

На правах рукописи



Лыонг Ван Чынг

РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКОГО ПОДХОДА И АЛГОРИТМОВ
МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ НАГРУЗОК ДЛЯ АНАЛИЗА
НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ НА
ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЙ

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и
электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иркутск – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»)

Научный кандидат технических наук, доцент
руководитель: **Коверникова Лидия Ивановна**

Официальные **Довгун Валерий Петрович**
оппоненты: доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет», кафедра Системы автоматизации, автоматизированного управления и проектирования, профессор кафедры

Тулеский Владимир Николаевич
кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», институт электроэнергетики, директор института

Ведущая Федеральное государственное бюджетное образовательное
организация: учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», г. Нижний Новгород

Защита состоится «15» января 2020 г. в 9:00 на заседании диссертационного совета Д 003.017.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН) по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, каб. 355.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИСЭМ СО РАН по адресу: г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, каб. 407, и на сайте: <http://isem.irk.ru/dissert/case/DIS-2019-5/>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью составителя, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «__» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 003.017.01,
доктор технических наук, профессор



Клер Александр Матвеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Параметры режимов электроэнергетических систем должны обеспечивать экономичность и надежность функционирования как электрических сетей, поставляющих электрическую энергию потребителям, так и потребителей, что в значительной степени определяется качеством электрической энергии. При нарушении качества электрической энергии увеличиваются потери энергии в электрических сетях, сокращается срок службы электрооборудования, снижается производительность технологического оборудования промышленных предприятий. В настоящее время самой актуальной и наиболее острой проблемой в области качества электрической энергии является несинусоидальность напряжения. Эта проблема актуальна не только для России, но и для всех стран мира, в том числе, для Вьетнама. Количество нелинейных нагрузок – источников гармоник токов, вызывающих искажение формы кривой напряжения, быстро и непрерывно растет. Уровни гармоник токов и напряжений в электрических сетях увеличиваются, вызывая экономический ущерб.

В настоящее время в трех законодательных документах РФ: Гражданском кодексе, Законе «О защите прав потребителей», Законе «Об электроэнергетике» содержатся положения об обеспечении надлежащего качества электрической энергии и ответственности за него. В реальных же эксплуатационных условиях параметры режимов часто отличаются от необходимых для электрооборудования. В частности, они не удовлетворяют требованиям ГОСТа 32144-2013.

Для управления несинусоидальными режимами в электрических сетях, их анализа, разработки технических мероприятий для поддержания параметров режимов гармоник в соответствии с требованиями нормативных документов требуется проведение расчетов режимов гармоник, что невозможно выполнить без моделей, адекватно представляющих электрические сети и нелинейные нагрузки в вычислительных программах. Модели нелинейных нагрузок разрабатываются уже давно. Значительный вклад в теорию моделирования нелинейных нагрузок внесли как российские, так и зарубежные ученые, в том числе, Вагин Г.Я., Гераскин О.Т., Гулиев Г.Б., Жежеленко И.В., Картасиди Н.Ю., Кордюков Е.И., Кузнецов В.Г., Кучумов Л.А., Либкинд М.С., Паин А.А., Пахомов А.В., Родыгин А.В., Самородов Г.И., Смирнов С.С., Тимофеев Д.В., Трофимов Г.Г., Фархадзаде Э.М., Фокин Ю.А., Черепанов В.В., Шидловский А.К., Arrillaga J., Au M.T., Balcells J., Bodger P., Bradley D., Chang G.W., Collin A.J., Fuchs E.F., Greene J.D., Lamich M., Marti J.R., Masoum M.A.S., Milanovic J.V., Soder L., Thunberg E., Xu W. и другие. В одних работах приведены общие принципы моделирования и представлены модели различных отдельных нелинейных устройств, в других отдельные нелинейные устройства рассматриваются в виде эквивалентных нелинейных нагрузок, присоединенных к сетям низкого и среднего напряжений, включая промышленные предприятия и жилой сектор. Большое количество нелинейного электрооборудования значительной мощности присоединено к сетям высокого напряжения. Моделирование нелинейных нагрузок, присоединенных к этим сетям, остается нерешенной проблемой.

Результаты исследований информации о параметрах режимов гармоник, полученной в результате измерений, показали, что режимы гармоник являются случайными и параметры их режимов имеют вероятностный характер. Он определяется конфигурацией сети, составом ее элементов, количеством нелинейных нагрузок, волновыми и частотными свойствами сети, фазами токов источников гармоник, величинами напряжений на зажимах нелинейного электрооборудования, изменениями режимов работы и мощностей нагрузок и многими другими факторами. Из-за их непредсказуемости моделировать нелинейные нагрузки можно только на основе результатов измерений параметров режимов гармоник. Поэтому в данной диссертации ставится задача разработки нового подхода к моделированию нелинейных нагрузок на основе информации, полученной в результате измерений в реальных электрических сетях.

