок 6.20. Результат регрессии измерений реактивной мощности

После расчета значений регрессии активной и реактивной мощностей определим значения корреляции:

- 1) Корреляция измеренных значений активной мощности и графика линейного тренда (составила $\chi^2 = 0,8918$).

2) Корреляция измеренных значений реактивной мощности и графика тренда полинома второй степени (составила $\chi^2 = 0,9988$).



$$s_y = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (y_t - \hat{y}_t)^2}{f}}, \quad (6.16)$$

где y_t, \hat{y}_t – соответственно фактическое и расчетное значение члена ряда;

f – число степеней свободы,

$f = n-m$, где m – число оцениваемых параметров, для прямой $m=2$, для параболы $m=3$; n – число наблюдений.

Доверительный интервал прогноза определяется как

$$\hat{y}_{i+L} \pm t_\alpha \cdot s_p, \quad (6.17)$$

где \hat{y}_{i+L} – предсказанное значение;

t_α – коэффициент Стьюдента;

s_p – среднеквадратичная ошибка прогноза линии тренда, $s_p = s_y \cdot K$.

Для линейного тренда значение K определяется по формуле (6.18)

$$K = \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{\left(\frac{n+2 \cdot L-1}{2}\right)^2}{\sum \left(t - \frac{n+1}{2}\right)^2}}, \quad (6.18)$$

где n – число наблюдений;

L – период упреждения

t – порядковый номер члена ряда измеренных значений.

Для полинома второй степени значение K определяется по более сложному выражению (6.19)

$$K = \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{n+2 \cdot L-1}{2}\right)^2 + \sum \left(t - \frac{n+1}{2}\right)^4 - \left(2 \cdot \sum \left(t - \frac{n+1}{2}\right)^2\right) \cdot \left(\frac{n+2 \cdot L-1}{2}\right)^2 + n \cdot \left(\frac{n+2 \cdot L-1}{2}\right)^4}{\sum \left(t - \frac{n+1}{2}\right)^2}} \quad (6.19)$$

Для вероятности $P=0.999$ и количестве измерений $n=66$, коэффициент Стьюдента будет равен $t_{\alpha} = 3,46$.

Определим среднеквадратическое отклонение от линии тренда для активной и реактивной мощности.

Для активной мощности:

$$s_y = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (P^* - P(U))^2}{66 - 2}} = 0,0027 \text{ о.е.}$$

Для реактивной мощности:

$$s_y = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (Q^* - Q(U))^2}{66 - 2}} = 0,0027$$

Графики доверительных интервалов прогноза активной и реактивной мощности представлены на рисунках 6.23 и 6.24.

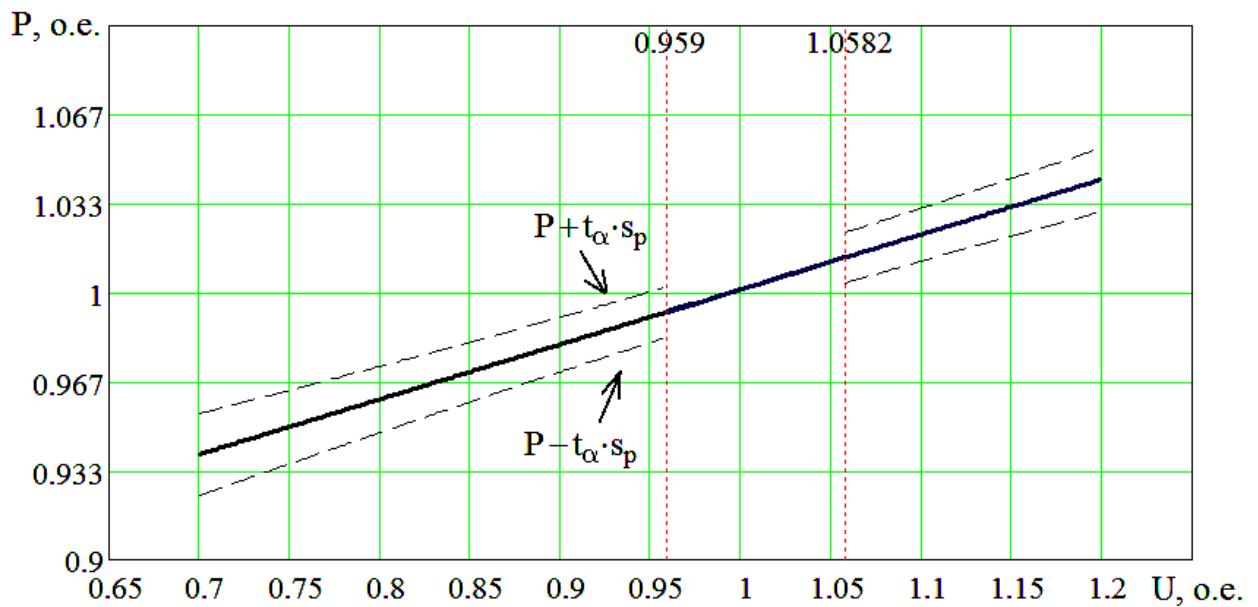


Рисунок 6.23 – Доверительные интервалы для прогноза активной мощности

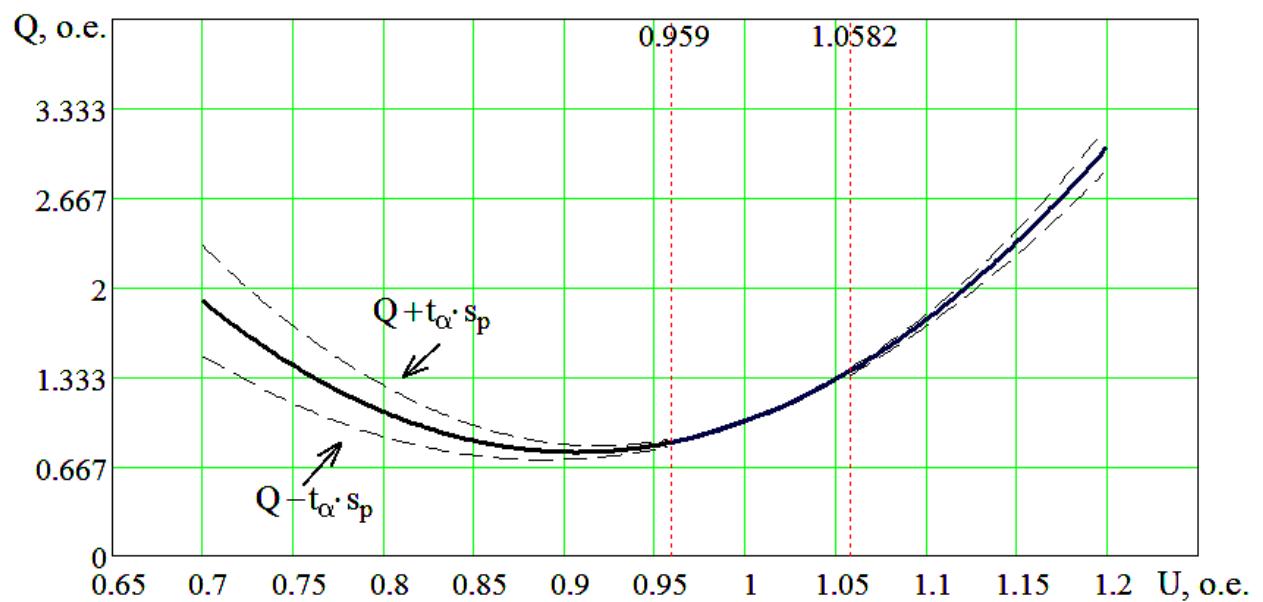


Рисунок 6.24 – Доверительные интервалы для прогноза реактивной мощности

В ходе активного эксперимента изменения состава потребителей не было, и в силу особенностей работы предприятия был выявлен режим его работы – однородный по времени технологический процесс производства с неизменной нагрузкой и малоизменяющимся режимом работы электрооборудования в течение всего промежутка времени при проведении активного эксперимента. Диапазон

изменения напряжения составил $[-4,06\% \quad +5,845\%]$. Значение частоты за период измерений составляло приблизительно 50 Гц. Данные активного эксперимента следует признать удовлетворительными для определения статических характеристик нагрузки по напряжению.

Расчет э.д.с. производим по формуле (6.20):

$$E = \sqrt{\left(U + \frac{Q \cdot X_{\text{ЭКВ}}}{U} \right)^2 + \left(P \cdot \frac{X_{\text{ЭКВ}}}{U} \right)^2}; \quad (6.20)$$

Рассчитываем ЭДС для первой точки

$$E_1 = \sqrt{\left(U_1 + \frac{Q_1 \cdot X_{\text{ЭКВ}}}{U_1} \right)^2 + \left(P_1 \cdot \frac{X_{\text{ЭКВ}}}{U_1} \right)^2} = \sqrt{\left(0,7 + \frac{1,898 \cdot 0,0959}{0,7} \right)^2 + \left(0,939 \cdot \frac{0,0959}{0,7} \right)^2} = 0,969 \text{ о.е.}$$

Шаг расчета принимаем равный 0,2 о.е.

Значения остальных точек сведены в таблицу 33.

Таблица 6.5. Зависимость активной, реактивной мощности и ЭДС от напряжения (в о.е.)

U, о.е.	P, о.е.	Q, о.е.	E, о.е.
0,7	1,898	0,939	0,969
0,72	1,691	0,944	0,954
0,74	1,504	0,948	0,943
0,76	1,339	0,952	0,937
0,78	1,195	0,956	0,934
0,8	1,072	0,96	0,936
0,82	0,97	0,964	0,94
0,84	0,889	0,968	0,948
0,86	0,83	0,972	0,959
0,88	0,791	0,977	0,972
0,9	0,774	0,981	0,988
0,92	0,777	0,985	1,006
0,94	0,802	0,989	1,027
0,96	0,848	0,993	1,049
0,98	0,915	0,997	1,074
1	1,003	1,001	1,1

1,02	1,112	1,005	1,129
1,04	1,242	1,01	1,158
1,06	1,394	1,014	1,19
1,08	1,566	1,018	1,222
1,1	1,76	1,022	1,257
1,12	1,974	1,026	1,292
1,14	2,21	1,03	1,329
1,16	2,467	1,034	1,367
1,18	2,745	1,038	1,406
1,2	3,044	1,042	1,446

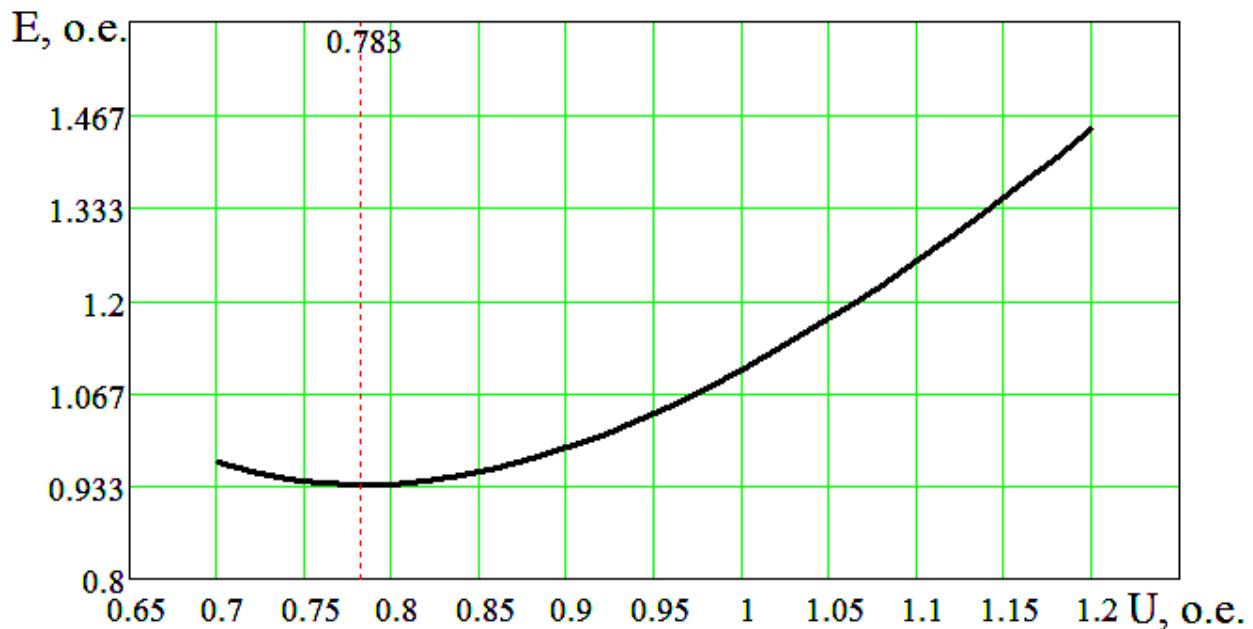


Рисунок 6.25 – Критическое напряжение

Согласно п. 6.1.1⁴ в качестве основного фактора, определяющего статическую устойчивость нагрузки, следует рассматривать наличие в составе комплексной нагрузки вращающихся машин – асинхронных и синхронных двигателей, что в определенных условиях может приводить к лавине напряжения (в тех случаях, когда лавина напряжения может иметь место, она возникает, если напряжение в узле понижается до значения U_{kp} , которое называется критическим). Такая неустойчивость проявляется, в первую очередь, в снижении напряжения на

⁴ Методические указания по определению устойчивости энергосистем. Часть II: РД 34.20.578-79. – М., 1979. – 87 с.

шинах узла нагрузки (до 30-60 % нормального рабочего напряжения), что приводит к нарушению электроснабжения всех потребителей данного узла.

Условия устойчивости нагрузки существенно зависят от характеристик узлов нагрузки энергосистемы и от параметров всей электрической системы в целом. Опасность возникновения лавины напряжения возрастает при увеличении суммарной мощности асинхронных двигателей в составе комплексной нагрузки, их загрузки, электрической удаленности узла от генерирующих источников. Нарушение статической устойчивости нагрузки может проявляться как в энергосистемах, содержащих длинные и относительно короткие, но сильно загруженные линии электропередачи, так и в концентрированных энергосистемах, характеризующихся малой удаленностью электрических станций от центров потребления.

Согласно п. 6.1.2⁴ расчеты устойчивости нагрузки следует проводить для определения запасов устойчивости в нормальных и послеаварийных режимах, а также проверки устойчивости послеаварийных режимов. Запас устойчивости (K_U) определяется в соответствии с соотношением (64)

$$K_U = \frac{U_0 - U_{kp}}{U_0} \cdot 100\%, \quad (6.21)$$

где U_0 - нормальное напряжение.

При выполнении процедуры обработки результатов измерений (при выполнении процедур интерполяции и экстраполяции экспериментальных данных, полученных при проведении активного эксперимента) в программном комплексе Mathcad были рассчитаны:

1) зависимости активной, реактивной мощности от напряжения в относительных единицах

2) критическое напряжение, превысив нижний предел которого нарушается статическая устойчивость нагрузки (происходит опрокидывание системы). Критическое напряжение составило 0,783 о.е.

Таким образом, коэффициент запаса по напряжению в относительных единицах исследуемом узле нагрузке на стороне 35 кВ равен:

$$K_U = \frac{U_{\text{ном}}^* - U_{\text{kp}}^*}{U_{\text{ном}}^*} = \frac{1,0 - 0,783}{1,0} = 0,217.$$

В процентах $K_U=21,7\%$.

