



ПОЛИТЕХ

Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

На правах рукописи

ТОРОПОВА АННА КОНСТАНТИНОВНА

**РАЗРАБОТКА ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДИК РАСЧЕТА
НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ В СИСТЕМАХ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

2.4.3. Электроэнергетика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2026

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

Научный руководитель: **Черепанов Вячеслав Васильевич**,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Баширов Мусса Гумерович**,
доктор технических наук, профессор, Институт нефтепереработки и нефтехимии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», заведующий кафедрой «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий», г. Салават

Вахнина Вера Васильевна,
доктор технических наук, профессор, Институт машиностроения, химии и энергетики, федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тольяттинский государственный университет», заведующий кафедрой «Электроснабжение и электротехника», г. Тольятти

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва

Защита состоится «03» апреля 2026 г. в 15 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета У.2.4.3.47 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: г. Санкт-Петербург, ул. Гжатская, д. 27, ауд. 305.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте www.spbstu.ru/science/the-department-of-doctoral-studies/defencescalendar/the-degree-ofcandidate-of-sciences/.

Автореферат разослан _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
У.2.4.3.47, канд. техн. наук



Никита Владимирович Образцов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Одним из мощных рычагов в развитии автоматизированного электропривода является широкое применение в нем полупроводниковой техники для питания двигателей постоянного тока и частотных преобразователей, питающих двигатели переменного тока. Особенностью работы вентильных преобразователей является наличие в сетевых токах спектра высших гармонических составляющих, которые растекаясь по системе электроснабжения создают в узлах электрической сети напряжения высших гармоник. Это приводит к ухудшению качества электрической энергии, перегреву оборудования, дополнительным потерям энергии в электрических сетях, снижению срока службы элементов системы электроснабжения и увеличению эксплуатационных затрат.

На стадии проектирования систем электроснабжения необходимо выполнять расчеты параметров режима высших гармоник для оценки соответствия качества напряжения требованиям ГОСТ 32144–2013 и выбора способов и средств снижения уровней высших гармоник напряжения. В зависимости от технологического процесса графики электрических нагрузок выпрямителей могут быть различными и спектральный состав сетевых токов выпрямителей должен рассчитываться при этом по разработанным для этого методикам. В настоящее время для ряда графиков нагрузок выпрямителей такие методики разработаны и применяются для решения инженерных задач. Вместе с тем для стохастических резкопеременных графиков нагрузки выпрямителей при неполной информации о режимах их работы методы расчета спектрального состава сетевых токов отсутствуют.

В диссертационной работе выполнена разработка вероятностно-статистических методик расчета спектрального состава токов высших гармоник выпрямителей при неполной информации о режимах их работы и предложена методика расчета параметров несинусоидального режима электрической сети предприятия.

Цель диссертационной работы. Развитие методик и разработка новых подходов к расчету параметров несинусоидальных режимов в системе электроснабжения, вызванных работой электроприводов с вентильными преобразователями, имеющих резкопеременную электрическую нагрузку стохастического характера при неполной информации о режиме работы выпрямителей.

Для достижения поставленной цели необходимо решить задачи:

1. Выполнить экспериментальные исследования графиков токов высших гармоник, генерируемых в сеть управляемыми выпрямителями, применяемыми в электроприводах технологического оборудования, и получить статистическую информацию о параметрах режима высших гармоник.
2. Получить аналитические выражения для расчета числовых характеристик случайных величин токов высших гармоник, генерируемых управляемыми выпрямителями при отсутствии сведений об углах управления и коммутации выпрямителей и с учетом стохастического резкопеременного характера их электрических нагрузок.
3. Разработать статистические модели токов высших гармоник, генерируемых управляемыми выпрямителями для различных интервалов осреднения электрической

нагрузки.

4. Разработать методику моделирования случайных процессов изменения токов высших гармоник управляемых выпрямителей с учетом стохастического характера изменения резкопеременной электрической нагрузки.

5. Разработать методику расчета параметров случайных величин токов и напряжений высших гармоник в электрической сети предприятия при подключении одного или нескольких электроприводов с управляемыми выпрямителями, отличающихся резкопеременным стохастическим характером электрических нагрузок.

Объект исследования. Система электроснабжения фанерного производства, включающая в себя лущильные станки, главные приводы которых оснащены управляемыми выпрямителями, имеющими резкопеременный график работы и генерирующими в сеть токи высших гармоник.

Предмет исследования. Электромагнитная совместимость управляемых выпрямителей со стохастической резкопеременной электрической нагрузкой с питающей их электрической сетью. Влияние несинусоидальных электрических нагрузок управляемых выпрямителей на несинусоидальность напряжения в узлах электрической сети.

Область исследования соответствует пунктам 10, 14, 19 паспорта специальности 2.4.3 «Электроэнергетика»:

п. 10: «Разработка цифровых ... методов анализа ... режимных параметров основного оборудования ... систем электроснабжения»;

п. 14: «Разработка методов расчета и моделирования установившихся режимов ... электроэнергетических систем и сетей, ... разработка методов управления режимами их работы»;

п. 19: «Разработка методов ... контроля, анализа и управления качеством электроэнергии».

Научная новизна.

1. Впервые выполнены исследования параметров несинусоидального режима системы электроснабжения фанерного производства и получены статистические законы распределения и их числовые характеристики спектра токов высших гармоник, генерируемых в электрическую сеть управляемыми электроприводами лущильных станков.

2. Предложены аналитические выражения для расчета амплитуд и фаз, математического ожидания, дисперсии и среднего квадратического отклонения канонических высших гармоник сетевых токов управляемых выпрямителей при отсутствии сведений об углах управления и коммутации выпрямителей на 10- и 30-минутном интервалах осреднения резкопеременной электрической нагрузки стохастического характера.

3. Разработан новый подход к моделированию случайных процессов изменения токов высших гармоник управляемых выпрямителей с резкопеременным графиком нагрузки стохастического характера с использованием теории случайных импульсных потоков. Предложен способ расчета группового графика случайного процесса тока

высших гармоник в электрической сети.

4. Предложена методика расчета параметров несинусоидального режима системы электроснабжения промышленного предприятия, учитывающая стохастический характер изменения электрической нагрузки при отсутствии сведений об углах управления и коммутации выпрямителей.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Результаты экспериментальных исследований параметров несинусоидального режима в системах электроснабжения фанерных производств.

2. Методика расчета амплитудного спектра токов высших гармоник управляемых выпрямителей при отсутствии информации об углах управления и коммутации выпрямителей и случайном характере изменения их нагрузок.

3. Методика расчета основных числовых характеристик случайных процессов токов высших гармоник электроприводов с управляемыми выпрямителями, основанная на применении решетчатых моделей, интерполированных сплайн-функциями первой степени.

4. Методика расчета числовых характеристик случайных величин напряжения высших гармоник в узлах и токов в ветвях системы электроснабжения при стохастическом характере изменения электрической нагрузки управляемых выпрямителей.

Практическая значимость результатов диссертационной работы:

1. Разработанная методика расчета спектрального состава токов высших гармоник электроприводов при отсутствии информации об углах управления и коммутации управляемых выпрямителей с учетом стохастического характера изменения их нагрузок позволяет определять основные числовые характеристики случайных величин токов высших гармоник с погрешностью менее 3 %.