6.3 Методика анализа резонансных перенапряжений в узлах нагрузки на основе вейвлет преобразования

При наличии в системе электроснабжения источников ВГ и батарей статических конденсаторов (БСК), могут возникнуть опасные резонансные перенапряжения, и велика вероятность перегрузки БСК токами ВГ [40, с. 45]. Для схем электроснабжения заводов или крупных энергетических объектов для оценки токов ВГ через БСК необходимо провести предварительное эквивалентирование схемы замещения. В работе [23] авторы исследуют три метода эквивалентирования электрической сети и приходят к выводу, что «наиболее эффективный метод, основанный на методе моментов» [23, с. 34] максимальная погрешность при наличии ВГ составила 3,4%. Активная и реактивная мощность нагрузки методе моментов рассчитывается по формуле [23]:

$$P_{\mathcal{O}_m} = \sum_{m=1}^M P_{im}; \quad P_{\mathcal{O}_n} = \sum_{m=1}^M P_{in}; \quad Q_{\mathcal{O}_m} = \sum_{m=1}^M Q_{im}; \quad Q_{\mathcal{O}_n} = \sum_{m=1}^M Q_{in} \quad (6.22)$$

где P_{im} , Q_{im} - активная и реактивная мощность i -го присоединения ветви среднего напряжения; P_{in} , Q_{in} - активная и реактивная мощность i -го присоединения ветви низкого напряжения.

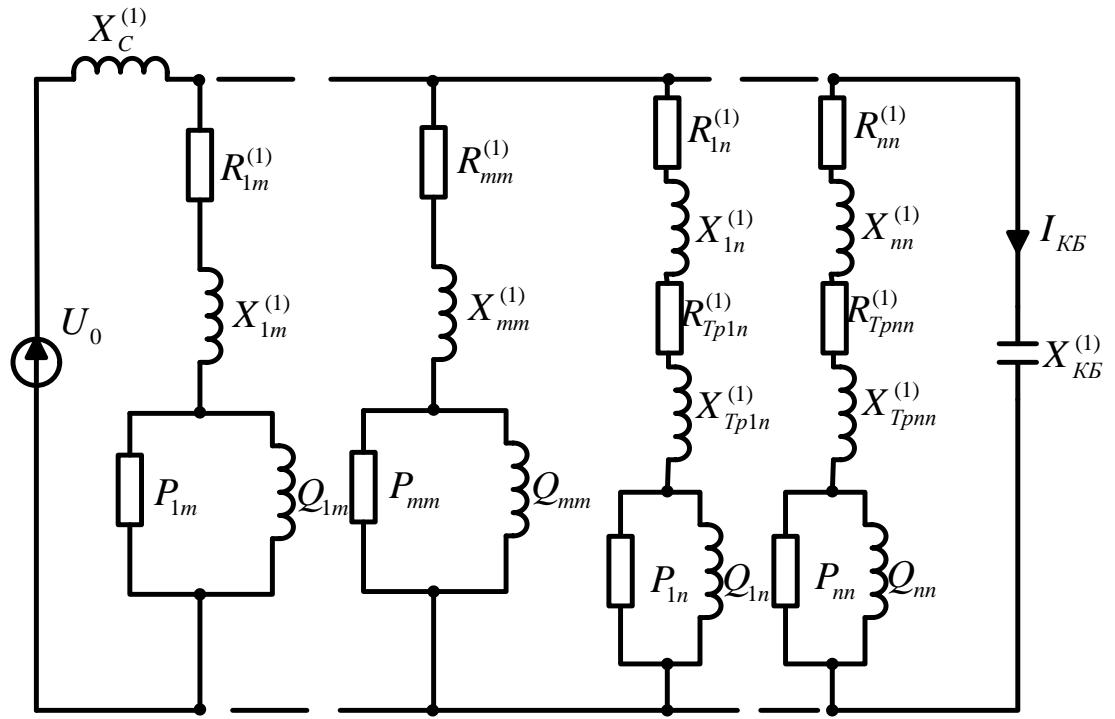


Рисунок 6.26 – Схема замещения для оценки методов эквивалентирования (привод. по [23, с. 32]

Параметры сети на первой гармонике рассчитываются по следующей формуле [23, с. 33]:

$$R_{\vartheta_m}^{(1)} = \frac{\sum_{i=1}^N S_i R_i^{(1)}}{\sum_{i=1}^N S_i}, \quad X_{\vartheta_m}^{(1)} = \frac{\sum_{i=1}^N S_i X_i^{(1)}}{\sum_{i=1}^N S_i}. \quad (6.23)$$

Резонанс напряжений, как замечает И. В. Жежеленко [83, с. 166] не несет угрозы БСК, поскольку напряжение гармоники n -го порядка при резонансе не превышает 2-3% от номинального.

При коммутации БСК из-за резонанса может возникать т.н. осциллирующая помеха – кратковременное двухполярное изменение напряжения и (или) тока в линии электропередачи [128, с. 44]

Для систем тягового электроснабжения характерны существенные уровни несинусоидальности, в результате чего задача прогнозирования возможных перегрузок и выхода из строя источников реактивной мощности имеет большую

практическую значимость [89]. С применением программы Fazonord было произведено моделирование несинусоидальных режимов и определены коэффициенты перегрузки БСК токами ВГ [89, с. 73]:

$$k_p = \frac{1}{I_{\text{ном}}} \sqrt{\sum_{k=1}^{40} (I_k)^2}. \quad (6.24)$$

Известно, что в системах со ступенчатым регулированием БСК (уровней компенсации) изменяется значение резонансной частоты. Авторы статьи [148] на основании численного эксперимента, при варьировании мощности БСК от 12,5 квр до 112,5 квр, для рассматриваемой системы электроснабжения фиксируют резонансные частоты, возникающие последовательно на частотах от 9 до 29 гармоники. В статье [145] представлена программная реализация алгоритма расчета несинусоидальных режимов, позволяющая в числе прочих задач определять резонансную частоту в системе электроснабжения для различных ступеней компенсации БСК. В статье [187] рассмотрен узел нагрузок, содержащий источник гармоник, БСК и эквивалентный электродвигатель для исследования резонансных частот при изменении уровня компенсации. На основании приведенных данных [187, с. 152] резонанс наблюдался в диапазоне частот от 71 Гц до 320 Гц. В работе [209] представлена программная реализация алгоритма расчета резонансных частот в системе электроснабжения при вариации длины питающих линий и сопротивлении системы. С помощью разработанной программы были определены резонансные частоты для сетей 110-220 кВ [209, с. 153].

В статье [251] для анализа узлов сети 110 кВ, где могут возникнуть превышения уровней несинусоидальности напряжения, либо возникнуть перенапряжения, обусловленные резонансами, рекомендуется применять метод гармонической чувствительности (в англ. оригинале Harmonic sensitivity). В России появляются научные разработки, связанные с применением данного метода (коллектив МЭИ – Тульский В.Н., Чембисова Н.Ш., Баранов И.Л.). Для

системы электроснабжения предприятия нефтедобывающей отрасли в статье [186] был произведен анализ резонансных режимов с оценкой возможных уровней перенапряжений на ВГ, генерируемых станциями управления погружными электродвигателями.

В работе [228] на основе экспериментальных данных был получен спектральный состав напряжений на шинах 10 кВ металлургического предприятия. В статье произведена оценка частотной характеристики сети, в результате чего авторы отмечают, что для действующего предприятия существует сложность выявления резонансных явлений. Причиной тому служат периодические изменения схемы электроснабжения за счет оперативных переключений [228, с. 102].

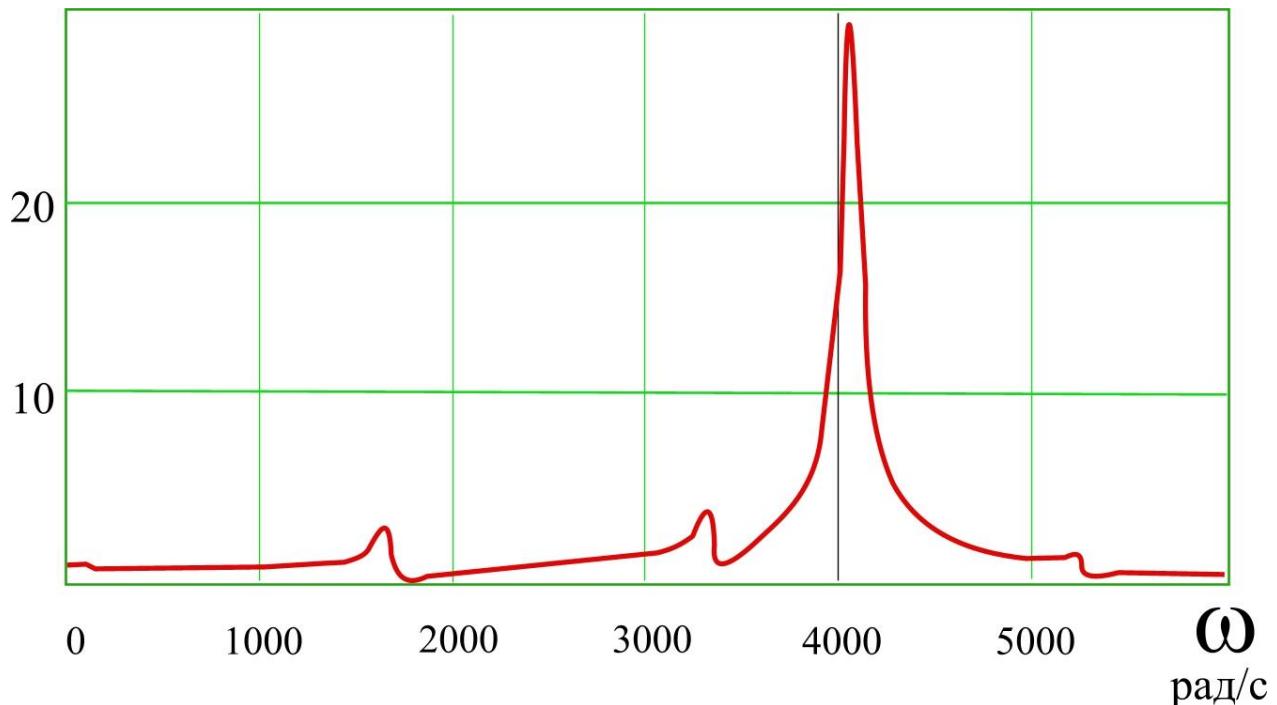


Рисунок 6.27 – Кратность перенапряжений на шинах 35 кВ

Максимальная кратность перенапряжения на классе напряжения 35 кВ составила 2,905 при частоте приблизительно в 638 Гц (13 гармоника питающей сети). Также на графике заметны пики на частотах приблизительно в 258 Гц (5 гармоника), 527 Гц (11 гармоника), 844 Гц (17 гармоника).

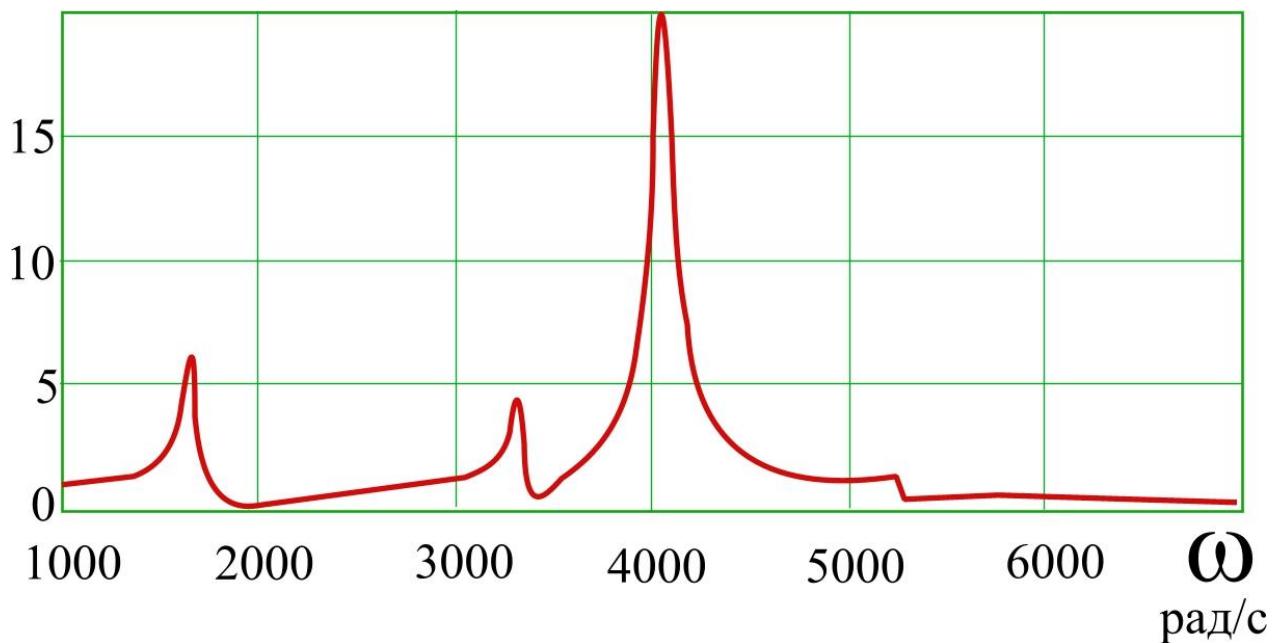


Рисунок 6.28 – Кратность перенапряжений на шинах 6 кВ

Максимальная кратность перенапряжения на классе напряжения 6 кВ составила 2,1 при частоте приблизительно в 638 Гц (13 гармоника питающей сети). Также на графике заметны пики на частотах приблизительно в 527 Гц (11 гармоника), 844 Гц (17 гармоника).

Вейвлет преобразование позволяет окончательно определить риски перенапряжений в узлах электрической сети, поскольку представляет информацию не только о частотах высших гармоник, но и о длительности (времени) присутствия этих частот.

6.4 Основные результаты и выводы

1. Разработаны теоретические положения анализа динамической устойчивости узла нагрузок при наличии нелинейной нагрузки, искажающей синусоидальность формы кривой напряжения и тока. 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.

2. Представлены результаты проведения активного эксперимента по определению статических характеристик нагрузки на подстанции предприятия нефтедобывающей отрасли.

3. Представлена методика анализа резонансных режимов с применением вейвлет преобразования. 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 апериодических (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 (D_1, D_2) 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) установившихся 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 предложенный метод позволяет определить активную, реактивную мощность 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 °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 $K_l \geq 70\%$ 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 внедрения 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, локализующих 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, увеличиваются 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.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ (АББРЕВИАТУР)

АД – асинхронный двигатель

АРВ – автоматическое регулирование возбуждения

АСКУЭ – автоматизированная система коммерческого учета электроэнергии

БГТУ – Белгородский государственный технический университет

БСК – батарея статических конденсаторов

ВГ – высшие гармоники

ВП – вейвлет преобразование

ДГР – дугогасящий реактор

ИГ – интергармоники

ИрГУПС – Иркутский государственный университет путей сообщения

ЛГТУ – Липецкий государственный технический университет

МЭК – международная энергетическая комиссия

НГТУ – Новосибирский государственный технический университет

ОЗЗ – однофазное замыкание на землю

ОПФ – оконное преобразование Фурье

ПКЭ – показатели качества электроэнергии

ПФ – преобразование Фурье

СПбГУ – Санкт-Петербургский горный университет

СФУ – Сибирский Федеральный университет

СХН – статические характеристики нагрузки

СЭС – система электроснабжения

ТПУ – Томский политехнический университет

ЭЭС – электроэнергетическая система

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аббакумов, А. А. Разработка методики и алгоритмов идентификации отклонений от нормативов параметров качества электроэнергии в системах электроснабжения: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18 / Аббакумов Андрей Александрович. – Саранск: Мордовский гос. ун-т им. Н.П. Огарева, 2005. – 180 с.
2. Абдуллазянов, Р. Э. Методика обнаружения места повреждения при однофазных замыканиях на землю в распределительных электрических сетях напряжением 6–35 кВ по их частотным характеристикам: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Абдуллазянов Рустем Эдвардович. – Казань: Казанский гос. энергетический университет, 2013. – 183 с.
3. Абдуллин, Л. И. Раннее выявление замыканий на землю по параметрам напряжения на приемных подстанциях / Л. И. Абдуллин // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2013. – № 11-12. – С. 133-136.
4. Абрамович, Б. Н. Оценка эффективности гибридного электротехнического комплекса для коррекции уровня несинусоидальности в автономных системах электроснабжения нефтепромыслов / Б. Н. Абрамович, Ю. А. Сычев, Р. Ю. Зимин // Промышленная энергетика. – 2018. – № 1. – С. 45-54.
5. Абрамович, Б. Н. Оценка эффективности гибридных систем коррекции формы кривых тока и напряжения в электрических сетях с распределенной генерацией / Б. Н. Абрамович, Ю. А. Сычев, Р. Ю. Зимин // Промышленная энергетика. – 2015. – № 8. – С. 49-53.
6. Авербух, М. А. Влияние нелинейной и несимметричной нагрузки на систему электроснабжения жилых микрорайонов / М. А. Авербух, Е. В. Жилин // Промышленная энергетика. – 2017. – № 12. – С. 40-45.
7. Авербух, М. А. Статистическая оценка коэффициентов, характеризующих несинусоидальность и несимметрию питающего напряжения в системах электроснабжения ИЖС / М. А. Авербух, Е. В. Жилин, Е. Ю. Сизганова

// Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2017. – т. 10. № 8. – С. 1079-1087.