2. Предложенные математические модели основных числовых характеристик случайных процессов токов высших гармоник, генерируемых в сеть управляемыми выпрямителями, разработанные алгоритм и программное обеспечение для автоматизированного расчета числовых характеристик группового графика случайного процесса токов высших гармоник рекомендуется использовать при определении пиковых токов для выбора автоматических выключателей, отстройке устройств релейной защиты и автоматики, расчете помех для работы различных электрических устройств, облегчающий и ускоряющий расчет колебаний напряжений, создаваемых электроприводами.

3. Разработанную методику расчета числовых характеристик случайных величин параметров режима высших гармоник в системе электроснабжения рекомендуется использовать при выборе средств и методов снижения гармонических составляющих напряжения в электрической сети.

4. Разработанные методики расчета параметров режима высших гармоник в системах электроснабжения рекомендуется использовать при проектировании новых и модернизации существующих фанерных производств и других предприятий с аналогичными характеристиками электрических нагрузок.

Методы исследования. Для реализации поставленных целей и решения

исследовательских задач применялся комплекс экспериментальных и теоретических методов. Экспериментальная часть работы проводилась на действующем промышленном объекте, в составе которого имеются электроприемники, генерирующие в сеть токи высших гармоник. В ходе исследования использовались методы математической статистики, теории вероятности и теории случайных импульсов, опирающиеся на теоретические основы электропривода и электроснабжения. Расчетные процедуры и математическое моделирование выполнялись в программной среде C Sharp (C#). Проведение вычислительного эксперимента осуществлялось с применением оригинального программного обеспечения.

Достоверность и обоснованность полученных научных результатов, сделанных выводов и предложенных рекомендаций подтверждается:

1. В качестве исходных данных использованы результаты исследований, проведенных в реальных условиях действующего фанерного производства.

2. Разработанные математические модели токов высших гармоник и методики расчета их основных числовых характеристик, основаны на корректном применении математических методов.

3. Для обработки экспериментальных данных и подтверждения их достоверности использовались апробированные программные продукты статистического анализа.

4. Расчетные значения токов высших гармоник, полученные с использованием предложенной методики, продемонстрировали высокую степень совпадения с результатами, зафиксированными в ходе экспериментальных исследований на действующем производственном объекте.

Внедрение результатов.

Результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, нашли практическое применение на ряде промышленных предприятий и в образовательном процессе. Так, на ООО «Мурашинский фанерный завод» результаты исследования применены для выбора ненастроенных фильтров для компенсации реактивной мощности, что способствовало оптимизации работы технологического оборудования и повышению надежности батарей конденсаторов. На ЗАО «ВТК Энерго» методики расчета параметров режима высших гармоник и программа для ЭВМ приняты для использования при проектировании и реконструкции электрических сетей предприятий с резкопеременными стохастическими нагрузками. Кроме того, научные разработки, представленные в диссертации, активно внедрены в образовательный процесс федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Вятский государственный университет». Они используются при подготовке и проведении лекционных и практических занятий по дисциплине «Качество и надежность электроснабжения» и выполнении выпускных квалификационных работ.

Апробация работы. Основные положения диссертации, ее отдельные решения и результаты докладывались ежегодно на заседаниях кафедры электроснабжения ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет» в 2021 – 2025 годах и обсуждались на XXII Всероссийской научно-практической конференции «Общество. Наука.

Инновации (НПК–2022)» (г. Киров, ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет», 11 – 29 апреля 2022 г.); на ЛII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, с элементами научной школы для молодежи «Фёдоровские чтения – 2022» (г. Москва, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», 15 – 18 ноября 2022 г.); на 81-й Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (г. Магнитогорск, ФГБОУ ВО Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 17 – 21 апреля 2023 г.); на Всероссийской научно-методической конференции, посвященной 60-летию образования Электротехнического факультета ВятГУ «Актуальные вопросы и современные тенденции развития электроэнергетики и электротехники» (г. Киров, ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет», 13 сентября 2023 г.).

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 8 печатных работах, в том числе в 4 изданиях, включенных в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки Российской Федерации. Имеется одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора. В опубликованных работах [6, 7] приведены результаты наблюдений, полученные лично автором при выполнении экспериментальных исследований на действующем объекте. В публикациях [8, 9] автором представлены результаты статистической обработки и анализа полученных экспериментальных данных на изучаемом объекте. Разработанные автором статистические диаграммы и методы моделирования токов высших гармоник, генерируемых управляемыми выпрямителями с резкопеременным стохастическим характером изменения электрической нагрузки, описаны в [1, 2]. В работах [3, 4] автором предложен способ расчета числовых характеристик группового графика случайного процесса токов высших гармоник, создаваемых несколькими источниками гармонических искажений, основанный на использовании теории совпадений импульсов и пауз случайных потоков. В свидетельстве [5] авторский вклад заключается в написание исходного текста программы, разработке программного модуля, программная реализация алгоритма, системное программирование.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 123 наименований и 4 приложений. Общий объем 162 страниц машинописного текста (включая список литературы), рисунки 27, таблицы 30. Общий объем приложения 4 страницы машинописного текста.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность разработки вероятностно-статистических методик расчета несинусоидальных режимов в системах электроснабжения, вызванных работой управляемых выпрямителей, отличающихся резкопеременной нагрузкой стохастического характера. Сформулированы цель диссертации, научная новизна и практическая значимость работы. Изложены основные положения, выносимые на защиту. Кратко описано содержание диссертации.

Первая глава описывает состояние проблемы анализа параметров несинусоидальных режимов в системах электроснабжения промышленных предприятий. Установлено, что наибольшее влияние на искажение синусоидальной формы напряжения оказывают статические преобразователи на основе полупроводниковых элементов. Эти устройства в процессе работы генерируют токи высших гармоник, что приводит к искажению синусоидальной формы напряжения и ухудшению качества электрической энергии.

Для расчета параметров режимов высших гармоник разработаны различные методики, основанные как на детерминированном, так и на вероятностно-статистическом подходах. Весомый вклад в развитие методов и методик расчета параметров режимов высших гармоник внесли Арриллага Дж., Гераскин О.Т., Жежеленко И.В., Картариди Н.Ю., Кучумов Л.А., Пахомов А.В., Родыгин А.В., Тимофеев Д.В., Трофимов Г.Г., Черепанов В.В. и другие. Однако существующие методики далеко не всегда адаптированы для практического применения в конкретных отраслях промышленности, что затрудняет их использование при проектировании и эксплуатации систем электроснабжения.

В результате анализа технической литературы установлено, что, в научных работах практически не рассматриваются источники гармонических искажений, характерные для предприятий, эксплуатирующих управляемые выпрямители при резкпеременном стохастическом характере электрических нагрузок, и отсутствуют методики расчета параметров несинусоидальных режимов в их электрических сетях. Настоящее исследование направлено на анализ электрических нагрузок электроприводов, работающих совместно с управляемыми выпрямителями, являющихся источниками высших гармоник, и разработку методик расчета параметров режимов высших гармоник в системах электроснабжения с данными агрегатами при наличии резкпеременной электрической нагрузке стохастического характера. В рамках диссертационного исследования предлагаются вероятностно-статистические методики оценки уровня гармонических составляющих при рассмотрении токов и напряжений высших гармоник как случайных величин, так и как случайных процессов. Данные подходы позволят прогнозировать уровень гармонических искажений и разрабатывать эффективные мероприятия по их снижению, что обеспечит повышение надежности работы электрооборудования и улучшение качества электрической энергии.