8. Авербух, М. А. Экспериментальная оценка параметров режимов в высоковольтных рудничных сетях с мощными нелинейными электроприёмниками / М. А. Авербух, Д. А. Прасол, С. В. Хворостенко // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2017. – т. 21, № 2(121). – С. 75-84.

9. Авербух, М. А. Экспериментальная оценка уровня высших гармоник в системе электроснабжения трубогибочного стана УЗТМ-465 / М. А. Авербух, Д. Н. Коржов, Д. С. Лимаров // Промышленная энергетика. – 2015. – № 1. – С. 48-53.

10. Авербух, М. А. Экспериментальное исследование несинусоидальных режимов цеховой системы электроснабжения при динамическом вибрационном формировании бетонных смесей / М. А. Авербух, Д. А. Прасол, С. В. Хворостенко // Электротехнические системы и комплексы. – 2017. – № 1 (34). – С. 24-30.

11. Агунов, А. В. Управление качеством электроэнергии при несинусоидальных режимах / А.В. Агунов. – СПб.: СПбГМТУ, 2009. – 134 с.

12. Адаптивные токовые защиты от замыканий на землю в кабельных сетях 6 – 10 кВ / В. А. Шuin [и др.] // Электрические станции. – 2018. – № 7. – С. 38-45.

13. Акимжанов, Т. Б. Исказения синусоидальности и несимметрия напряжений в электрических сетях 110 кВ Сибири и Юга России / Т. Б. Акимжанов, В. Я. Ушаков, Н. Н. Харлов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2014. – № 1-2. – С. 67-73

14. Аксёнов, К. В. Фильтрация цифровых сигналов в режиме непрерывного поступления данных / К. В. Аксёнов, В. П. Алексеев // Компьютерные исследования и моделирование. – 2012. – т. 4, № 1. – С. 55-61.

15. Алексеев, В. П. Цифровая фильтрация сигналов на основе быстрого вейвлет преобразования / В. П. Алексеев, К. В Аксёнов // Вестник Поморского университета. Серия: Естественные науки. – 2011. – № 2. – С. 84-89.

- 16.** Алферов, И. В. Влияние конденсаторных установок на перетоки мощности высших гармоник в автономной энергосистеме / И. В. Алферов, В. М. Зырянов, Н. А. Митрофанов // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – т. 22 № 8. – С. 95-103. DOI: 10.21285/1814 3520-2018-8-95-103
- 17.** Анализ влияния нелинейной однофазной нагрузки на значение тока в нулевом проводе / Г. Я. Вагин [и др.] // Промышленная энергетика. – 2013. – № 12. – С. 17-19.
- 18.** Анализ дополнительных потерь от высших гармоник в сетях 380 В с помощью алгоритмов пакетного вейвлет преобразования / Д. С. Осипов [и др.] // Омский научный вестник. – 2018. – № 6 (162). – С.–.
- 19.** Анализ качества электроэнергии в городских распределительных сетях 0,4 кВ / С. А. Темербаев [и др.] // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2013. – т. 6, № 1. – С. 107-120.
- 20.** Анализ режима однофазного замыкания на землю в сетях с комбинированным заземлением нейтрали с помощью вейвлет преобразования / Д. С. Осипов [и др.] // Омский научный вестник. – 2018. – № 5 (161). – С.–.
- 21.** Анализ результатов моделирования распределения высших гармоник тока в электрических сетях Республики Таджикистан / В. Н. Тульский [и др.] // Энергетик. – 2018. – № 7. – С. 44-50.
- 22.** Антонов, В. И. Теория и приложения адаптивного структурного анализа сигналов в интеллектуальной электроэнергетике: дис. ... докт. техн. наук: 05.14.02 / Антонов Владислав Иванович. – Чебоксары: Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова, 2018. – 330 с.
- 23.** Анхель Оскар Колумбия Наварро Эквивалентирование электрической сети при наличии высших гармоник / Анхель Оскар Колумбия Наварро, Я. Э. Шклярский, А. Н. Скамын // Записки Горного института. – 2015. – т. 213. – С. 31-35.
- 24.** Артюхов, И. И. Качество электроэнергии в системах электроснабжения котельных и центральных тепловых пунктов при оснащении

насосов частотно-регулируемым электроприводом / И. И. Артюхов, С. В. Молот // Градостроительство и архитектура. – 2017. – Т. 7, №1 (26). – С. 138-144.

25. Астафьева, Н. М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения / Н.М. Астафьева // УФН. – 1996. – т. 166, № 11.– С. 1145-1170.

26. Аюурзана, Э. Экспериментальное исследование эффективности работы дугогасящих реакторов в Улан-Баторских городских электрических сетях 6–10 кВ / Э. Аюурзана, М. И. Петров, А. А. Кузьмин // Вестник Чувашского университета. – 2016. – № 1. – С. 30-38.

27. Бараненко, Т. К. Разработка методов расчета интергармоник напряжения и тока в электрических сетях с электротехнологическими установками и непосредственными преобразователями частоты: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Бараненко Татьяна Константиновна. – Мариуполь: Приазовский государственный технический университет, 2003. – 198 с.

28. Белицкий, А. А. Оценка добавочных потерь мощности в электрических сетях с нелинейной и несимметричной нагрузкой / А. А. Белицкий, Я. Э. Шклярский // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – № 7. – С. 86-93.

29. Белицын, И. В. Алгоритм анализа временных рядов на основе вейвлет-технологий для мониторинга показателей качества электрической энергии / И. В. Белицын, С. О. // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2017. – № 3-4. – С. 184-187.

30. Белицын, И. В. Разработка структуры автоматизированной системы для анализа показателей качества электроэнергии / И. В. Белицын, С. О. Хомутов, Е.А. Котугин // // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2017. – № 3-4. – С. 181-184.

31. Билоус, О. А. Математическое моделирование влияния работы непосредственного преобразователя частоты на сеть электроснабжения / О. А. Билоус, Э. Б. Сагизов // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2013. – №8. – С. 106-113.

- 32.** Блаттер, К. Вейвлет-анализ. Основы теории. / К. Блаттер; пер. с нем. Т.Э. Кренкеля под ред. А. Г. Кюркчана. – М.: Техносфера, 2004. – 280 с.
- 33.** Борковский, С. О. Проблема диагностики однофазных замыканий на землю в сетях с малыми токами замыкания на землю / С. О. Борковский, Т. С. Горева, Т. И. Горева // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 9-5. – С. 954-959.
- 34.** Боровиков, В. С. О необходимости включения добавочных потерь от высших гармоник тока в технологические потери при передаче электрической энергии / В. С. Боровиков, Н. Н. Харлов, Т. Б. Акимжанов // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – т. 322, № 4. – С. 91-93.
- 35.** Боярская, Н. П. Влияние светодиодных источников света на спектры токов и напряжений питающей сети / Н. П. Боярская, В. П. Довгун // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2014. – № 3 (90). С. 195-199.
- 36.** Булатов, Ю. Н. Влияние нелинейной и несимметричной нагрузки на работу генераторов установок распределенной генерации / Ю. Н. Булатов, А. В. Крюков // Системы. Методы. Технологии. – 2017. – № 3 (35). – С. 40-49.
- 37.** Булатов, Ю. Н. Применение вейвлет-преобразования и генетических алгоритмов для настройки автоматических регуляторов установок распределённой генерации / Ю. Н. Булатов, А. В. Крюков // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2016. – № 2 (63). – С. 7-22.
- 38.** Бушуев, В. В. Основные положения стратегического направления развития электросетевого комплекса России / В. В. Бушуев // Энергетик. – 2018. – № 6. – С. 12-14.
- 39.** Бушуева, О. А. Анализ качества электроэнергии в системе электроснабжения группы потребителей / О. А. Бушуева, Н. С. Иванова // Промышленная энергетика. – 2017. – № 11. – С. 58-64.

- 40.** Вагин, Г. Я. К вопросу о нормировании несинусоидальности напряжения в ущербах от высших гармоник / Г. Я. Вагни, С. Н. Юртаев // Промышленная энергетика. – 2017. – № 1. – С. 43-47.
- 41.** Вибрационный аспект гармонического воздействия на электромеханические преобразователи / В. Г. Сальников [и др.] // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2016. – № 3-4. – С. 129-135.
- 42.** Винокурова, Т. Ю. Математическая модель для оценки минимального уровня высших гармоник в токе однофазного замыкания на землю в компенсированных сетях 6–10 кВ / Т. Ю. Винокурова, Е. С. Шагурина, В. А. Шuin // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2013. – № 6. – С. 35-41.
- 43.** Винокурова, Т. Ю. Методика выбора параметров срабатывания максимальных токовых защит от замыкания на землю на основе высших гармоник в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ / Т. Ю. Винокурова, Е. С. Шагурина, В. А. Шuin // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2015. – № 3. – С. 20-28.
- 44.** Вихарев, А. П. Тепловой расчёт защищённых проводов для воздушных линий электропередачи / А. П. Вихарев // Энергетик. – 2017. – № 1. – С. 40-41.
- 45.** Влияние высших гармоник тока на режимы работы кабелей распределительной сети 380 В / В. Н. Тульский [и др.] // Промышленная энергетика. – 2013. – № 5. – С. 39-44.
- 46.** Влияние параллельно работающих фидеров на «резонансные частоты» воздушной линии при однофазном замыкании на землю / Л. И. Абдуллин [и др.] // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2018. – т. 20, № 1-2. – С. 54-61.
- 47.** Влияние режимов работы автотрансформаторов на качество электроэнергии / Ю. В. Шаров [и др.] // Электричество. – 2014. – № 6. – С. 10-18.

48. Влияние современного оборудования жилых и офисных комплексов на качество электроэнергии / И. Г. Буре [и др.] // Энергетик. – 2017. – № 1. – С. 42-46.

49. Волошко, А. В. К вопросу мониторинга качества электрической энергии / А. В. Волошко, А. Л. Харчук // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – т. 326. № 3. – С. 76-85.

50. Волошко, А. В. К вопросу определения источника гармоник на примере упрощенной модели системы электроснабжения / А. В. Волошко, Д. В. Филянин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – т. 326, № 6. – С. 114-121.

51. Воскобойников, Ю.Е. Вейвлет-фильтрации сигналов и изображений (с примерами в пакете MathCAD): монография / Ю.Е. Воскобойников. Новосибирск: Новосиб. гос. архитектур.-строит. ун-т (Сибстрин), 2015. – 188 с.

52. Выбор воздействующей величины цифровых токовых защит от однофазных замыканий на землю в кабельных сетях среднего напряжения / М. С. Аль-Хомиди [и др.] // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2015. – № 2. – С. 21-29.

53. Галанов, В. П. О влиянии нелинейных и несимметричных нагрузок на качество электрической энергии / В.П. Галанов, В.В. Галанов // Промышленная энергетика. – 2001. – № 3. – С. 46-49.

54. Гапиров, Р. А. Разработка методики расчета нестационарных тепловых процессов при несинусоидальных режимах систем электроснабжения / Р. А. Гапиров, Д. С. Осипов, Е. Н. Еремин // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2014. – № 1. – С. 35-40.

55. Гапиров, Р. А. Расчет потерь мощности в элементах системы электроснабжения с учетом высших гармоник и зависимости сопротивлений токоведущих частей от температуры / Р. А. Гапиров, Д. С. Осипов // Промышленная энергетика. – 2015. – № 1. – С. 16-21.

56. Глотов, А. А Концепция повышения качества функционирования несимметричных систем электроснабжения общего назначения при гармоническом воздействии / А. А. Глотов, Ю. М. Денчик, В. Г. Сальников // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2017. – № 3-4. – С. 172-175.

57. Горева, Т. С. Метод анализа импульсных помех в системах электроснабжения с идентификацией структурных компонент в ортогональном вейвлет-базисе / Т. С. Горева, С. Е. Кузнецов, Н. Н. Портнягин // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. – 2011. – № 2 (3). – С. 50-57.

58. Горева, Т. С. Моделирование процесса локализации просечек напряжения на основе вейвлет-преобразования / Т. С. Горева, С. Е. Кузнецов, Н. Н. Портнягин // Фундаментальные исследования. – 2011. – №12-3. – С. 548-552.

59. Горева, Т. С. Построение модели сигналов электрической сети на основе вейвлет-конструкции и модели авторегрессии проинтегрированного скользящего среднего [Электронный ресурс] / Т. С. Горева, С. Е. Кузнецов, Н. Н. Портнягин // Современные проблемы науки и образования . – 2011. – №6. – С. 135. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=5313>

60. Горева, Т. С. Построение модели фильтрокомпенсирующего устройства импульсных и флюктуационных помех, возникающих в судовых системах электроснабжения, с идентификацией в ортогональном вейвлет-базисе / Т. С. Горева, С. Е. Кузнецов, Н. Н. Портнягин // Эксплуатация морского транспорта. – 2012. – № 3 (69). – С. 63-68.

61. Горева, Т. С. Фильтрокомпенсирующее устройство импульсных и флюктуационных помех / Т. С. Горева, С. Е. Кузнецов, Н. Н. Портнягин // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. – 2012. – № 1 (4). – С. 44-50.

62. ГОСТ 30804.3.3–2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Ограничение изменений напряжения, колебаний напряжения и фликера в низковольтных системах электроснабжения общего назначения. технические средства с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе),

подключаемые к электрической сети при несоблюдении определенных условий подключения.– Введ. 01.01.2014. – М.: Стандартинформ, 2014. – 22 с.

63. ГОСТ 30804.4.30–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии.– Введ. 01.01.2014. – М.: Стандартинформ, 2014. – 52 с.

64. ГОСТ 30804.4.7–2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Общее руководство по средствам измерения гармоник и интергармоник для систем электроснабжения.– Введ. 01.01.2014. – М.: Стандартинформ, 2013. – 40 с.

65. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.– Введ. 01.07.2014. – М.: Стандартинформ, 2014. – 20 с.

66. ГОСТ 33073–2014. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Контроль и мониторинг качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.– Введ. 01.01.2015. – М.: Стандартинформ, 2014. – 81 с.

67. ГОСТ Р 54835–2011/IEC/TR 61850–1:2003. Сети и системы связи на подстанциях. Ч. 1. Введение и обзор. – Введ. с 01.09.2012 – М.: Стандартинформ, 2012. – 32 с.

68. Государственная программа Российской Федерации «Энергоэффективность и развитие энергетики» : утв. постановлением Правительства Рос. Федерации от 15 апреля 2014 г. № 321: в ред. постановления Правительства Рос. Федерации от 30 марта 2018 г. № 371 // Собр. законодательства Рос. Федерации. 2018. № 15 (часть III), ст. 2138. – С. 6673-6760.

69. Гудков, А. В. Анализ искажений синусоидальности напряжения и возникновение добавочных потерь электроэнергии в офисно-деловом центре г. Самара / А. В. Гудков, Е. А. Кротков, К. С. Аверьянова // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2014. – № 3. – С. 26-28.

- 70.** Дед, А. В. Результаты измерений показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения предприятий и организаций / А. В. Дед, С. П. Сикорский, П. С. Смирнов // Омский научный вестник. – 2018. – № 2 (158). – С. 60-63.
- 71.** Дзюба, М. А. Метод определения статических характеристик нагрузки по напряжению с учетом ограничений по режимным параметрам и электробезопасности активного эксперимента / М. А. Дзюба, В. В. Тарасенко, А. В. Коржов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2018. – Т. 18. № 2. – С. 28-35.
- 72.** Добеши, И. Десять лекций по вейвлетам / И. Добеши. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 464 с.
- 73.** Добуш, В. С. Анализ влияния источников бесперебойного питания на качество электроэнергии в точке общего подключения потребителей / В. С. Добуш, А. А. Бельский // Промышленная энергетика. – 2018. – № 6. – С. 29-34.
- 74.** Довгун, В. П. Двухрезонансные силовые фильтры для систем тягового электроснабжения / В. П. Довгун, И. А. Сташков // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2015. – № 2. – С. 217-220.
- 75.** Долингер, С. Ю. Применение вейвлет-анализа для определения показателей качества электрической энергии / С.Ю. Долингер, А.Г. Лютаревич // Омский научный вестник. – 2010. – №1(87). – С. 136-140.
- 76.** Дроздова, Т. В. «Цифровая подстанция» : практический опыт. Первое в России внедрение технологии на действующем объекте генерации / Т. В. Дроздова, Н. Е. Елов, А. П. Морозов // Энергия единой сети. – 2016. – №3 (26). – С. 54–61.
- 77.** Дубкова, А. Д. Методы спектрального анализа в системе управления дугогасящего реактора / А. Д. Дубкова, С. Ю. Долингер, Д. С. Осипов // Омский научный вестник. – 2018. – №3 (159). – С. 43-47.
- 78.** Дымшаков, А. В. Современные методы и алгоритмы систем автоматизации в энергетике / А. В. Дымшаков, И. З. Хусяинов, Б. В. Кузнецов // Энергетик. – 2017. – № 11. – С. 54-55.

- 79.** Дьяконов, В. П. MATLAB и SIMULINK для радиоинженеров / В. П. Дьяконов. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 976 с.
- 80.** Дьяконов, В. П. Вейвлеты. От теории к практике / В. П. Дьяконов. – М.: СОЛООН-Пресс, 2010. – 400 с.
- 81.** Елизаров, Д. А. Анализ методов оценки гармонических составляющих напряжения в электроэнергетических системах / Д. А. Елизаров // Омский научный вестник. – 2016. – № 2 (146). – С. 62-65.
- 82.** Ершов, С В. Моделирование параметров фильтров высших гармоник в среде MATLAB / С. В. Ершов, В. Ю. Карницкий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2014. – № 8. – С. 25-31.
- 83.** Жежеленко, И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И. В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 331 с.
- 84.** Жежеленко, И. В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко. М.: Энергоатомиздат, 2000. – 252 с.
- 85.** Жежеленко, И. В. Электромагнитная совместимость потребителей: моногр. / И. В. Жежеленико [и др.]. М.: Машиностроение, 2012. – 351 с.
- 86.** Железко, Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов / Ю.С. Железко. М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.
- 87.** Жеребцов, А. Л. Необходимость внедрения системы мониторинга качества электроэнергии на компрессорных станциях магистрального газопровода / А. Л. Жеребцов, В. Ю. Чуйков, П. А. Шомов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2015. – № 3. – С. 28-33.
- 88.** Зайцев, Е. С. Алгоритм оценки температуры жил трёхфазных высоковольтных кабелей с изоляцией из спитого полиэтилена / Е. С. Зайев, В. Д. Лебедев // Электрические станции. – 2016. – № 9. – С. 34-38.
- 89.** Закарюкин, В. П. Моделирование несинусоидальных режимов систем тягового электроснабжения, оснащенных установками компенсации реактивной мощности / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков, А. П. Куцый // Современные

технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2018. – № 1 (57). – С. 72-79. DOI: 10.26731/1813-9108.2018.1(57).72-79

90. Закарюкин, В. П. Моделирование несинусоидальных режимов электрических сетей / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков, К. З. Ле // Системы. Методы. Технологии. – 2015. – № 1 (25). – С. 78-86.

91. Зацепина, В. И. Апробация использования вейвлет-преобразования при выявлении негативных факторов в системах электроснабжения с резкопеременными нагрузками / В. И. Зацепина, Е. П. Зацепин, О. Я. Шачнев // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2015. – № 1. – С. 186-188.

92. Зацепина, В. И. Моделирование электрических нагрузок с резкопеременным характером посредством wavelet-разложения / В. И. Зацепина, Е. П. Зацепин, О. Я. Шачнев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2016. – № 12-3. – С. 56-60.

93. Зацепина, В. И. Научно-практические результаты wavelet-обработки высокочастотных нагрузок / В. И. Зацепина, Е. П. Зацепин, О. Я. Шачнев // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2017. – № 1 (47). – С. 46-52.

94. Зацепина, В. И. Wavelet-разложение высокочастотных сигналов для детализации негативных возмущений / В. И. Зацепина [и др.] // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2017. – № 2 (48). – С. 26-33.

95. Зырянов, В. М. Анализ гармонического состава напряжения частотного электропривода / В. М. Зырянов, Н. А. Митрофанов, Ю. Б. Соколовский // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2015. – № 1. – С. 154-159.

96. Зырянов, В. М. Анализ гармонического состава тока и напряжения на шинах 0,4 кВ КТПН и применение устройств ограничения гармоник / В. М. Зырянов, Н. А. Митрофанов, Ю. Б. Соколовский // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2016. – № 2 (109). – С. 61-68.

97. Зырянов, В. М. Применение устройств ограничения высших гармоник на основе батарей статических конденсаторов в автономной энергосистеме / В. М.

Зырянов, Н. Г. Кирьянова, Н. А. Митрофанов // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2018. – № 2 (71). – С. 131-142.

98. Иваницкий, В. А. Модель для анализа режимов однофазного замыкания на землю в сетях электроснабжения / В. А. Иваницкий, М. Е. Тюленёв // Интеллектуальные системы в производстве. – 2013. – № 2(22). – С. 185-189.

99. Идентификация параметров схемы замещения и контроль устойчивости нагрузки в режиме On-line / А. Л. Нагайцев [и др.] // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2015. – № 3. – С. 198-203.

100. Илюшин, П. В. Анализ эффективности технических решений, обеспечивающих динамическую устойчивость нагрузки по напряжению / П. В. Илюшин, С. Г. Музалев // Энергетик. – 2017. – № 12. – С. 11-15.

101. Имитационная модель активного фильтра для четырёхпроводной сети / А. Б. Лоскутов [и др.] // Промышленная энергетика. – 2013. – № 10. – С. 40-44.

102. Интегральная оценка состояния послеаварийных режимов сетей среднего напряжения северных нефтегазовых месторождений в свете концепции Smart Grid / Е. В. Иванова [и др.] // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2016. – № 3-4. – С. 138-144.

103. Информационные параметры электрических величин переходного процесса для определения места замыкания на землю в распределительных кабельных сетях напряжением 6–10 кВ / В. А. Шuin [и др.] // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2017. – № 2. – С. 34-42.

104. Исследование влияния источников высших гармоник на качество электроэнергии в электроэнергетических системах 220 – 500 кВ / И. И. Карташев [и др.] // Электричество. – 2013. – № 1. – С. 13-18.

105. Исследование высших гармоник тока, генерируемых энергосберегающими источниками света / Г. Я. Вагин [и др.] // Промышленная энергетика. – 2014. – № 6. – С. 51-55.

106. К вопросу о выборе нулевых проводников в городских электрических сетях / Г. Я. Вагин [и др.] // Промышленная энергетика. – 2014. – № 2. – С. 22-26.

107. К вопросу расчета высокочастотных переходных электромагнитных процессов в сети электроснабжения / А. А. Кузьмин [и др.] // Вестник Чувашского университета. – 2017. – № 1. – С. 113-119.

108. К проблеме моделирования несинусоидальных режимов распределительных сетей / Н. Н. Харлов [и др.] // Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. № 3. – С. 95-102.

109. Казаков, Ю. Б. Влияние несинусоидальности питающего напряжения на виброшумовые характеристики асинхронных двигателей / Ю. Б. Казаков, Ю. И. Бондаренко // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2015. – № 3. – С. 34-38.

110. Карпенко, С.В. Математическое моделирование нестационарных электрических процессов в электротехнических системах на основе численных методов вейвлет-анализа: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18 / Карпенко Степан Викторович. – Новокузнецк, 2006. – 164 с.

111. Карташев, И. И. Основные задачи управления качеством электроэнергии в активно-адаптивной сети / И. И. Карташев, В. Н. Тульский, Р. Р. Насыров // Электротехника. – 2015. – № 10. – С. 28-33.

112. Карташев, И. И. Управление качеством электроэнергии / И. И. Карташев, В. Н. Тульский. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 320 с.

113. Кобец, Б. Б. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid / Б. Б. Кобец, И. О. Волкова. – М.: ИАЦ Энергия, 2010. – 208 с.

114. Коверникова, Л. И. Активные мощности гармоник в узле присоединения нелинейных нагрузок к сети высокого напряжения / Л. И. Коверникова // Электричество. – 2017. – № 3. – С. 12-20.

115. Коверникова, Л. И. Алгоритм моделирования нелинейных нагрузок сети высокого напряжения по измеренным параметрам / Л. И. Коверникова, В. Ч. Лыонг // Электричество. – 2017. – № 10. – С. 16-25.

116. Кондуктивные низкочастотные электромагнитные помехи, обусловленные несинусоидальностью напряжения, в электрической сети (0,4–2) кВ механизированной скважины по добыче нефти / В. Г. Сальников [и др.] // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2015. – № 1. – С. 150-154.

117. Коржов, Д. Н. Обеспечение электромагнитной совместимости в системах электроснабжения промышленных предприятий с электроустановками индукционного нагрева: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Коржов Дмитрий Николаевич. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2015. – 169 с.

118. Коровкин, Н. В. О применимости быстрого преобразования Фурье для гармонического анализа несинусоидальных токов и напряжений / Н. В. Коровкин, С. С. Грицутенко // Известия Российской Академии Наук. Энергетика. – 2017. – № 2. – С. 73-86.

119. Короновский, А. А. Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения / А. А. Короновский, А. Е. Храмов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 176 с.

120. Костарев, И. А. Разработка и оценка устойчивости функционирования защиты от однофазных замыканий на землю, основанной на контроле пульсирующей мощности, компенсированных сетей 6–35 кВ: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Костарев Илья Андреевич. – Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический ун-т, 2015. – 171 с.

121. Костинский, С. С. Анализ и сравнение силовых сухих и масляных трансформаторов мощностью от 250 до 1600 кВА по критерию предельных относительных потерь активной мощности, обусловленных высшими гармониками / С. С. Костинский, Х. Х. Тохаев // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2015. – № 4. – С. 55-58.

122. Костинский, С. С. Метод определения дополнительных потерь активной мощности в трансформаторах распределительных сетей, обусловленных

нелинейными нагрузками / С. С. Костинский, А. И. Троицкий // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2015. – № 3. – С. 61-67.

123. Критерии достаточности запаса статической устойчивости комплексной нагрузки нефтедобычи для различных режимов работы систем электроснабжения / Ю. М. Денчик [и др.] // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2015. – № 2. – С. 206-210.

124. Кузнецов, С. Е. Построение активных фильтров подавления импульсных помех в сетях электропитания промысловых судов с применением вейвлет-анализа / С. Е. Кузнецов, Т. С. Горева, Н. Н. Портнягин // Эксплуатация морского транспорта. – 2011. – № 3 (65). – С. 65-70.

125. Кузьмин, А. А. К вопросу выбора режима заземления нейтрали в сети среднего класса напряжения городского электроснабжения / А. А. Кузьмин, А. Базаррагча // Вестник Чувашского университета. – 2015. – № 3. – С. 62-67.

126. Кузьмин, А. А. Исследование и разработка устройства предотвращения дуговых перенапряжений при несинусоидальности тока замыкания на землю: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.12 / Кузьмин Алексей Александрович. – Новосибирск: Новосибирский гос. техн. ун-т, 2016. – 164 с.

127. Куликов, А. Л. Применение цифровой обработки сигналов в задаче повышения точности ОМП ЛЭП по параметрам аварийного режима / А. Л. Куликов, М. Д. Обалин, В. А. Петрова // Электрические станции. – 2016. – № 4. – С. 39-44.

128. Куско, А. Качество электроэнергии в электрических сетях / Куско А., Томпсон М.: пер. с англ. Рабодзея А.Н. – М.: Додэка-XXI, 2008. – 336 с.

129. Латипов, А. Г. Использование высших гармоник напряжения на стороне 0,4 кВ потребительских подстанций как диагностический признак однофазных замыканий на землю в сетях 6–10 кВ / А. Г. Латипов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2011. – № 5. – С. 63-66.

130. Лебедев, В. Д. Расчет температуры жилы однофазного высоковольтного кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена в режиме реального

времени / В. Д. Лебедев, Е. С. Зайцев // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2015. – № 4. – С. 11-16.

131. Левиуш, А. И. Сигнализация и защита в сетях 6–35 кВ, основанных на использовании переходных процессов / А. И. Левиуш // Релейная защита и автоматизация. – 2015. – № 1(18). – С. 22-26.

132. Лимаров, Д. С. Электромагнитная совместимость в цеховых системах электроснабжения при наличии электроприёмников с нелинейными вольт-амперными характеристиками: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Лимаров Денис Сергеевич. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2015. – 189 с.

133. Липатов, И. Н. Построение адаптивного фильтра на основе вейвлета Добеши для случая гармонического полезного сигнала и экспоненциально коррелированной помехи / И. Н. Липатов // Вестник Пермского национального политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2012. – № 6. – С. 4-9.

134. Лямец, Ю. Я. Кратномасштабный анализ процесса короткого замыкания / Ю. Я. Лямец, П. И. Воронов, Ю. В. Романов // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2014. – № 5. – С. 135-143.

135. Малла, С. Вэйвлеты в обработке сигналов. / С. Малла; пер. с англ. – М.:Мир, 2005. – 671 с.

136. Манилов, А. М. Способ обеспечения чувствительности защит и улучшения условия ограничения перенапряжений при однофазном замыкании на землю в электрических сетях 6–10 кВ с комбинированным заземлением нейтрали / А. М. Манилов, А. А. Барна, Д. А. Мельник // Электричество. – 2013. – № 9. – С. 7-11.

137. Манусов, В. З. Применение теории вейвлетов для анализа данных при решении задачи прогнозирования электрической нагрузки / В. З. Манусов, К. Н. Бойко // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2015. – № 4. – С. 212-215.