Во второй главе описываются экспериментальные исследования закономерностей изменения амплитуд и фаз гармоник тока выпрямителей главных приводов лущильных станков. Объектом экспериментального исследования выступили лущильные станки фирмы Raute, расположенные на территории фанерного предприятия в Кировской области. Рассматриваются станки двух типоразмеров – четырех- и восьмифутовый, которые различаются по ширине шпона. Главный привод станков – электродвигатель постоянного тока фирмы Siemens серии 1GG6 с номинальной мощностью 154 кВт. Управление электроприводом осуществляется с помощью тиристорного управляемого выпрямителя Siemens Sinamics DCM. Лущильные линии получают питание от двухтрансформаторной подстанции с трансформаторами мощностью 1600

кВА.

Спектральный анализ действующего значения тока (рисунок 1) главных приводов лущильных станков показал, что в гармоническом составе преобладают нечетные гармоники канонического порядка.

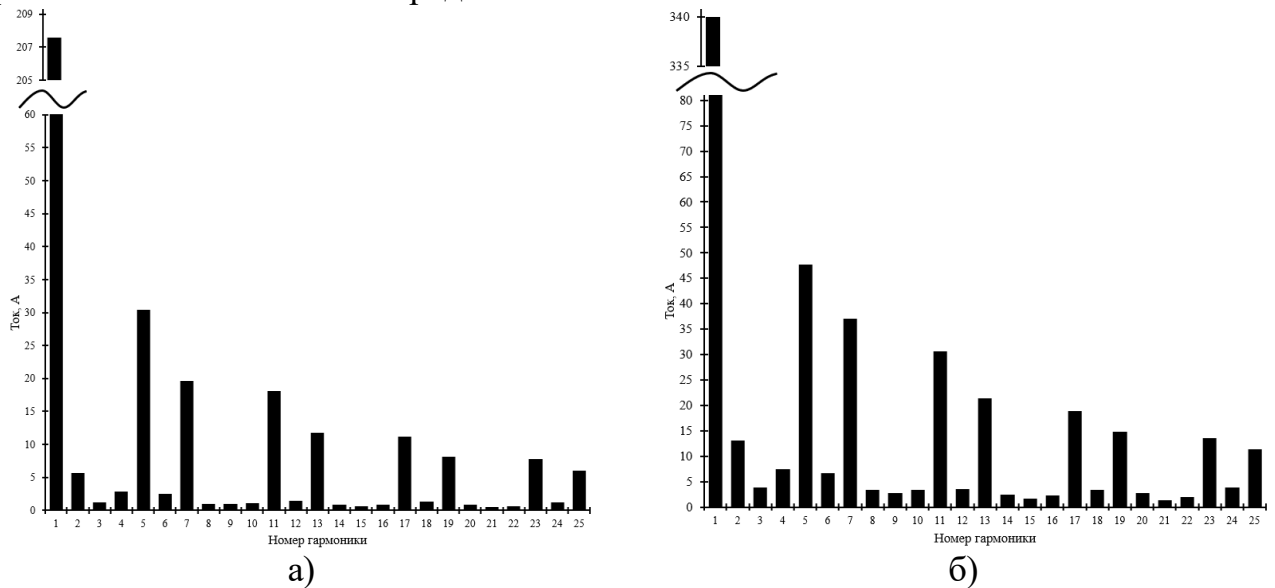


Рисунок 1 – Спектральный состав действующего значения тока главных приводов четырех- (а) и восьмифутового (б) лущильных станков

В результате исследований были получены статистические законы распределения действующего значения тока основной гармонической составляющей и высших гармоник, возникающих в токе выпрямительных устройств главных приводов лущильных станков. В качестве примера приведены законы распределения для действующего значения токов 7, 11 гармоник для четырех- и восьмифутового лущильных станков (рисунок 2).

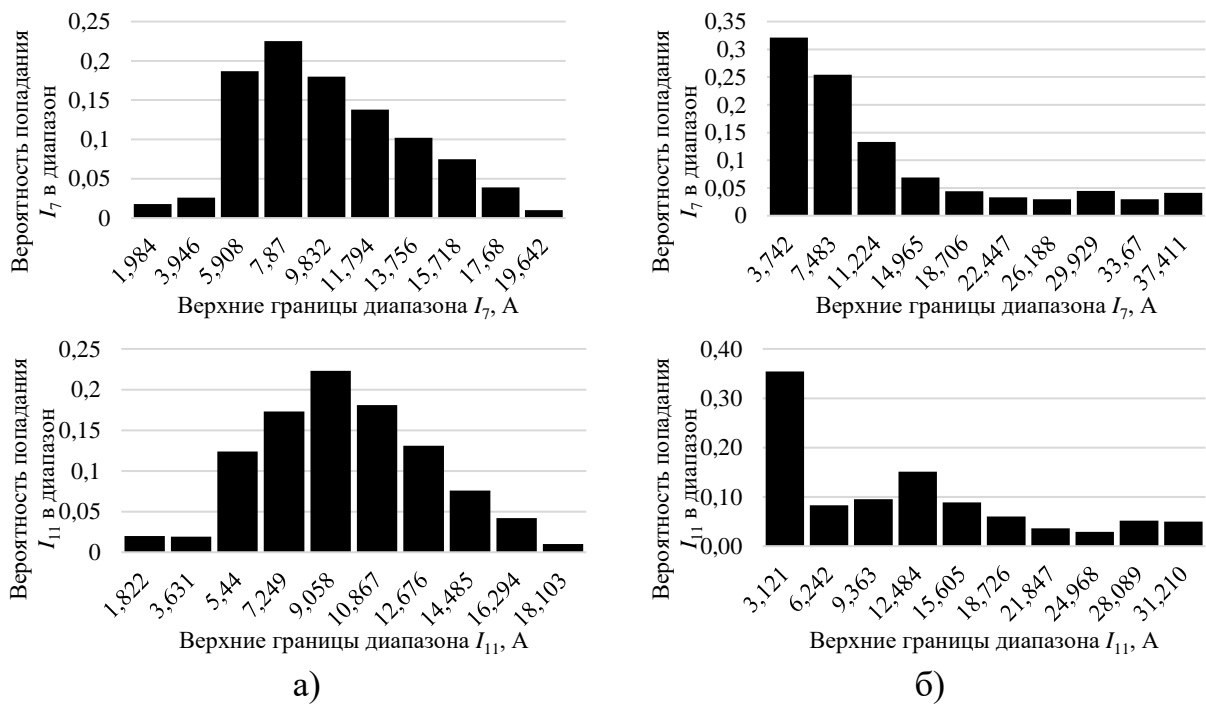


Рисунок 2 – Статистические законы распределения действующего значения токов 7, 11 гармоник четырех- (а) и восьмифутового (б) лущильных станков

Для других гармоник этих лущильных станков законы распределения будут аналогичными. На основании полученных экспериментальных данных определены математические ожидания, дисперсии, коэффициенты асимметрии и эксцесса токов канонических высших гармоник.