- 138.** Манусов, В. З. Сравнительный анализ математических моделей для определения коэффициента увеличения активного сопротивления проводников от высших гармоник / В. З. Манусов, В. В. Хрипков, В. В. Фролова // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2018. – №1. – С. 184-188.
- 139.** Манусов, В. З. Холонический подход для интеллектуальных сетей в концепции Smart Grid при двустороннем потоке энергии / В. З. Манусов, Н. Хасанзода // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2017. – № 3-4. – С. 206-211.
- 140.** Маркович, И.И. Цифровая обработка сигналов в системах и устройствах: монография / И. И. Маркович. – Ростов н/Д: Издательство Южного федерального университета. – 2012. – 236 с.
- 141.** Матвеев, Д. А. Эффективность управляемых дугогасящих реакторов в электрических сетях 6 – 35 кВ: теоретические аспекты / Д. А. Матвеев, С. И. Хренов // Электричество. – 2015. – № 1. – С. 34-39.
- 142.** Методы оценки мощности искажений при несинусоидальных режимах систем электроснабжения / С. Н. Чижма [и др.] // Промышленная энергетика. – 2015. – № 4. – С. 14-19.
- 143.** Мирошник, В. Ю. Методы и алгоритмы для определения места однофазного замыкания на землю в сетях 6–35 кВ с использованием параметров аварийного режима / В. Ю. Мирошник, Д. В. Батулько, А. А. Ляшков // Омский научный вестник. – 2017. – № 1 (151). – С. 62-66.
- 144.** Мисриханов, А. М. Применение методов вейвлет-преобразования в электроэнергетике / А.М. Мисриханов // Автоматика и телемеханика. – 2006. – № 5. – С. 5-23.
- 145.** Михеев, Г. М. Алгоритм расчёта тока высших гармоник в системе электроснабжения промышленных предприятий/ Г. М. Михеев, М. Н. Атаманов, Н. М. Дрей // Промышленная энергетика. – 2018. – № 3. – С. 40-45.
- 146.** Многопараметрические токовые защиты от замыканий на землю кабельных сетей напряжением 6 – 10 кВ / А. Н. Голубев [и др.] // Электрические станции. – 2017. – № 8. – С. 36-45.

- 147.** Моделирование критических режимов работы узлов электроэнергетических систем с асинхронной нагрузкой при исследовании статической устойчивости на промышленной частоте / А. А. Планков [и др.] // Омский научный вестник. – 2013. – № 1 (117). – С. 173-178.
- 148.** Моделирование резонанса токов на высших гармониках при нестационарном режиме работы системы электроснабжения / Д. В. Коваленко [и др.] // Омский научный вестник. – 2018. – № 2 (158). – С. 64-69.
- 149.** Надтока, И. И. Модель прогнозирования электропотребления энергорайонов и региона с учетом влияния метеофакторов / И. И. Надтока, В. А. Бугаец, М.В. Юрушкин // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2014. – № 3. – С. 40-44.
- 150.** Ненахов, А. И. Совершенствование подходов к моделированию токов дуговой сталеплавильной печи при разработке компенсаторов реактивной мощности / А. И. Ненахов, С. И. Гамазин // Промышленная энергетика. – 2015. – № 9. – С. 25-31.
- 151.** Ненахов, А. И. Совмещение функций компенсации реактивной мощности, симметрирования и активной фильтрации токов при построении алгоритма управления устройством СатКом / А. И. Ненахов, С. И. Гамазин // Электричество. – 2016. – № 8. – с. 46-52.
- 152.** Новосёлов, Н. А. Методика расчета кратковременной дозы фликера в сетях с дуговыми сталеплавильными печами / Н. А. Новосёлов, А. А. Николаев, Г. П. Корнилов // Промышленная энергетика. – 2014. – № 1. – С. 27-31.
- 153.** Обеспечение электромагнитной совместимости в системах освещения объектов агропромышленного комплекса / Н. П. Боярская [и др.] // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2014. – № 6 (93). – С. 243-250.
- 154.** Обоснование развития электроэнергетических систем: Методология, модели. Методы, их использование /Н. И. Воропай, С. В. Подковальников, В. В. Труфанов и др.; отв. ред. Н. И. Воропай. – Новосибирск: Наука, 2015. – 448 с.

155. Обработка экспериментальных данных показателей качества электрической энергии по медленному изменению напряжения / А. И. Антонов [и др.] // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2015. – № 3. – С. 203-207.

156. Ольховский, В. Я. Исследование воздействия высших гармоник мелких нелинейных потребителей на работу сети до 1000 В / В. Я. Ольховский, Т. В. Мятеж, С. Ю. Наяксов // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2016. – № 1 (30). – С. 84-97.

157. Определение статических характеристик нагрузки по напряжению в электрических сетях с комплексной нагрузкой / С. В. Балдов [и др.] // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2014. – № 6. – С. 22-30.

158. Осипов, Д. С. Разработка алгоритма автоматической настройки компенсации емкостных токов на основе существующих методов / Д. С. Осипов, С. Ю. Долингер, Д. Г. Сафонов // Омский научный вестник. – 2016. – № 4 (148). – С. 79-84.

159. Осипов, Д. С. Расчет потерь энергии в кабельной линии электропередачи при наличии нелинейной нагрузки методом пакетного вейвлет-преобразования / Д. С. Осипов, Д. В. Коваленко, Б. Ю. Киселёв // Омский научный вестник. – 2016. – №4 (148). – С. 84-89.

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

161. Основные положения концепции интеллектуальной энергосистемы с активно-адаптивной сетью: офиц. текст. – [Электронный ресурс] М.: ФСК ЕЭС. 2012. – Режим доступа: http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/ies_aas.pdf свободный. – Загл. с экрана (дата обращения 05.11.2018).

162. Особенности напряжений электрической сети при однофазных замыканиях на землю / С. О. Борковский [и др.] // Фундаментальные исследования. – 2015. – №2-12. – С. 2545-2552.

163. Особенности применения специальных трансформаторов тока нулевой последовательности с устройствами защиты от замыканий на землю / Д. В. Батулько [и др.] // Омский научный вестник. – 2016. – № 4 (148). – С. 76-79.

164. Оценка запаса устойчивости комплексной нагрузки по напряжению в сети 6 кВ куста механизированной добычи нефти и газа из глубинных скважин / Н. А. Рыковский [и др.] // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2015. – № 3. – С. 184-188.

165. Оценка чувствительности токовых защит от замыканий на землю в кабельных сетях 6–10 кВ / М. С. Аль-Хомиди [и др.] // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2016. – №3. – С. 50-55.

166. Ощепков, В. А. Определение уровня перенапряжений в сетях с компенсацией емкостных токов / В. А. Ощепков, А. О. Шепелев, Н. С. Капитонов // Омский научный вестник. – 2016. – № 5 (151). – С. 89-93.

167. Панкратов, А. В. Экспериментальное определение статических характеристик нагрузки электроэнергетических систем / А. В. Панкратов, В. И. Полищук, Н. Л. Бацева // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2015. – т. 15. № 1. – С. 11-20.

168. 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.

169. Петров, А. В. Метод экспресс-оценки суммарных коэффициентов гармонических составляющих в электрических сетях / А. В. Петров, В. Е. Мартусенко, Р. Н. Дейникин // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. – 2017. – № 2 (59). – С. 26-29.

170. Петров, А. В. Экспериментальное исследование скин-эффекта в самонесущих изолированных проводах / А. В. Петров, Д. А. Костюков, П. А.

Звада // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. – 2018. – № 3 (66). – С. 7-14.

171. Петров, М. И. Влияние частотно-регулируемой нагрузки на процесс усиления гармонических искажений при возникновении однофазного замыкания на землю / М. И. Петров, А. А. Кузьмин // Вестник Чувашского университета. – 2015. – № 3. – С. 104-108.

172. План мероприятий («Дорожная карта») «Внедрение инновационных технологий и современных материалов в отраслях топливно-энергетического комплекса» на период до 2018 года: утв. распоряжением Правительства Рос. Федерации от 3 июля 2014 г. № 1217-р // Собр. законодательства Рос. Федерации. 2014. № 28, ст. 4106. – С. 10782-10789.

173. План мероприятий («Дорожная карта») по совершенствованию законодательства и устраниению административных барьеров в целях обеспечения реализации Национальной технологической инициативы по направлению «Энерджинет» : утв. распоряжением Правительства Рос. Федерации от 28 апреля 2018 г. № 830-р // Собр. законодательства Рос. Федерации. 2018. № 19, ст. 2803. С. 10087-10097.

174. Повышение качества электрической энергии в сетях с нелинейными потребителями / С. В. Горелов [и др.] // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2016. – № 3-4. – С. 151-153.

175. Применение вейвлет-преобразования для частотной декомпозиции токов нулевой последовательности при однофазном замыкании на землю в сетях с изолированной нейтралью / А. А. Ляшков [и др.] // Омский научный вестник. – 2016. – № 4 (148). – С. 56-61.

176. Применение имитационного моделирования для оценки уровня нестабильности высших гармоник в токе однофазного замыкания на землю в компенсированных кабельных сетях 6–10 кВ / Т. Ю. Винокурова [и др.] // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2014. – № 6. – С. 31-38.

177. Применение пакетного вейвлет-преобразования для определения составляющих мощности при несинусоидальных режимах / Л. А. Файфер [и др.] // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2016. – №8 (115). – С. 136-145.

178. Принципы выполнения адаптивной токовой защиты от замыканий на землю в некомпенсированных кабельных сетях напряжением 6–10 кВ / В. А. Шuin [и др.] // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2018. – № 3. – С. 29-73.

179. Проблема качества электроэнергии в системе электроснабжения городского электрического транспорта / В. М. Руцкий [и др.] // Вестник транспорта Поволжья. – 2018. – № 1 (67). – С. 17-23.

180. Проблемы оценки вклада потребителя в искажение качества электроэнергии / Д. В. Дворикин [и др.] // Электричество. – 2017. – №7. – С. 12-19.

181. Программа инновационного развития ПАО «ФСК ЕЭС» на 2016-2020 годы с перспективой до 2025 года [Электронный ресурс] М.: ФСК ЕЭС. 2016. – Режим доступа: http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/2_2016_PIR_FSK-2016-2020-2025.pdf свободный. – Загл. с экрана (дата обращения 05.11.2018).

182. Программное обеспечение для эмуляции передачи мгновенных значений измерений в соответствии со стандартом МЭК 6185 / П. Ф. Баранов [и др.] // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – т. 324, № 5. – С. 131-139.

183. Разработка алгоритма определения спектральных составляющих напряжения в электроэнергетических системах / Б. В. Палагушкин [и др.] // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2015. – № 1. – С. 188-194.

184. Разработка метода расчета потерь мощности в токоведущих частях при наличии интергармоник / Д. С. Осипов [и др.] // Омский научный вестник. – 2017. – №4 (154). – С. 60-65.

185. Распознавание слабых гармонических составляющих сигналов в защите генератора от однофазного замыкания на землю / В. И. Антонов [и др.] // Электрические станции. – 2018. – № 1. – С. 52-55.

186. Расчет резонансных режимов систем электроснабжения и разработка мероприятий по фильтрации высших гармоник / В.А. Ощепков [и др.] // Промышленная энергетика. – 2018. – № 9. – С. 10–16.

187. Расчет тока конденсаторных батарей с учетом источников высших гармоник / Г. М. Михеев [и др.] // Вестник Чувашского университета. – 2017. – № 1. – С. 145-155.

188. Савина, Н. В. Разработка модели электрической сети для управления качеством электрической энергии / Н. В. Савина, Н. С. Бодруг // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2016. – т. 16, № 4. – С. 23-31.

189. Салимова, А.С. Метод анализа высших гармоник напряжения в магистральной электрической сети / А. С. Салимова, В. Н. Тульский, Р. Г. Шамонов // Электричество. – 2014. – № 7. – С. 26-33.

190. Сафонов, Д. Г. Определение напряжения нулевой последовательности с учетом естественной несимметрии параметров воздушной линии электропередачи / Д. Г. Сафонов, В. А. Ощепков, С. С. Гиршин // Омский научный вестник. – 2016. – № 1 (145). – С. 58-60.

191. Селезнев, А. С. Нормализация несинусоидальных режимов в электрических сетях / А. С. Селезнев, С. А. Кондрат, А. Н. Третьяков // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2014. – № 8 (91). – С. 155-161.

192. Селезнев, А. С. Об эффективности применения фильтров при нормализации несинусоидальных режимов / А. С. Селезнев, С. А. Кондрат, А. Н. Третьяков // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2015. – № 8 (103). – С. 177-183.

- 193.** Селезнев, А. С. Снижение уровня высших гармоник в электрических сетях высокого напряжения / А. С. Селезнев // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2014. – № 4 (87). – С. 143-149.
- 194.** Серков, А. В. Проблемы юридической ответственности за нарушение требований к качеству поставляемой энергии / А. В. Серков // Промышленная энергетика. – 2017. – № 1. – С. 48-54.
- 195.** Сивокобыленко, В. Ф. Способ экспериментального определения параметров схем замещения асинхронных двигателей / В. Ф. Сивокобыленко, С. Н. Ткаченко // Электрические станции. – 2016. – № 10. – С. 42-47.
- 196.** Смирнов, А. И. Применение волнового анализа для измерения реактивной энергии при нарушении качества электроэнергии / А. И. Смирнов, А. С. Лутонин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – №4. – С. 458-471.
- 197.** Смирнов, С. С. Высшие гармоники в сетях высокого напряжения. – Новосибирск: Наука, 2010. – 327 с.
- 198.** Смирнов, С. С. Метод оценки вклада мощной искажающей нагрузки в коэффициенты высших гармоник напряжения сети высокого напряжения / С. С. Смирнов // Электричество. – 2008. – № 8. – С. 28-35.
- 199.** Смирнов, С. С. Свойства активных мощностей гармоник искажающих нагрузок / С. С. Смирнов // Электричество. – 2010. – № 9. – С. 45-49.
- 200.** Смоленцев, Н. К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB / Н.К. Смоленцев. – М.: ДМК Пресс, 2014. – 628 с.
- 201.** Совершенствование методов контроля и анализа показателей несинусоидальности напряжения в электроэнергетических системах / Ю. В. Дёмин [и др.] // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2018. – №1. – С. 200-206.
- 202.** Совершенствование процесса регистрации аварийных событий в сетях 6–110 кВ с использованием новой высокочастотной системы регистрации / А. В. Телегин [и др.] // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2017. – № 3-4. – С. 175-181.

203. Способ повышения эффективности функционирования адмитансной защиты от замыканий на землю в кабельных сетях 6–10 кВ с изолированной нейтралью / В. А. Шuin [и др.] // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2018. – № 4. – С. 20-30.

204. Способы обработки данных активного эксперимента при определении статических характеристик мощности нагрузок узлов сети по напряжению / В. И. Нагай [и др.] // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2014. – № 6. – С. 67-71.

205. СТО 56947007-29.240.036-2009. Руководящие указания по выбору объемов неоперативной технологической информации, передаваемой с подстанций ЕНЭС в центры управления электрическими сетями, а также между центрами управления. – [Электронный ресурс] М.: ФСК ЕЭС. 2009. – Режим доступа: <http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/56947007-29.240.036-2009.pdf> свободный. – Загл. с экрана (дата обращения 05.11.2018).

206. Стратегия развития электросетевого комплекса Российской Федерации : утв. распоряжением Правительства Рос. Федерации от 3 апреля 2013 г. № 511-р: в ред. постановления Правительства Рос. Федерации от 29 ноября 2017 г. № 2664-р // Собр. законодательства Рос. Федерации. 2017. № 49, ст. 7526. С. 21027-21029.

207. Учет влияния высших гармоник тока и напряжения на критерии статической устойчивости узлов электроэнергетических систем с асинхронной нагрузкой / Д. С. Осипов [и др.] // Омский научный вестник. – 2013. – № 2 (120). – С. 218-221.

208. Фархадзаде, Э. М. Мощностные характеристики в электрической сети с полигармоническим напряжением и током / Э. М. Фархадзаде, Г. Б. Гулиев, С. М. Сафаралиева // Промышленная энергетика. – 2018. – № 3. – С. 46-52.

209. Федосов, Д. С. Исследование резонансных явлений на высших гармониках в схеме внешнего электроснабжения нелинейной нагрузки / Д. С. Федосов, И. А. Тарасов, Д. В. Воронцов // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2016. – № 4 (111). – С. 145-154.

- 210.** Федотов, А. И. Распределение токов и напряжений вдоль воздушных линий электропередачи 6–35 кВ на «резонансных» частотах при ОЗЗ / А. И. Федотов, Г. В. Вагапов, Н. В. Чернова // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2017. – т. 19, № 5-6. – С. 69-78.
- 211.** Фигурнов, Е. П. Опыты по нагреву неизолированных проводов воздушных линий / Е. П. Фигурнов, В. И. Харчевников // Электрические станции. – 2016. – № 11. – С. 41-47.и
- 212.** Фрейзер, М. Введение в вэйвлеты в свете линейной алгебры / М. Фрейзер ; пер. с англ. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. – 487 с.
- 213.** Функциональная вейвлет-диагностика состояния обмоток роторов трехфазных электрических машин по статорным токам / В. В. Тимошкин [и др.] // Электричество. – 2012. – № 6. – С. 42-46.
- 214.** Харлов, Н. Н. Моделирование и идентификация узлов нагрузки с нелинейными вольтамперными характеристиками по данным измерений / Н. Н. Харлов, Л. Л. Булыга // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – т. 328, № 6. – С. 99-107.
- 215.** Цырук, С. А. Моделирование основных источников несинусоидальности в бытовых электросетях / С. А. Цырук, С. А. Янченко, Е. Н. Рыжкова // Вестник Московского энергетического института. – 2013. – № 3. – С. 67-71.
- 216.** Чеботнягин, Л. М. Исследование электрических и светотехнических параметров светодиодных светильников / Л. М. Чеботнягин, Д. Л. Юхимович, К. Е. Кичкильдеев // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2017. – т. 21, № 1 (120). – С. 165-177.
- 217.** Черепанов, В. В. Методика расчёта колебаний напряжения и дозы фликера в электрических сетях, питающих асинхронные двигатели с резкопеременной нагрузкой / В. В. Черепанов, Е. А. Калинина // Промышленная энергетика. – 2018. – № 2. – С. 50-55.

- 218.** Чижма, С. Н. Метод спектрального анализа интергармоник в электроэнергетических системах / С. Н. Чижма // Промышленная энергетика. – 2014. – № 4. – С. 43-47.
- 219.** Чижма, С. Н. Совершенствование методов и средств контроля качества электроэнергии и составляющих мощности в электроэнергетических системах с тяговой нагрузкой: дис. ... докт. техн. наук: 05.14.02 / Чижма Сергей Николаевич. – Омск: Омский государственный университет путей сообщения, 2014. – 367 с.
- 220.** Шадрикова, Т. Ю. Разработка комплексной многофункциональной защиты от однофазных замыканий на землю кабельных сетей 6–10 кВ: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Шадрикова Татьяна Юрьевна. – Иваново: Ивановский гос. энергетический ун-т им. В. И. Ленина, 2016. – 204 с.
- 221.** Шидловский, А. К. Высшие гармоники в низковольтных электрических сетях / А.К. Шидловский, А.Ф. Жаркин. – Киев: Наукова думка, 2005. – 211 с.
- 222.** Шклярский, Я. Э. Влияние высших гармоник на измерение реактивной энергии в электрических сетях / Я. Э. Шклярский, О. С. Васильков, Д. Е. Батуева // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – № 1. – С. 381-389.
- 223.** Шклярский, Я. Э. Компенсация несинусоидальных токов и токов несимметрии в четырехпроводных сетях низкого напряжения / Я. Э. Шклярский, А. А. Билецкий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2016. – № 11-2. – С. 531-540.
- 224.** Штарк, Г.Г. Применение вейвлетов для ЦОС / Г.Г. Штарк. – М.: Техносфера, 2007. – 192 с.
- 225.** Шурыгин, А. С. Показатели качества электрической энергии, стандартизованные в ГОСТ 32144-2013 Российской Федерации и в ряде зарубежных стандартов / А. С. Шурыгин // Энергетик. – 2017. – № 11. – С. 15-18.
- 226.** Экспериментальное исследование гармонического воздействия на электрическую сеть (0,4–2) кВ глубинной скважины добычи нефти / М. С.

Давыдов [и др.] // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2016. – № 3-4. – С. 154-160.

227. Экспериментальное исследование проявления высших гармоник напряжения на стороне 0,4 кВ потребительских подстанций как метода ранней диагностики однофазных замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью / Г. В. Вагапов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2014. – № 4. – С. 89-92.

228. Экспериментальные исследования электромагнитной совместимости современных электроприводов в системе электроснабжения металлургического предприятия / А. А. Николаев [и др.] // Вестник Магнитогорского гос. техн. университета им. Г. И. Носова. – 2016. – т. 14, № 4. – С. 96-105. DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-4-96-105

229. Янченко, С. А. Анализ гармонической эмиссии распространенных видов современных бытовых нелинейных электроприемников / С. А. Янченко // Промышленная энергетика. – 2014. – № 8. – С. 46-55.

230. Янченко, С. А. Анализ методов разгрузки трансформаторов в сетях с высоким уровнем несинусоидальности тока / С. А. Янченко, С. А. Цырук, А. И. Куликов // Промышленная энергетика. – 2017. – № 7. – С. 44-53.

231. Янченко, С. А. Компенсация высших гармоник тока при питании групп бытовых нелинейных электроприёмников / С. А. Янченко, С. А. Цырук // Промышленная энергетика. – 2014. – № 1. – С. 20-26.

232. A filter bank and a self-tuning adaptive filter for the harmonic and interharmonic estimation in power signals / S.-W. Sohn [et al.] // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2012. – vol. 61, issue 1. – pp. 64-73. DOI: 10.1109/tim.2011.2150610

233. A general noise-resilient technique based on the Matrix Pencil method for the assessment of harmonics and interharmonics in power systems / K. Sheshyekani [et al.] // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2017. – vol. 32, issue 5. – pp. 2179-2188. DOI: 10.1109/tpwrd.2016.2625329

234. A method based on interharmonics for flicker propagation applied to arc furnaces / A. Hernandez [et al.] // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2005. – vol. 20, issue 3. – pp. 2334-2342. DOI: 10.1109/tpwrd.2005.848677

235. A new method based on artificial neural network, wavelet transform and short time Fourier transform for subsynchronous resonance detection / Y. Xia [et al.] // International journal of electric power and energy systems. – 2018. – vol. 103, December. – pp. 377-383. DOI: 10.1016/j.ijepes.2018.06.019

236. A novel methodology for modeling waveforms for power quality disturbance analysis / M. A. Rodriguez-Guerrero [et al.] // Electric power systems research. – 2017. – vol. 143, February. – pp. 14-24. DOI: 10.1016/j.epsr.2016.09.003

237. A robust and adaptive detection scheme for interharmonics in active distribution network / Z. Jin [et al] // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2018. – vol. 33, issue 5. – pp. 2524-2534. DOI: 10.1109/tpwrd.2018.2815565

238. Abdelgayed, T. S. A New approach for fault classification in microgrids using optimal wavelet functions matching pursuit / T. S. Abdelgayed, W. G. Morsi, T. S. Sidhu // IEEE Transactions on Smart Grid. . – 2018. – vol. 9, issue 5. – pp. 4838-4846. DOI: 10.1109/tsg.2017.2672881

239. Ampacity of low-voltage power cables under nonsinusoidal currents / C. Demoulias [et al.] // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2004. – vol. 22, issue 1. – pp. 584-594. DOI: 10.1109/tpwrd.2006.881445

240. An impedance-based approach for identifying interharmonic sources / A. B. Nassif [et al.] // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2011. – vol. 26, issue 1. – pp. 333-340. DOI: 10.1109/tpwrd.2010.2049508

241. Anders, G. J. Improvement in cable rating calculations by consideration of dependence of losses on temperature / G. J. Anders, H. Brakelmann // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2004. – vol. 19, issue 3. – pp. 919-925. DOI: 10.1109/tpwrd.2003.822973

242. Anis Ibrahim, W. R. Artificial intelligence and advanced mathematical tools for power quality applications: a survey / W. R. Anis Ibrahim, M. M. Morcos //

IEEE Transactions on Power Delivery. – 2002. – vol. 17, issue 2. – pp. 668-673. DOI: 10.1109/61.997958

243. Applications of wavelet transform for analysis of electrical transients in power systems: The Review / D. S. Osipov [et al.] // Przegląd Elektrotechniczny. – 2016. – NR 4. pp. 162-165. DOI:10.15199/48.2016.04.35

244. Argyropoulos, P. E. Wavelet customization for improved fault-location quality in power networks / P. E. Argyropoulos, H. Lev-Ari // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2015. – vol. 30, issue 5. – pp. 2215-2223. DOI: 10.1109/tpwrd.2015.2429590

245. Arrillaga, J. Power systems electromagnetics trasients simulations / J. Arrillaga, N. Watson. – The Institution of Engineering and Technology, UK, 2007. – 449 p.

246. Assessment of unbalance and distortion components in three-phase systems with harmonics and interharmonics / G. Chicco [et al.] // // Electric power systems research. – 2017. – vol. 147, June. – pp. 201-212. DOI: 10.1016/j.epsr.2017.02.016

247. Barros, J. A discussion of new requirements for measurement of harmonic distortion in modern power supply systems / J. Barros, R. I. Diego, M. de Apraíz // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2013. – vol. 62, issue 8. – pp. 2129-2139. DOI: 10.1109/tim.2013.2267451

248. Barros, J. Analysis of harmonics in power systems using the wavelet-packet transform / J. Barros, R. I. Diego // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2008. – vol. 57, issue 1. – pp. 63-69. DOI: 10.1109/tim.2007.910101

249. Barros, J. Application of the wavelet-packet transform to the estimation of harmonic groups in current and voltage waveforms / J. Barros, R. I. Diego // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2006. – vol. 21, issue 1. – pp. 533-535. DOI: 10.1109/tpwrd.2005.848437

250. Barros, J. Applications of wavelet transform for analysis of harmonic distortion in power systems: A review / J. Barros, R. I. Diego, M. Apráiz // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2012. – vol. 61, issue 10. – pp. 2604-2611. DOI: 10.1109/tim.2012.2199194

- 251.** Bećirović, V. Sensitivity analysis of method for harmonic state estimation in the power system / V. Bećirović, I. Pavić, B. Filipović-Grčić // Electric power systems research. – 2018. – vol. 154, January. – pp. 515-527. DOI: 10.1016/j.epsr.2017.07.029
- 252.** Brahma, S. M. Distance relay with out-of-step blocking function using wavelet transform/ S. M. Brahma // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2007. – vol. 22, issue 3. – pp. 1360-1366. DOI: 10.1109/tpwrd.2006.886773
- 253.** Brunoro, M. Modeling of loads dependent on harmonic voltages / M. Brunoro, L. F. Encarnaçāo, J. F. Fardin // Electric power systems research. – 2017. – vol. 152, November. – pp. 367-376. DOI: 10.1016/j.epsr.2017.07.030
- 254.** Calculation of steady non-sinusoidal modes and electric power losses in complex electrical networks / N. N. Kharlov [et al] // Proceedings – 2016 IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC), Varna, 25-28 September. – 2016. – pp. 336-341. DOI: 10.1109/epepemc.2016.7752020
- 255.** Cataliotti, A. Comparison of nonactive powers for the detection of dominant harmonic sources in power systems / A. Cataliotti, V. Cosentino, S. Nuccio // . IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2008. – vol. 57, issue 8. – pp. 1554-1561. DOI: 10.1109/tim.2008.925338
- 256.** Cataliotti, A. Disturbing load detection in three-wire and four-wire systems based on novel nonactive powers from IEEE 1459-2000 / A. Cataliotti, V. Cosentino // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2010. – vol. 59, issue 5. – pp. 1082-1090. DOI: 10.1109/tim.2009.2038293
- 257.** Characterization of distribution power quality events with Fourier and wavelet transforms / S. Santoso [et al.] // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2000. – vol. 15, issue 1. – pp. 247-254. DOI: 10.1109/61.847259
- 258.** Chilukuri, M. V. Multiresolution S-transform-based fuzzy recognition system for power quality events / M. V. Chilukuri, P. K. Dash // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2004. – vol. 19, issue 1. – pp. 323-330. DOI: 10.1109/TPWRD.2003.820180

259. Complex power quality disturbances classification via curvelet transform and deep learning / H. Liu [et al.] // Electric power systems research. – 2018. – vol. 163, October. – pp. 1-9. DOI: 10.1016/j.epsr.2018.05.018

260. Continuous-wavelet transform for fault location in distribution power networks: definition of mother wavelets inferred from fault originated transients / A. Borghetti [et al.] // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2008. – vol. 23, issue 2. – pp. 380-388. DOI: 10.1109/TPWRS.2008.919249

261. Costa, F. B. Assessment of voltage sag indices based on scaling and wavelet coefficient energy analysis / F. B. Costa, J. Driesen // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2013. – vol. 28, issue 1. – pp. 336-346. DOI: 10.1109/tpwrd.2012.2218626

262. Costa, F. B. Fault-induced transient detection based on real-time analysis of the wavelet coefficient energy / F.B. Costa // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2014. – vol. 29, issue 1. – pp. 140-153. DOI: 10.1109/TPWRD.2013.2278272

263. Czarnecki, L. S. Power properties of four-wire systems at nonsinusoidal supply voltage / L. S. Czarnecki, P. M. Haley // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2016. – vol. 31, issue 2. – pp. 513-521. DOI: 10.1109/tpwrd.2015.2463253

264. Das, J. C. Power systems harmonics and passive filter design / J. C. Das. – John Wiley & Sons, Inc, Canada, 2015. –873 p.