Главный привод лущильных станков функционирует в повторно-кратковременном режиме работы, при этом изменение нагрузки станков носит резкопеременный стохастический характер. В ходе исследования установлено, что классические расчетные нагрузочные диаграммы не дают полного представления о реальной работе лущильных станков, так как не учитывают случайные колебания нагрузки. В диссертационной работе была подтверждена необходимость использования статистических нагрузочных диаграмм, получаемых на основании реальных измерений (таблица 1).

Таблица 1 – Характеристики нагрузочной диаграммы действующего значения тока основной гармонической составляющей

Наименование лущильного станка	Длительность, с			Число колебаний электрической нагрузки за цикл	Максимальное значение импульса тока, А
	Холостой ход	Рабочий режим	Цикл		
Четырехфутовый	3	8	11	10	207,6
Восьмифутовый	4	6	10	22	345,2

Резкопеременные стохастические изменения нагрузки проявляются как в величине тока основной гармоники, так и в токах высших гармоник, формирующихся под влиянием случайных факторов, таких как колебания нагрузки, изменение режимов работы и нестабильность питающего напряжения. В качестве примера на рисунке 3 изображены фрагменты графиков изменения действующего значения токов пятой и одиннадцатой гармоник четырех- и восьмифутового лущильных станков соответственно. Для других гармоник этих лущильных станков графики будут аналогичными.

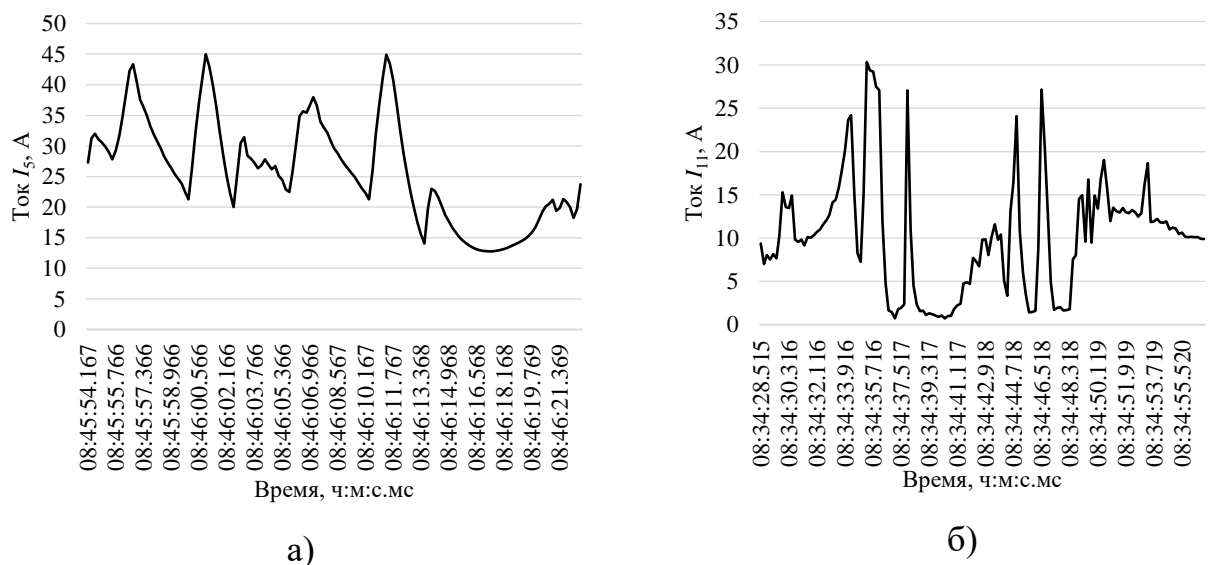


Рисунок 3 – Фрагменты графиков изменения действующего значения токов пятой гармоники четырехфутового (а) и одиннадцатой гармоники (б) восьмифутового лущильных станков

Результаты измерений и анализа параметров режимов работы главного привода лущильных станков указывают на необходимость разработки и внедрения вероятностно-статистических методик расчета параметров режимов высших гармоник не только в системах электроснабжения фанерных производств, но и в других отраслях промышленности при наличии нелинейных электрических нагрузок, изменяющихся резкопеременным случайным образом.

Третья глава посвящена разработке математических моделей сетевых токов высших гармоник. Установлено, что между действующими значениями канонических высших гармоник и основной гармонической составляющей тока управляемых выпрямителей существует линейная зависимость. В качестве примера на рисунке 4 представлена линейная аппроксимация зависимости действующего значения тока одиннадцатой гармоники (I_{11}) от действующего значения тока основной гармонической составляющей (I_1) на интервале осреднения 10 мин. для восьмифутового лущильного станка. Для других высших гармоник четырех- и восьмифутового лущильных станков графики будут аналогичными.

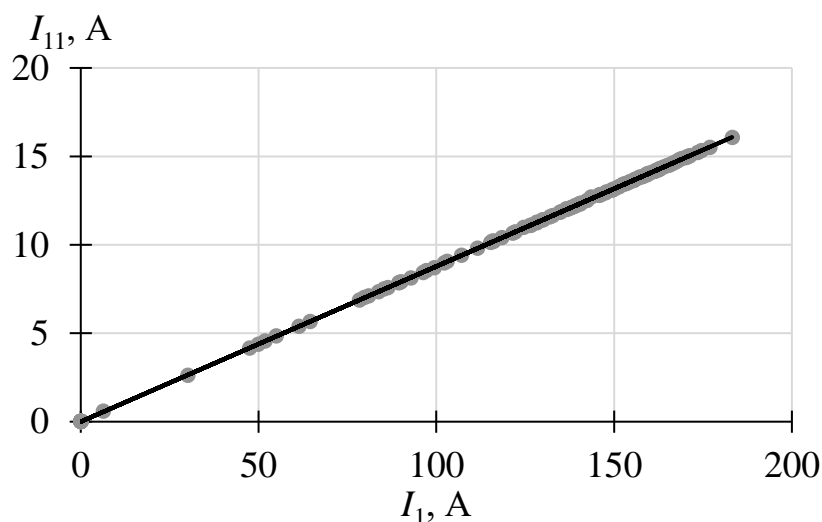


Рисунок 4 – Линейная аппроксимация зависимости действующего значения I_{11} от I_1 на интервале осреднения 10 мин. для восьмифутового лущильного станка

Определение спектрального состава сетевого тока управляемых выпрямителей лущильных станков стандартными методами, предложенными в научной литературе, приводит к большим погрешностям расчетов. Это связано с отсутствием информации об углах управления и коммутации управляемых выпрямителей, а также о параметрах уровня напряжения сети. В связи с этим было получено аналитическое выражения (1), позволяющее определить действующие значения токов канонических высших гармоник через ток основной гармонической составляющей выпрямителя лущильного станка, даже при отсутствии сведений об углах управления и коммутации:

$$I_n = a_n \cdot I_1, \quad (1)$$

где I_1 – действующее значение тока основной гармонической составляющей, А;

a_n – коэффициент, определенный экспериментальным путем для канонических гармоник до 25 порядка.

Расчеты, выполненные по предложенной формуле, демонстрируют высокую точность, причем погрешность во всех случаях не превышает 3 %.

Так как при проектировании системы электроснабжения промышленного предприятия имеются, как правило, следующие исходные данные: справочные значения коэффициентов использования и спроса, паспортные данные применяемого электрооборудования, то используя выражение (1), предлагается рассчитывать математическое ожидание токов канонических гармоник на 10- и 30-минутном интервалах осреднения по формуле:

$$M(I_n^{10,30}) = m_n \cdot M(I_1^{30}), \quad (2)$$

где $M(I_n^{10,30})$ – математическое ожидание действующего значения токов канонических гармоник на интервале осреднения 10 и 30 мин. соответственно, А;

$M(I_1^{30})$ – математическое ожидание действующего значения тока основной гармонической составляющей управляемого выпрямителя на интервале осреднения 30 мин., А;

m_n – коэффициент, определенный экспериментальным путем для канонических гармоник до 25 порядка.

Связь между математическим ожиданием и дисперсией действующего значения токов канонических гармоник на различных интервалах осреднения предлагается описывать формулой:

$$D(I_n^{10,30}) = d_n M(I_n^{10,30}), \quad (3)$$

где $D(I_n^{10,30})$ – дисперсия действующего значения токов канонических гармоник на интервале осреднения 10 и 30 мин. соответственно, А²;

d_n – коэффициент, определенный экспериментальным путем для канонических гармоник до 25 порядка.

Если в системе электроснабжения промышленного предприятия имеется несколько источников, генерирующих токи высших гармоник, подключенных к одному узлу, то предлагается определять математическое ожидание и дисперсию действительной и мнимой частей токов высших гармоник:

$$M(I_{нд}^{10,30}) = m_{нд} M(I_n^{10,30}); \quad (4)$$

$$M(I_{нм}^{10,30}) = m_{нм} M(I_n^{10,30});$$

$$D(I_{нд}^{10,30}) = d_{нд} M(I_n^{10,30}); \quad (5)$$

$$D(I_{нм}^{10,30}) = d_{нм} M(I_n^{10,30}),$$

где $M(I_{нд}^{10,30})$, $M(I_{нм}^{10,30})$ – математическое ожидание действительной и мнимой частей токов канонических гармоник на интервале осреднения 10 и 30 мин. соответственно, А;

$D(I_{нд}^{10,30})$, $D(I_{нм}^{10,30})$ – дисперсия действительной и мнимой частей токов канонических гармоник на интервале осреднения 10 и 30 мин. соответственно, А²;

$m_{нд}$, $m_{нм}$, $d_{нд}$, $d_{нм}$ – коэффициенты, определенные экспериментальным путем для действительной и мнимой частей токов канонических гармоник до 25 порядка соответственно.

Предложенная методика расчета и аналитические зависимости, предназначенные для определения основных числовых характеристик токов высших

гармоник, обладают универсальностью, поэтому их предлагается использовать при исследовании других технологических процессов, использующих управляемые выпрямители, которые функционируют в повторно-кратковременных режимах и характеризуются стохастической природой изменения нелинейной, резкопеременной электрической нагрузки, в том числе при отсутствии информации об углах управления и коммутации выпрямителей. Тем не менее, для обеспечения высокой достоверности и минимизации погрешностей вычислительных процедур представляется целесообразным для других производственных процессов проведение дополнительных экспериментальных исследований, направленных на уточнение численных значений коэффициентов, входящих в состав соответствующих математических выражений.

Расчет параметров несинусоидального режима системы электроснабжения требует создания математических моделей токов высших гармоник, генерируемых управляемыми выпрямителями. Наличие таких моделей позволит решить практические задачи обеспечения качества электроэнергии на стадии проектирования системы электроснабжения. Нестационарный случайный характер графиков изменения токов высших гармоник $I_n(t)$ в системе энергоснабжения значительно усложняет их изучение.

В качестве математической модели случайных процессов токов высших гармоник, возникающих в управляемом выпрямителе, характеризующемся резкопеременной нагрузкой стохастического характера, предложено использовать стационарные потоки случайных импульсов и пауз. Для описания основных числовых характеристик данных процессов предлагается применять решетчатые модели, интерполированные сплайн-функциями первой степени. Сплайн-функция для действующего значения тока высших гармоник, генерируемых источником, подключенным в q -м узле схемы, имеет вид:

$$I_{nq}(t) = \sum_{i=1}^{m-1} \left(\frac{t_{i+1} - t}{t_{i+1} - t_i} \cdot I_{nt_i} + \frac{t - t_i}{t_{i+1} - t_i} \cdot I_{nt_{(i+1)}} \right), \quad t \in [t_i; t_{i+1}], \quad (6)$$

где m – число циклов;

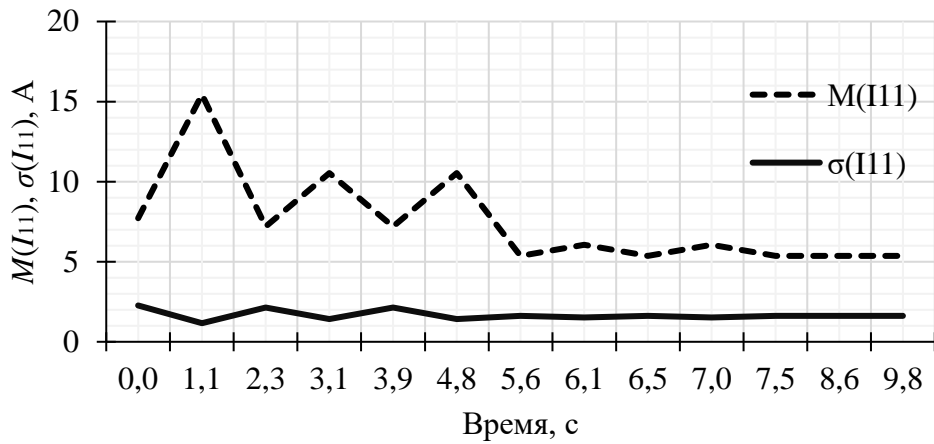
t_i – момент появления i -ого импульса, с;

t_{i+1} – момент появления $(i+1)$ импульса, с;

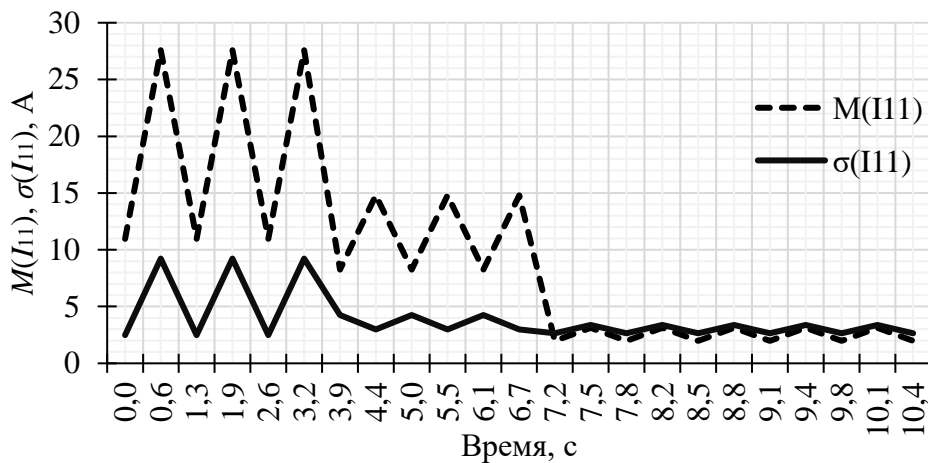
I_{nt_i} – величина амплитуды i -ого импульса в момент времени t_i , А;

$I_{nt_{(i+1)}}$ – величина амплитуды $(i+1)$ импульса в момент времени $t_{(i+1)}$, А.