265. Dash, P.K. Power quality analysis using S-transform / P. K. Dash, B. K. Panigrahi, G. Panda // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2003. – vol. 18, issue 2. – pp. 406-411. DOI: 10.1109/TPWRD.2003.809616

266. Deokar, S. A. Integrated DWT-FFT approach for detection and classification of power quality disturbances / S. A. Deokar, L. M. Waghmare // International journal of electric power and energy systems. – 2014. – vol. 61, October. – pp. 594-605. DOI: 10.1016/j.ijepes.2014.04.015

267. Development of conductive parts power losses calculation method in case of interharmonics / D. S. Osipov [et al.] // Przegląd Elektrotechniczny. – 2017. – NR 6. pp. 146-149. DOI: 10.15199/48.2017.06.33

268. Discrete wavelet transform optimal parameters estimation for arc fault detection in low-voltage residential power networks / P. Qi [et al.] // Electric power systems research. – 2017. – vol. 143, February. – pp. 130-139. DOI: 10.1016/j.epsr.2016.10.008

269. Dong, X. Identifying single-phase-to-ground fault feeder in neutral noneffectively grounded distribution system using wavelet transform / X. Dong, S. Shi // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2008. – vol. 23, issue 4. – pp. 1829-1837. DOI: 10.1109/TPWRD.2008.917924

270. Dwivedi, U. D. A Wavelet-based denoising technique for improved monitoring and characterization of power quality disturbances / U. D. Dwivedi, S. N. Singh // Electric Power Components and Systems. – 2009. – vol.37, no.7. – pp. 753-769. DOI: 10.1080/15325000902762281

271. Eidson, B. An evaluation of the extent of correlation between interharmonic and voltage fluctuation measurements / B. Eidson, M. Halpin // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2016. – vol. 31, issue 2. – pp. 753-760. DOI: 10.1109/tpwrd.2015.2480715

272. EN 50160:2010 «Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution networks».

273. Farughian, A. Review of methodologies for earth fault indication and location in compensated and unearthing MV distribution networks / A. Farughian, L. Kumpulainen, K. Kauhaniemi // Electric power systems research. – 2018. – vol. 154, January. – pp. 373-380. DOI: 10.1016/j.epsr.2017.09.006

274. Feed-forward artificial neural network–discrete wavelet transform approach to classify power system transients / M. A. Beg [et al.] // Electric Power Components and Systems. – 2013. – vol.41, no.6. – pp. 586-604. DOI: 10.1080/15325008.2012.755235

275. Gaing, Z. L. Wavelet-based neural network for power disturbance recognition and classification / Z. L. Gaing // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2004. – vol. 19, issue 4. – pp. 1560-1568. DOI: 10.1109/TPWRD.2004.835281

276. Gapless power-quality disturbance recorder / L. R. M. Silva [et al.] // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2017. – vol. 32, issue 2. – pp. 862-871. DOI: 10.1109/tpwrd.2016.2557280

277. Ghaderi, A. High impedance fault detection: A review / A. Ghaderi, H. L. Ginn, H. A. Mohammadpour // Electric power systems research. – 2017. – vol. 143, February. – pp. 376-388. DOI: 10.1016/j.epsr.2016.10.021

278. Ghaffarzadeh, N. A new protection scheme for high impedance fault detection using wavelet packet transform / N. Ghaffarzadeh, B. Vahidi // Advances in Electrical and Computer Engineering. – 2010. – vol.10, no.3. – pp. 17-20. DOI: 10.4316/AECE.2010.03003

279. Gil-de-Castro, A. Light intensity variation (flicker) and harmonic emission related to LED lamps / A. Gil-de-Castro, S. K. Rönnberg, M. H. J. Bollen // Electric power systems research. – 2017. – vol. 146, May. – pp. 107-114. DOI: 10.1016/j.epsr.2017.01.026

280. Gök, M. Research and implementation of a USB interfaced real-time power quality disturbance classification system / M. Gok, I. Sefa // Advances in Electrical and Computer Engineering. – 2017. – vol.17, no.3. – pp. 61-70. DOI: 10.4316/AECE.2017.03008

281. Gu, I. Y.-H. Estimating interharmonics by using sliding-window ESPRIT / I. Y.-H. Gu, M. H. J. Bollen // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2008. – vol. 23, issue 1. – pp. 13-23. DOI: 10.1109/tpwrd.2007.911130

282. Gu, Y. H. Time-frequency and time-scale domain analysis of voltage disturbances / Y. H. Gu, M. H. J. Bollen // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2000. – vol. 15, issue 4. – pp. 1279-1284. DOI: 10.1109/61.891515

283. Guo, M.-F. Wavelet-transform based early detection method for short-circuit faults in power distribution networks / M. -F. Guo, N.-C. Yang, L.-X. You // International journal of electric power and energy systems. – 2018. – vol. 99, July. – pp. 706-721. DOI: 10.1016/j.ijepes.2018.01.013

284. Hamid, E. Y. Wavelet-based data compression of power system disturbances using the minimum description length criterion / E. Y. Hamid, Z.-I.

Kawasaki // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2002. – vol. 17, issue 2. – pp. 460-466. DOI: 10.1109/61.997918

285. Harmonic impedance measurement based on short time current injections / H. L. M. Monteiro [et al.] // Electric power systems research. – 2017. – vol. 148, July. – pp. 108-116. DOI: 10.1016/j.epsr.2017.03.031

286. He, H. A self-organizing learning array system for power quality classification based on wavelet transform / H. He, J. A. Starzyk // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2006. – vol. 21, issue 1. – pp. 286-295. DOI: 10.1109/TPWRD.2005.852392

287. High impedance fault detection in power distribution systems using wavelet transform and evolving neural network / S. Silva [et al.] // Electric power systems research. – 2018. – vol. 154, January. – pp. 474-483. DOI: 10.1016/j.epsr.2017.08.039

288. High-resolution spectrum-estimation methods for signal analysis in power systems / T. Lobos [et al.] // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. . – 2006. – vol. 55, issue 1. – pp. 219-225. DOI: 10.1109/tim.2005.862015

289. Hizam, H. Wavelet transforms: practical applications in power systems / H. Hizam, M. F. Akorede // Journal of Electrical Engineering & Technology. – 2009. – vol. 4, No. 2. – pp. 168-174. DOI: 10.5370/JEET.2009.4.2.168

290. Hong, Y.-Y. Locating switched capacitor using wavelet transform and hybrid principal component analysis network / Y.-Y. Hong, B.-Y. Chen // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2007. – vol. 22, issue 2. – pp. 1145-1152. DOI: 10.1109/tpwrd.2007.893435

291. Hui, J. A Method to determine the existence of genuine interharmonics / J. Hui, W. Xu, H. Yang // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2012. – vol. 27, issue 3. – pp. 1690-1692. DOI: 10.1109/tpwrd.2012.2198313

292. IEC 61000-4-7:2002 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-7: Testing and measurement techniques - General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto

293. IEEE Guide for the application of neutral grounding in electrical utility systems—Part I: Introduction. IEEE Std C62.92.1-2016. DOI: 10.1109/IEEESTD.2017.7891430

294. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, IEEE Standard DOI: 10.1109/IEEESTD.2014.6826459

295. IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions. IEEE Std 1459-2010. DOI: 10.1109/ieeeestd.2010.5439063

296. Integrated fault location and power-quality analysis in electric power distribution systems / A. A. Biscaro [et al.] // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2016. – vol. 31, issue 2. – pp. 428-436. DOI: 10.1109/tpwrd.2015.2464098

297. Integrated use of time-frequency wavelet decompositions for fault location in distribution networks: theory and experimental validation / A. Borghetti [et al.] // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2010. – vol. 25, issue 4. – pp. 3139-3146. DOI: 10.1109/tpwrd.2010.2046655

298. Interharmonics: theory and modeling / A. Testa [et al.] // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2007. – vol. 22, issue 4. – pp. 2335-2348. DOI: 10.1109/TPWRD.2007.905505

299. Jain, S. K. Low-order dominant harmonic estimation using adaptive wavelet neural network / S. K. Jain, S. N. Singh // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2014. – vol. 61, issue 1. – pp. 428-435. DOI: 10.1109/tie.2013.2242414

300. Karimi, M. Wavelet based on-line disturbance detection for power quality applications / M. Karimi, H. Mokhtari, M. R. Iravani // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2000. – vol. 15, issue 4. – pp. 1212-1220. DOI: 10.1109/61.891505

301. Kusko, A. Power quality in electrical systems / A. Kusko, M. Thompson. McGraw-Hill Education. – 2007. – 241 p.

302. Latran, M. B. A novel wavelet transform based voltage sag / swell detection algorithm / M. B. Latran, A. Teke // International journal of electric power and energy systems. – 2015. – vol. 71, October. – pp. 131-139. DOI: ijepes.2015.02.040

303. Lazzaretti, A. E. An accurate approach for automatic segmentation of power distribution voltage waveforms / A. E. Lazzaretti, H. Vieira Neto, V. H. Ferreira // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2015. – vol. 30, issue 3. – pp. 1611-1619. DOI: 10.1109/tpwrd.2015.2410173

304. León-Martínez, V. Formulations for the apparent and unbalanced power vectors in three-phase sinusoidal systems / V. León-Martínez, J. Montañana-Romeu // Electric power systems research. – 2018. – vol. 160, July. – pp. 37-43. DOI: 10.1016/j.epsr.2018.01.028

305. Mahmoudpour, N. Implementation of an integrated online instantaneous discrete wavelet transform decomposition toolbox in ATP-EMTP / N. Mahmoudpour, F. Haghjoo, S. M. Shahrtash // International journal of electric power and energy systems. – 2015. – vol. 68, June. – pp. 373-383. DOI: 10.1016/j.ijepes.2014.12.067

306. Mazhari, S. M. A novel frequency-domain approach for distributed harmonic analysis of multi-area interconnected power systems / S. M. Mazhari, S. Montaser Kouhsari, A. Ramirez // Electric power systems research. – 2017. – vol. 143, February. – pp. 669-681. DOI: 10.1016/j.epsr.2016.10.048

307. Megahed, A.I. Usage of wavelet transform in the protection of series-compensated transmission lines / A.I. Megahed, M. Moussa and Bayoumy // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2006. – vol. 21, issue 3. – pp. 1213-1221. DOI: 10.1109/TPWRD.2006.876981

308. Meng, J. Zero-sequence voltage trajectory analysis for unbalanced distribution networks on single-line-to-ground fault condition / J. Meng [et al.] // Electric power systems research. – 2018. – vol. 161, August. – pp. 17-25. DOI: 10.1016/j.epsr.2018.03.024

309. Mishra, S. Detection and classification of power quality disturbances using S-Transform and probabilistic neural network / S. Mishra, C. N. Bhende, B. K. Panigrahi // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2008. – vol. 23, issue 1. – pp. 280-287. DOI: 10.1109/TPWRD.2007.911125

310. Moghadam Banayem, H. Flicker source tracing by wavelet transform / H. Moghadam Banayem, A. Doroudi, M. Poormonfared Azimi // Electric Power

Components and Systems. – 2015. – vol.43, no.4. – pp. 412-421. DOI: 10.1080/15325008.2014.987334

311. Morsi, W. G. Fuzzy-wavelet-based electric power quality assessment of distribution systems under stationary and nonstationary disturbances / W. G. Morsi, M. E. El-Hawary // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2009. – vol. 24, issue 4. – pp. 2099-2106. DOI: 10.1109/tpwrd.2009.2027514

312. Morsi, W. G. On the Implementation of time-frequency transforms for defining power components in non-sinusoidal situations: A survey. / W. G. Morsi, M. E. El-Hawary // Electric Power Components and Systems. – 2009. – vol.37, no.4. – pp. 373-392. DOI: 10.1080/15325000802548731

313. Morsi, W. G. Reformulating three-phase power components definitions contained in the IEEE Standard 1459–2000 using discrete wavelet transform / W. G. Morsi, M. E. El-Hawary // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2007. – vol. 22, issue 3. – pp. 1917-1925. DOI: 10.1109/tpwrd.2007.899776

314. Morsi, W. G. Wavelet packet transform-based power quality indices for balanced and unbalanced three-phase systems under stationary or nonstationary operating conditions / W. G. Morsi, M. E. El-Hawary // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2009. – vol. 24, issue 4. – pp. 2300-2310. DOI: 10.1109/tpwrd.2009.2027496

315. Morsi, W. Time-frequency single-phase power components measurements for harmonics and inter-harmonics distortion based on wavelet packet transform; Part II: case studies and results / W. Morsi, M. El-Hawary // Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering. – 2013. – vol. 35, issue 1. – pp. 8-14. DOI: 10.1109/cjece.2010.5783379

316. Morsi, W. Time-frequency single-phase power components measurements for harmonics and inter-harmonics distortion based on Wavelet Packet transform;Part I: Mathematical formulation / W. Morsi, M. El-Hawary // Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering. – 2013. – vol. 35, issue 1. – pp. 1-7. DOI: 10.1109/cjece.2010.5783378

- 317.** Naik, C. A. Power quality index based on discrete wavelet transform / C. A. Naik, P. Kundu // International journal of electric power and energy systems. – 2013. – vol. 53, December. – pp. 994-1002. DOI: 10.1016/j.ijepes.2013.06.024
- 318.** On the Interharmonic Components Generated by Adjustable Speed Drives / F. De Rosa [et al.] // IEEE Transactions on Power Delivery. – 205. – vol. 20, issue 4. – pp. 2535-2543. DOI: 10.1109/TPWRD.2005.852313
- 319.** On the issue of modeling non-sinusoidal modes of distribution networks / N. N. Kharlov [et al.] // 2016 11th International Forum on Strategic Technology, Proceeding of IFOST-2016, Novosibirsk 1-3 June, 2016. – pp. 222-226. DOI: 10.1109/ifost.2016.7884232
- 320.** Parameswaiah, C. Frequency characteristics of wavelets / C. Parameswaiah, M. Cox // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2002. – vol. 17, issue 3. – pp. 800-804. DOI: 10.1109/TPWRD.2002.1022806
- 321.** Poisson, P. Detection and measurement of power quality disturbances using wavelet transform / O. Poisson, P. Rioual, M. Meunier // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2000. – vol. 15, issue 3. – pp. 1039-1044. DOI: 10.1109/61.871372
- 322.** Pourahmadi-Nakhli, M. Path characteristic frequency-based Fault locating in radial distribution systems using wavelets and neural networks / M. Pourahmadi-Nakhli, Ali A. Safavi // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2011. – vol. 26, issue 2. – pp. 772-781. DOI: 10.1109/TPWRD.2010.2050218
- 323.** Power quality disturbance classification using a statistical and wavelet-based Hidden Markov Model with Dempster–Shafer algorithm / H. Dehghani [et al.] // International journal of electric power and energy systems. – 2013. – vol. 47, May. – pp. 368-377. DOI: 10.1016/j.ijepes.2012.11.005
- 324.** Power quality disturbance classification using the inductive inference approach / T. K. Abdel-Galil [et al.] // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2004. – vol. 19, issue 4. – pp. 1812-1818. DOI: 10.1109/TPWRD.2003.822533
- 325.** Power quality disturbance waveform recognition using wavelet-based neural classifier. I. Theoretical foundation / S. Santoso [et al.] // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2000. – vol. 15, issue 1. – pp. 222-228. DOI: 10.1109/61.847255

326. Power quality disturbance waveform recognition using wavelet-based neural classifier. II. Application / S. Santoso [et al.] // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2000. – vol. 15, issue 1. – pp. 229-235. DOI: 10.1109/61.847256

327. Practical considerations for reactive power sharing approaches among multiple-arm passive filters in non-sinusoidal power systems / Z. M. Ali [et al] // International journal of electric power and energy systems. – 2018. – vol. 103, December. – pp. 660-675. DOI: 10.1016/j.ijepes.2018.06.044

328. Qian, C. A power waveform classification method for adaptive synchrophasor estimation / C. Qian, M. Kezunovic // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2018. – vol. 67, issue 7. – pp. 1646-1658. DOI: 10.1109/tim.2018.2803938

329. Qian, H. Interharmonics analysis based on interpolating windowed FFT algorithm / H. Qian, R. Zhao, T. Chen // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2007. – vol. 22, issue 2. – pp. 1064-1069. DOI: 10.1109/tpwrd.2007.893187

330. Rapid voltage changes in power system networks and their effect on flicker / J. Barros [et al.] // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2016. – vol. 31, issue 1. – pp. 262-270 . DOI: 10.1109/tpwrd.2015.2452967

331. Rasoulpoor, M. Thermal assessment of sheathed medium voltage power cables under non-sinusoidal current and daily load cycle / M. Rasoulpoor, M. Mirzaie, S. M. Mirimani // Applied Thermal Engineering. – 2017. – vol. 123, August. – pp. 353-364. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.05.070