Математические ожидания $M(I_n)$ и средние квадратические отклонения $\sigma(I_n)$ токов высших гармоник также будут описываться решетчатыми моделями и интерполироваться сплайн-функциями первой степени. На рисунке 5 представлен пример полигонов значений $M(I_n)$ и $\sigma(I_n)$ действующего значения тока одиннадцатой гармоники для четырех- и восьмифутового лущильных станков для периода загрузки главного привода, которые являются графическими моделями сплайн-функции $M(I_{11}(t))$ и $\sigma(I_{11}(t))$.



а)



б)

Рисунок 5 – Полигоны значений $M(I_{11})$ и $\sigma(I_{11})$ действующего значения тока для четырех- (а) и восьмифутового (б) луцильных станков

Если к шинам подстанции подключено несколько источников гармонических искажений, то возникает задача математического описания эквивалентного источника токов высших гармоник. Решение этой задачи предлагается на основе теории совпадений импульсов и пауз случайных потоков. Для расчета числовых характеристик группового графика случайного процесса токов высших гармоник, генерируемых управляемыми выпрямителями с резкопеременной стохастической нагрузкой необходимо:

1. Для исходных графиков токов высших гармоник рассчитать потоки единичных импульсов, где ширина импульсов и пауз равна их математическим ожиданиям, т.е. сформировать сплайн-функции, описывающие графики токов высших гармоник $A_1(t)$ и $A_2(t)$.

2. Осуществить сложение сплайн-функций $A_1(t)$ и $A_2(t)$, с учетом времени сдвига по предложенной в диссертационной работе методике.

3. Сформировать решетчатую модель группового графика токов высших гармоник $A_{\Sigma}(t)$, описываемую сплайн-функцией. Затем алгоритм повторяется для всех остальных графиков, поочередно добавляемых к $A_{\Sigma}(t)$.

Согласно приведенному порядку расчета осуществлено суммирование импульсов тока одиннадцатой гармоники четырех- и восьмифутового луцильных станков. На рисунке 6 в качестве примера представлен фрагмент суммарного графика

математического ожидания действующего значения тока при сложении одиннадцатых гармоник двух лущильных станков (четырёх- и восьмифутового).

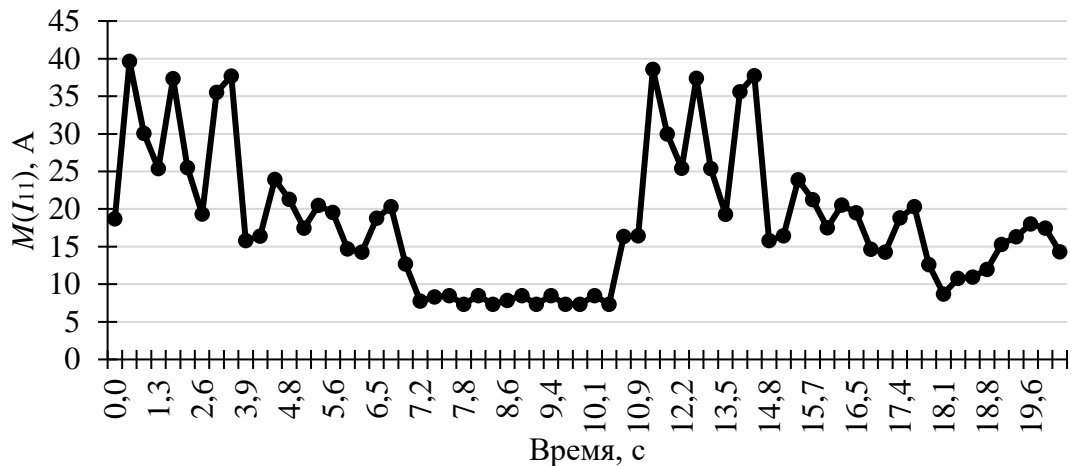


Рисунок 6 – Фрагмент суммарного графика математического ожидания действующего значения тока одиннадцатой гармоники, генерируемого четырех- и восьмифутовым лущильными станками

Определение числовых характеристик группового графика токов высших гармоник представляет собой достаточно сложную и трудоемкую задачу. Для полной автоматизации, упрощения и ускорения расчетов разработан алгоритм, реализованный в программной среде C Sharp (C#), что подтверждено свидетельством государственной регистрации № 2025618891 от 08.04.2025 г.

Предложенный подход позволяет адекватно описывать случайные процессы токов высших гармоник и учитывать их вариативность в реальных эксплуатационных условиях. Полученные математические модели предлагается использовать при определении пиковых токов для выбора автоматических выключателей, отстройке устройств релейной защиты и автоматики, расчете дозы фликера, вызываемого работой электроприводов и оценке влияния высших гармоник на работу других электроприемников.

В четвертой главе описывается разработанная методика расчета числовых характеристик параметров режима высших гармоник в электрической сети, питающей электропривода с управляемыми выпрямителями.

Разработана методика эквивалентирования числовых характеристик случайных величин токов высших гармоник, генерируемых в сеть управляемыми выпрямителями, подключенных к одному узлу системы электроснабжения при стохастическом характере резкопеременной электрической нагрузке.

Математическое ожидание и дисперсия суммарного тока n -ой гармоники от нескольких источников высших гармоник, подключенных к узлу q предлагается определять по формулам:

$$M(I_{nq\Sigma}) = \sqrt{(M(I_{ndq\Sigma}))^2 + (M(I_{nmq\Sigma}))^2} = \sqrt{\sum_k (M(I_{nqk}))^2 (m_{нд}^2 + m_{нм}^2)}; \quad (7)$$

$$\begin{aligned}
D(I_{nq\Sigma}) &= M(I_{nq\Sigma}^2) - (M(I_{nq\Sigma}))^2 \\
&= \sum_k (m_{нд}^2 + m_{нм}^2)(M(I_{nqk})^2 - (M(I_{nqk}))^2).
\end{aligned} \tag{8}$$

где $M(I_{ндq\Sigma})$, $M(I_{нмq\Sigma})$ – математическое ожидание суммы действительных и мнимых составляющих суммарного тока канонических гармоник соответственно, А;

$M(I_{nqk})$ – математическое ожидание действующего значения токов канонических гармоник от k -ого источника, А;

$m_{нд}$, $m_{нм}$, $d_{нд}$, $d_{нм}$ – коэффициенты, определенные экспериментальным путем для действительной и мнимой частей токов канонических гармоник до 25 порядка соответственно.

Предложен новый подход к расчету математического ожидания, дисперсии действующих значений напряжений высших гармоник в узлах и токов в ветвях схемы замещения электрической сети. Рассмотрено три возможных варианта расчета в зависимости от количества источников высших гармоник и места их расположения.

Вариант расчета 1. В системе электроснабжения присутствует только один источник высших гармоник. Математическое ожидание и дисперсия действующего значения напряжения n -й гармоники для всех узлов схемы замещения примет вид:

$$[M(U_n)] = M(I_{nq})[X_{yq}] = m_n M(I_{1q}^{30})[X_{yq}]; \tag{9}$$

$$[D(U_n)] = D(I_{nq})[X_{yq}^2] = d_n M(I_{nq})[X_{yq}^2], \tag{10}$$

где $M(I_{nq})$, $D(I_{nq})$ – математическое ожидание и дисперсия действующего значения тока n -й гармоники управляемого выпрямителя, подключенного к узлу q ;

$M(I_{1q}^{30})$ – математическое ожидание действующего значения тока основной гармонической составляющей управляемого выпрямителя, подключенного к узлу q , на интервале осреднения 30 мин.;

$[X_{yq}]$ – q -й столбец матрицы узловых сопротивлений;

$[X_{yq}^2]$ – q -й столбец матрицы квадратов узловых сопротивлений.

Математическое ожидание и дисперсия действующего значения тока n -й гармоники во всех ветвях схемы замещения примет вид:

$$[M(I_n)] = m_n M(I_{1q}^{30})[Y_{нв}]([X_{yN1}] - [X_{yN2}]); \tag{11}$$

$$[D(I_n)] = [M(I_n^2)] - [M(I_n)]^2, \tag{12}$$

где $[Y_{нв}]$ – диагональная матрица проводимостей ветвей току n -й гармоники;

$[X_{yN1}]$, $[X_{yN2}]$ – столбец матрицы узловых сопротивлений начал и концов ветви соответственно.

Вариант расчета 2. В системе электроснабжения присутствует несколько источников высших гармоник, находящихся в одном узле схемы. Математическое ожидание и дисперсия действующего значения напряжения n -й гармоники для всех узлов схемы замещения примет вид:

$$[M(U_n)] = [X_{yq}]M(I_{nq\Sigma}) = [X_{yq}] \sqrt{\sum_k (M(I_{nqk}))^2 (m_{нд}^2 + m_{нм}^2)}; \tag{13}$$

$$[D(U_n)] = [X_{yq}^2]D(I_{nq\Sigma}) == [X_{yq}^2] \sum_k (m_{нд}^2 + m_{нм}^2)(M(I_{nqk})^2 - (M(I_{nqk}))^2), \quad (14)$$

где $M(I_{nq\Sigma})$, $D(I_{nq\Sigma})$ – математическое ожидание и дисперсия суммарного тока n -ой гармоники от нескольких источников высших гармоник, подключенных к узлу q .

Математическое ожидание действующего значения тока n -й гармоники во всех ветвях схемы замещения:

$$[M(I_{нв})] = [Y_{нв}]M(I_{nq\Sigma})([X_{yN1}] - [X_{yN2}]). \quad (15)$$

Вариант расчета 3. В системе электроснабжения присутствует несколько источников высших гармоник, находящихся в разных узлах схемы. Математическое ожидание и дисперсия действующего значения напряжения n -й гармоники для всех узлов схемы замещения примет вид:

$$[M(U_n)] = [X_y][M(I_{n\Sigma})]; \quad (16)$$

$$[D(U_n)] = [X_y^2][D(I_{n\Sigma})], \quad (17)$$

где $[X_y]$ – матрица узловых сопротивлений;

$[M(I_{n\Sigma})]$ – матрица математического ожидания задающих токов;

$[X_y^2]$ – матрица квадратов узловых сопротивлений;

$[D(I_{n\Sigma})]$ – матрица дисперсии задающих токов.

Математическое ожидание действующего значения тока n -й гармоники во всех ветвях схемы замещения:

$$[M(I_{нв})] = [Y_{нв}][M(I_{n\Sigma})]([X_{yN1}] - [X_{yN2}]). \quad (18)$$

Предложенная методика учитывает стохастическую природу параметров режима высших гармоник и позволяет более точно анализировать их поведение в реальных эксплуатационных условиях.

В пятой главе продемонстрировано применение разработанных методик расчета параметров режима высших гармоник для решения ряда практических задач электроснабжения:

1. Расчет суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения.

Вариант расчета 1. В системе электроснабжения присутствует только один источник высших гармоник. Математическое ожидание и дисперсия суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения в узле i :

$$M(K_{Hci}) = w \cdot \frac{M(U_{\text{э}i})}{M(U_{1i})} = \sqrt{3}w \frac{\sqrt{\sum_n m_n^2 X_{niq}^2 M(I_{1q}^{30})^2}}{M(U_{1i})}; \quad (19)$$

$$\begin{aligned} D(K_{Hci}) &= M(K_{Hci}^2) - (M(K_{Hci}))^2 = \\ &= 3w^2 \left(\sum_n m_n^2 X_{niq}^2 M(I_{1q}^{30})^2 \right) \left(\frac{1}{M(U_{1i}^2)} - \frac{1}{(M(U_{1i}))^2} \right), \end{aligned} \quad (20)$$

где $M(U_{1i})$ – математическое ожидание действующего линейного напряжения основной гармонической составляющей в узле i ;

w – поправочный коэффициент, который учитывает гармоники выше 25 порядка и

анормальные гармоники, по результатам эксперимента принимаем равным 1,03.

Вариант расчета 2. В системе электроснабжения присутствует несколько источников высших гармоник, находящихся в одном узле схемы. Математическое ожидание и дисперсия суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения в узле i :

$$M(K_{\text{HC}i}) = w \frac{M(U_{\text{ai}})}{M(U_{\text{li}})} = \sqrt{3}w \frac{\sqrt{\sum_n X_{niq}^2 (M(I_{nq\Sigma}))^2}}{M(U_{\text{li}})}; \quad (21)$$

$$D(K_{\text{HC}i}) = M(K_{\text{HC}i}^2) - (M(K_{\text{HC}i}))^2 = 3w^2 \sum_n X_{niq}^2 \left(\frac{M(I_{nq\Sigma}^2)}{M(U_{\text{li}}^2)} - \frac{(M(I_{nq\Sigma}))^2}{(M(U_{\text{li}}))^2} \right). \quad (22)$$

Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения может быть найден из соотношения:

$$K_{\text{HC}} = M(K_{\text{HC}}) \pm \beta \sigma(K_{\text{HC}}), \quad (23)$$

где $M(K_{\text{HC}})$ – математическое ожидание суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения;

$\sigma(K_{\text{HC}})$ – среднее квадратическое отклонение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения;

β – параметр, который принимает значение по результатам эксперимента 1,921 при 100 % и 1,238 при 95 % времени наблюдения.