332. Rathore, B. Wavelet-alienation based protection scheme for multi-terminal transmission line / B. Rathore, A. G. Shaik // Electric power systems research. – 2018. – vol. 161, August. – pp. 8-16. DOI: 10.1016/j.epsr.2018.03.025

333. Real-time detection of transients induced by high-impedance faults based on the boundary wavelet transform / F. B. Costa [et al.] // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2015. – vol. 51, issue 6. – pp. 5312-5323. DOI: 10.1109/tia.2015.2434993

334. Real-time power measurement using the maximal overlap discrete wavelet-packet transform / D. K. Alves [et al.] // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2017. – vol. 64, issue 4. – pp. 3177-3187. DOI: 10.1109/tie.2016.2637304

335. Ren, J. Real-time power system frequency and phasors estimation using recursive wavelet transform / J. Ren, M. Kezunovic // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2011. – vol. 26, issue 3. – pp. 1392-1402. DOI: 10.1109/tpwrd.2011.2135385

336. Rifai, M. R. Evaluation of current interharmonics from AC drives / M. R. Rifai, T. H. Ortmeyer, W. J. McQuillan // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2000. – vol. 15, issue 3. – pp. 1094-1098. DOI: 10.1109/61.871380

337. Saleh, S. A. Implementation of a dynamic voltage restorer system based on discrete wavelet transforms / S. A. Saleh, C. R. Moloney, M. A. Rahman // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2008. – vol. 23, issue 4. – pp. 2366-2375. DOI: 10.1109/tpwrd.2008.2002868

338. Selective interharmonic compensation to improve statcom performance for lightflicker mitigation / L. Feola [et al] // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2018. – vol. 33, issue 5. – pp. 2442-2451. DOI: 10.1109/tpwrd.2018.2810333

339. Senra, R. Assessment of the harmonic currents generated by single-phase nonlinear loads / R. Senra, W. C. Boaventura, E. M. A. M. Mendes // Electric power systems research. – 2017. – vol. 147, June. – pp. 272-279. DOI: 10.1016/j.epsr.2017.02.028

340. Senroy, N. An improved Hilbert–Huang method for analysis of time-varying waveforms in power quality / N. Senroy, S. Suryanarayanan, P. F. Ribeiro // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2007. – vol. 22, issue 4. – pp. 1843-1850. DOI: 10.1109/TPWRS.2007.907542

341. Shaik, A. G. Power quality assessment and event detection in hybrid power system / A. G. Shaik, O. P. Mahela // Electric power systems research. – 2018. – vol. 161, August. – pp. 26-44. DOI: 10.1016/j.epsr.2018.03.026

342. Silva, K. M. Fault detection and classification in transmission lines based on wavelet transform and ANN / K. M. Silva, B. A. Souza, N. S. D. Brito // IEEE

Transactions on Power Delivery. – 2006. – vol. 21, issue 4. – pp. 2058-2063. DOI: 10.1109/TPWRD.2006.876659

343. Tofoli, F. L. On the study of losses in cables and transformers in nonsinusoidal conditions / F. L. Tofoli, S. M. R. Sanhueza, A. de Oliveira // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2006. – vol. 21, issue 2. – pp. 971-978. DOI: 10.1109/tpwrd.2006.870986

344. Visualizing time-varying power quality indices using generalized empirical wavelet transform / T. Karthik [et al.] // Electric power systems research. – 2017. – vol. 143, February. – pp. 99-109. DOI: 10.1016/j.epsr.2016.10.017

345. Voltage sag and swell detection and segmentation based on independent component analysis / E. A. Nagata [et al.] // Electric power systems research. – 2018. – vol. 155, February. – pp. 274-280. DOI: 10.1016/j.epsr.2017.10.029

346. Wavelet analysis of a memristor emulated model proposed for compact fluorescent lamp operated systems / Y. Babacan [et al.] // Electric power systems research. – 2018. – vol. 160, July. – pp. 56-62. DOI: 10.1016/j.epsr.2018.02.001

347. Wavelet-based reactive power and energy measurement in the presence of power quality disturbances / Morsi, W. G. [et al.] // IEEE Transactions on Power Systems. – 2011. – vol. 26, issue 3. – pp. 1263-1271. DOI: 10.1109/tpwrs.2010.2093545

348. Yanchenko, S. Modeling harmonic amplification effects of modern household devices / S. Yancenko, A. Kulikov, S. Tsyruk // Electric power systems research. – 2018. – vol. 163, October. – pp. 28-37. DOI: 10.1016/j.epsr.2018.05.021

349. Yang, H. T. A de-noising scheme for enhancing wavelet-based power quality monitoring system / H. T. Yang, Liao C. C. // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2001. – vol. 16, issue 3. – pp. 353-360. DOI: 10.1109/61.924810

350. Yang, K. Interharmonic currents from a Type-IV wind energy conversion system / K. Yang, M. H. J. Bollen // Electric power systems research. – 2017. – vol. 143, February. – pp. 357-364. DOI: 10.1016/j.epsr.2016.09.010

351. Yong, J. A method to estimate the impact of harmonic and unbalanced currents on the ampacity of concentric neutral cables / J. Yong, W. Xu // IEEE

Transactions on Power Delivery. – 2016. – vol. 31, issue 5. – pp. 1971-1979. DOI: 10.1109/tpwrd.2014.2331852

352. Zhang, F. The algorithm of interpolating windowed FFT for harmonic analysis of electric power system / F. Zhang, Z. Geng, W. Yuan // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2001. – vol. 16, issue 2. – pp. 160-164. DOI: 10.1109/61.915476

353. Zhao, F. Power-quality disturbance recognition using S-transform / F. Zhao, R. Yang // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2007. – vol. 22, issue 2. – pp. 944-950. DOI: 10.1109/TPWRD.2006.881575

Приложение А. Акты внедрения



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ «РН-ЮГАНСКНЕФТЕГАЗ» (ООО «РН-Юганскнефтегаз»)

ул. Ленина, 26, г. Нефтеюганск, ХМАО-Югра, Российская Федерация, 628309
Телефон: (3463) 33-51-64, факс: (3463) 21-70-17, e-mail: sorm-1ng@ng.rosneft.ru
ОКПО 76841742, ОГРН 1058602819538, ИНН / КПП 8604035473 / 860401001

АКТ о внедрении (использовании) результатов диссертационной работы Осипова Дмитрия Сергеевича

на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности
05.14.02

Результаты теоретических и экспериментальных исследований, и полученные в диссертации Д.С. Осипова алгоритмы анализа режимов работы систем электроснабжения на основе методов вейвлет преобразования были применены в рамках выполнения договора №2140317/1428Д от «01» июля 2017г. на оказание инжиниринговых услуг по расчету статической и динамической устойчивости сетей ООО «РН-Юганскнефтегаз» на ПС 110/35/6кВ. Предложенная в диссертации методика 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, динамической устойчивости.

И.о. заместителя главного инженера-
главный энергетик ООО «РН-Юганскнефтегаз»

С.Ш. Шарифуллин

Начальник ПДС УЭТО
ООО «РН-Юганскнефтегаз»

Р.А. Ульбаев

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора – главный
инженер филиала ПАО «МРСК
Сибири» – Омскэнерго»


 С.В. Капитонов

« ____ » 2018 г.



АКТ
о внедрении (использовании) результатов
диссертационной работы
канд. техн. наук, доцента кафедры
«Электроснабжение промышленных предприятий»
Осипова Дмитрия Сергеевича

Комиссия в составе начальника диспетчерской службы Центра Управления Сетями Матвиенко П.Н., начальника службы режимов ЦУС Волкова А.А. составила настоящий акт о том, что в филиале ПАО «МРСК Сибири» – Омскэнерго используются следующие результаты диссертационной работы Осипова Д.С.:

1) Методика и алгоритм расчета интегральных характеристик (действующих значений напряжений в узлах, мощности и потерь энергии) для нормальных, аварийных и послеаварийных режимов в электрических сетях при наличии нагрузки с нелинейными вольт-амперными характеристиками на основе вейвлет преобразования.

2) Методы и алгоритмы расчета переходных процессов электрических цепей (симметричных и несимметричных коротких замыканий) с применением рекурсивных методов и вейвлет анализа.

Полученные Осиповым Д.С. результаты позволяют повысить точность расчета дополнительных потерь в токоведущих частях при отклонении показателей качества электроэнергии от установленных в ГОСТ нормативов.

Начальника
Диспетчерской Службы ЦУС


 П.Н.Матвиенко

Начальника службы
электрических режимов ЦУС


 А.А.Волков



Инженерная
Компания
Сибири

ООО «Инженерная Компания Сибири»
ИНН/КПП 2460248389/246001001

660075, Россия
г. Красноярск, ул. Маерчака, 8
тел./факс: +7 (391) 290-44-07

info@iksib.ru
www.iksib.ru

«УТВЕРЖДАЮ»

генеральный

ООО «Инженерная Компания Сибири»

Б. В. Новиков



10 ноября 2018 г.

АКТ

об использовании материалов диссертационной работы

Осипова Дмитрия Сергеевича,

представленной на соискание ученой степени доктора технических наук

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы
Осипова Дмитрия Сергеевича, а именно:

- методика и алгоритм расчета параметров несинусоидальных режимов систем электроснабжения на основе пакетного вейвлет преобразования;
- методика расчета дополнительных потерь от высших гармоник и интергармоник для нестационарных режимов систем электроснабжения на основе математического аппарата вейвлет преобразования;

используются в ООО «Инженерная Компания Сибири» (г. Красноярск) при разработке технико-экономических рекомендаций по модернизации и внедрению фильтрокомпенсирующих устройств в распределительных сетях 0,4 кВ для сокращения потерь в токоведущих частях и повышению энергоэффективности проектируемых и эксплуатируемых систем электроснабжения.

Главный инженер проекта

Главный инженер проекта

С.А. Ващенко

М.В. Орлов

Общество с Ограниченной Ответственностью
«Райз Энерго»

ИНН 5507233114 КПП 550701001
р/счет 40702810600300010778 в Ф-Л БАНКА ГПБ (АО) в г.Новосибирске 644112, г.Омск, пр. Комарова,9/2-79
к/счет 30101810900000000783 БИК 045279828 т. 89045861819 e-mail: riseenergo@rambler.ru

27.11.2018 г.

АКТ

об использовании материалов диссертационной работы

Осипова Дмитрия Сергеевича,

представленной на соискание ученой степени доктора технических наук

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы Осипова Дмитрия Сергеевича, а именно:

- методика цифровой фильтрации и гармонического анализа на основе алгоритмов вейвлет преобразования при обработке результатов измерения показателей качества электроэнергии и графиков электрических нагрузок;
- методика расчета дополнительных потерь мощности и электрической энергии в токоведущих частях от высших гармоник и интергармоник для нестационарных режимов систем электроснабжения на основе математического аппарата вейвлет преобразования;

используются в ООО «Райз Энерго» при проведении инструментальных энергетических обследований предприятий электросетевого комплекса, а также при разработке технических и организационных мероприятий по повышению энергоэффективности обследуемых объектов.

Директор ООО «Райз Энерго»



Ходулин О.А.

Общество с ограниченной ответственностью
«ГРАНАТ»

644116 г.Омск, ул.36 Северная, 5
[сайт http://tso-granat.ru/.](http://tso-granat.ru/)

ИНН 5503219060 КПП 550301001
 Тел.985-387 тел.(факс)681-559

УТВЕРЖДАЮ

Исполнительный директор

ТСО ООО «Гранат»

Иванов И.Н.

" ____ " ноября 2018 г.

АКТ-СПРАВКА
 внедрения результатов диссертационной работы
 Осипова Дмитрия Сергеевича,
 в территориальной сетевой организации (ТСО)
 Общество с ограниченной ответственностью «Гранат»

Комиссия в составе: исполнительного директора ООО «Гранат» Иванова И. Н., главного энергетика ООО «Гранат» Кацмана В.В. провела анализ диссертационной работы Осипова Д.С. и составили настоящую акт-справку о том, что результаты диссертационной работы Осипова Д.С.:

– методы, способы и вычислительные алгоритмы идентификации и оценки отклонения от требуемого уровня показателя качества электроэнергии (несинусоидальность, колебания напряжения, интергармоники) по величине и характеру изменения коэффициентов пакетного вейвлет преобразования, заданных в относительных единицах;

– алгоритм на основе пакетного вейвлет преобразования для расчета дополнительных потерь в токоведущих частях от воздействия высших гармоник;

используются в ООО «Гранат» являющейся территориальной сетевой организацией, оказывающей услуги по передачи электрической энергии с использованием объектов электросетевого хозяйства, при проведении работ по расчету нормативов потерь в сетях находящихся на балансе организации, для оценки показателей качества электрической энергии на шинах ТП 10/0,4 кВ и в точках общего присоединения, анализе влияния потребителей на величину потерь мощности в кабельных линиях.

Исполнительный директор

Главный энергетик

И.Н. Иванов

В.В. Кацман



УТВЕРЖДАЮ:

Генеральный директор

ООО «Объединенная сетевая компания»

А.В. Воробьев

«_____»



2018

г.

АКТ
о внедрении (использовании)
результатов диссертационной работы
Осипова Дмитрия Сергеевича

на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности
05.14.02

Результаты теоретических и экспериментальных исследований и полученные в диссертации Д.С. Осипова используются в работе ООО «Объединенная сетевая компания» для расчета, анализа, нормирования и прогнозирования потерь в токоведущих частях. Разработанная Д. С. Осиповым методика определения дополнительных потерь на основе вейвлет преобразования применяется при разработке мероприятий по обеспечению показателей качества электроэнергии и повышению энергоэффективности эксплуатируемых электрических сетей.

Инженер-энергетик

Литвиненко Т.С.

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по учебной работе
Омского государственного
технического университета

А. В. Мишляев

« ____ » 20 ____ г.



АКТ

использования в учебном процессе
материалов диссертационной работы
доцента кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий»
Осипова Дмитрия Сергеевича

В Омском государственном техническом университете на кафедре «Электроснабжение промышленных предприятий» внедрены в учебный процесс результаты научных исследований, выполненные под научным руководством и при непосредственном участии к.т.н., доцента Осипова Дмитрия Сергеевича, а именно:

1. 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 в лекционных курсах и практических занятиях по дисциплинам «Электрические системы и сети» (лектор – доцент Гиршин С.С.), «Информационные основы диспетчерского управления» (лектор – доцент Рысов П.В.).

2. Методы и алгоритмы расчета переходных процессов электрических цепей с применением рекурсивных методов в лекционных курсах и практических занятиях по дисциплинам «Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах» (лектор – доцент Эрнст А.Д.), «Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах», «Устойчивость узлов нагрузки систем электроснабжения» (лектор – доцент Осипов Д.С.).

3. Материалы научных исследований Д.С. Осипова нашли отражения в следующих учебных пособиях:

1) Режимы работы нейтралей систем электроснабжения объектов : учеб. пособие / [В. А. Ощепков и др.] ; под общ. ред. В. А. Ощепкова ; Минобрнауки России, ОмГТУ. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2017.

2) Основы проектирования систем электроснабжения городов :учеб. пособие / [В. К. Грунин и др.] под общ. ред. В. К. Грунина ; Омск: Изд-во ОмГТУ, 2014. – 164 с.

3) Основы электроснабжения городов учеб. пособие / [В. К. Грунин и др.] под общ. ред. В. К. Грунина ; Омск: Изд-во ОмГТУ, 2012. – 141 с.

Результаты внедрения способствуют улучшению качества подготовки специалистов по электрическим станциям и электроэнергетическим системам по указанным дисциплинам.

Зав. кафедрой «Электроснабжение
промышленных предприятий»,
д.т.н., профессор

В.Н. Горюнов

Приложение Б. Патент и свидетельства о регистрации программ