2. Расчет размаха изменения напряжения U_t с целью определения дозы фликера с учетом влияния высших гармонических составляющих:

$$U_t = U_1 - U_{2д} = U_1 - \sqrt{U_2^2 + \sum_n (M(I_1)m_n x_n)^2}. \quad (24)$$

где U_1, U_2 – напряжение в начале и конце линии соответственно;

$U_{2д}$ – действующее значение напряжения в конце линии.

3. Получены уточненные аналитические выражения для расчета дополнительных потерь электроэнергии в элементах системы электроснабжения, возникающих в результате воздействия высших гармонических составляющих тока и напряжения. Математическое ожидание потерь активной мощности в i -м элементе сети от n высших гармоник:

$$\Delta M(P_{ni\Sigma}) = \sum_2^n \Delta M(P_{ni}) = \sum_2^n (3m_n^2 M(I_1)^2 R_{ni} + 3m_n^2 \sigma(I_1)^2 R_{ni}), \quad (25)$$

4. Описано применение разработанной методики расчетов режима высших гармоник для определения расчетного значения тока с целью выбора электрооборудования в системах электроснабжения.

5. Даны рекомендации по компенсации реактивной мощности с применением антирезонансных дросселей.

Заключение и основные выводы по диссертации

В диссертации разработаны методики расчета несинусоидальных режимов систем электроснабжения, которые отличаются от известных тем, что позволяют выполнять расчеты при неполной информации о параметрах режима управляемых выпрямителей и стохастическом характере изменения их резкопеременной нагрузки. Получены следующие результаты, имеющие научную новизну и практическую значимость:

1. Впервые выполнены исследования параметров режима высших гармоник фанерных производств. Получены статистические характеристики электрических нагрузок, включая законы распределения действующих значений токов основной гармонической составляющей и высших гармоник, активной и реактивной мощности.

2. Получены аналитические выражения и численные значения параметров этих выражений для расчета математического ожидания и дисперсии действующего значения токов канонических высших гармоник, их действительной и мнимой составляющих через ток основной гармонической составляющей управляемого выпрямителя при отсутствии сведений об углах управления и коммутации выпрямителей. Погрешность расчетов по предложенным формулам во всех случаях не превышает 3 %.

3. Для описания основных числовых характеристик случайных процессов токов высших гармоник, создаваемых управляемыми выпрямителями с резкопеременной случайной нагрузкой, предложено использовать решетчатые модели, интерполированные сплайн-функциями первой степени. Предложенные математические модели основных числовых характеристик случайных процессов токов высших гармоник применимы для любых электроприемников с повторно-кратковременным режимом работы при случайном характере изменения циклической нагрузки.

4. Разработан способ расчета и предложены модели числовых характеристик группового графика случайного процесса токов высших гармоник, создаваемых группой электроприводов с управляемыми выпрямителями, основанные на использовании теории совпадений импульсов и пауз случайных потоков. Алгоритм реализован в виде зарегистрированного программного обеспечения, что подтверждает его готовность к внедрению.

5. Предложена методика определения числовых характеристик случайных величин токов эквивалентного источника высших гармоник, генерируемых в электрическую сеть несколькими управляемыми выпрямителями при отсутствии сведений об углах управления и коммутации выпрямителей.

6. Предложена методика определения математических ожиданий и дисперсий случайных величин токов и напряжений высших гармоник в системе электроснабжения. Методика может быть использована как в проектных расчетах, так и в задачах мониторинга качества электроэнергии на действующих промышленных объектах.

7. Продемонстрировано применение разработанной методики для решения таких практических задач как: расчет суммарного коэффициента и коэффициента гармонических составляющих напряжения, оценка размаха изменения напряжения, расчет дополнительных потерь электроэнергии, вызванных воздействием высших гармоник, определение расчетного значения тока с целью выбора электрооборудования в

системах электроснабжения, компенсация реактивной мощности в условиях наличия высших гармоник.

8. Сформулированные положения, методики и модели рекомендуется использовать при проектировании, модернизации и эксплуатации систем электроснабжения фанерных производств, а также других объектов с аналогичными характеристиками нагрузок.

Список работ, опубликованных по теме диссертации
Научные статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Черепанов, В. В. Расчет спектрального состава токов выпрямителя главного привода восьмифутового лущильного станка / В. В. Черепанов, **А. К. Торопова** // Интеллектуальная электротехника. – 2024. – Т. 25. – № 1. – С. 25–35. Журнал ВАК К3.

2. **Торопова, А. К.** Исследование режима высших гармоник в электрических сетях фанерного производства / А. К. Торопова, В. В. Черепанов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2024. – Т. 67. – № 1. – С. 124–130. – DOI: 10.17213/0136-3360-2024-1-124-130. Журнал ВАК К1.

3. **Торопова, А. К.** Расчет режима высших гармоник в электрических сетях фанерных производств / А. К. Торопова, В. В. Черепанов // Омский научный вестник. – 2025. – Т. 193. – № 1. – С. 91–97. – DOI: 10.25206/1813-8225-2025-193-91-97. Журнал ВАК К2.

4. **Торопова, А.К.** Расчёт высших гармонических составляющих токов и напряжений в системах электроснабжения промышленных предприятий / А. К. Торопова, В. В. Черепанов // Энергетик. – 2025. – № 6. – С. 26–29. – DOI: 10.71527/EP.EN.2025.06.004. Журнал ВАК К2.

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ

5. Черепанов, В.В. Программа расчета группового графика токов и напряжений высших гармоник в электрической сети, представленного в виде сплайн функции / В.В. Черепанов, **А.К. Торопова**, Е.А. Калинина // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2025618891, 08.04.2025. Заявка № 2025617695 от 08.04.2025.

Публикации в изданиях, входящих в систему цитирования РИНЦ

6. Черепанов, В.В. Исследование спектрального состава тока восьмифутового лущильного станка / В. В. Черепанов, **А. К. Торопова** // Общество. Наука. Инновации (НПК-2022) : Сборник статей XXII Всероссийской научно-практической конференции. В 2-х томах, Киров, 11–29 апреля 2022 года. Том 2. – Киров: Вятский государственный университет, 2022. – С. 523-527. – EDN JZNPRB.

7. Черепанов, В.В. Исследование электрической нагрузки главного привода лущильного станка / В. В. Черепанов, **А. К. Торопова** // Фёдоровские чтения — 2022 : ЛП Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием, с элементами научной школы для молодежи, Москва, 15–18 ноября 2022 года. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2022. – С. 251-256. – EDN NXWQVY.

8. Черепанов, В.В. Диагностика электрической нагрузки главного привода восьмифутового лущильного станка / В. В. Черепанов, **А. К. Торопова** // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования : Тезисы докладов 81-й международной научно-технической конференции, Магнитогорск, 17–21 апреля 2023 года.

Том 1. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2023. – С. 341. – EDN WYXQRE.

9. **Торопова, А.К.** Исследование электрической нагрузки лущильного станка // Актуальные вопросы и современные тенденции развития электроэнергетики и электротехники : Сборник материалов Всероссийской научно-методической конференции, посвященной 60-летию образования Электротехнического факультета ВятГУ, Киров, 13 сентября 2023 года. – Киров: Вятский государственный университет, 2023. – С. 20-23. – EDN CBWZJP.