Следует отметить, что в настоящее время для этого создаются все более благоприятные условия, поскольку поставлена задача создания интеллектуальных электроэнергетических систем, оснащенных многочисленными измерительными приборами. В настоящее время в электрических сетях устанавливаются отдельные приборы и целые системы для длительного непрерывного мониторинга показателей качества электрической энергии и параметров режимов, которые позволяют получать информацию для разработки моделей нелинейных нагрузок.

Целью исследования является разработка методического подхода, алгоритмов и вычислительной программы для моделирования нелинейных нагрузок на основе измерений параметров режимов гармоник в электрических сетях.

Задачи исследования:

1. Анализ существующих способов моделирования нелинейных нагрузок.
2. Разработка методического подхода для моделирования нелинейных нагрузок на основе измерений параметров режимов гармоник с учетом особенностей режимов, в том числе, вероятностного характера их параметров.
3. Разработка алгоритма моделирования нелинейных нагрузок на основе измерений параметров режимов гармоник, позволяющего представлять их модели в виде набора функций распределения гармоник токов.
4. Разработка алгоритма вычислительной программы для идентификации функций распределения измеренных рядов случайных величин гармоник токов нелинейных нагрузок и вычисления их значений с заданной вероятностью.
5. Проведение исследований результатов измерений параметров режимов гармоник в узлах присоединения к питающей сети тяговых трансформаторов железной дороги, поставляющих электрическую энергию нелинейным нагрузкам большой мощности – электровозам, с помощью разработанных методического подхода, алгоритмов и вычислительной программы.
6. Усовершенствование программно-вычислительного комплекса «Гармоники», разработанного в ИСЭМ СО РАН, предназначенного для анализа несинусоидальных режимов электрических сетей, с целью представления нелинейных нагрузок в виде моделей, предложенных в данной работе.

Объект исследования – электрическая сеть, поставляющая электрическую энергию многочисленным нелинейным нагрузкам.

Предмет исследования – методы расчета несинусоидальных режимов, алгоритмы моделирования нелинейных нагрузок.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработан методический подход для моделирования нелинейных нагрузок на основе измерений параметров режимов гармоник в узлах присоединения нелинейных нагрузок к электрической сети, учитывающий особенности режимов гармоник, в том числе, вероятностный характер их параметров.

2. Разработаны алгоритмы моделирования нелинейных нагрузок на основе измерений параметров режимов гармоник в узлах присоединения нелинейных нагрузок к электрической сети, позволяющие представлять их модели в виде набора функций распределения гармоник токов, соответствующих известным законам распределения, и законам, описываемым композициями известных законов.

3. Разработаны алгоритм вычислительной программы и вычислительная программа для идентификации функций распределения измеренных рядов случайных величин гармоник активных и реактивных токов нелинейных нагрузок и вычисления их значений с заданной вероятностью, необходимой для расчета режимов гармоник.

4. Проведены исследования параметров режимов гармоник, измеренных в узлах присоединения к питающей сети тяговых трансформаторов железной дороги, поставляющих электрическую энергию нелинейным нагрузкам большой мощности – электровозам, с помощью разработанных методического подхода, алгоритмов и вычислительной программы.

Теоретическая значимость исследования. Разработанные методический подход и алгоритмы позволяют моделировать нелинейные нагрузки с учетом случайного характера несинусоидальных режимов и обеспечивают повышение точности моделирования нелинейных нагрузок и режимов электрических сетей. Полученные результаты исследований послужат развитию теории несинусоидальных режимов электроэнергетических систем.

Практическая значимость исследования.

Практическая значимость полученных результатов заключается в том, что применение разработанных в данной работе методического подхода, алгоритмов и вычислительной программы позволяет повысить точность определения величин гармоник токов и, в результате, значительно сократить время моделирования нелинейных нагрузок и режимов гармоник всей сети.

Разработанные методический подход, алгоритмы, вычислительная программа, полученные результаты использовались в учебном процессе на кафедре электроснабжения и электротехники ФГБОУ ВО «ИРНИТУ», а также в ИСЭМ СО РАН при выполнении проектов:

III.17.1.1. «Теория и методы управления режимами интеллектуальных электроэнергетических систем» государственного задания № 01201361371 программы

фундаментальных исследований ИСЭМ СО РАН на 2013–2016 гг. в рамках Программы СО РАН III.17.1. «Теоретические основы исследования инновационного развития интеллектуальных энергетических систем и управления ими»;

III.17.4.2. «Теория и методы обоснования развития и управления режимами интеллектуальных электроэнергетических систем» государственного задания № АААА-А17-117030310438-1 программы фундаментальных исследований ИСЭМ СО РАН на 2017–2020 гг. в рамках Программы СО РАН III.17.4. «Методология обоснования развития интеллектуальных энергетических систем и управления ими».

Представление нелинейных нагрузок в виде моделей, предложенных в данной работе, использовано для усовершенствования программно-вычислительного комплекса «Гармоники», разработанного в ИСЭМ СО РАН и предназначенного для анализа несинусоидальных режимов электрических сетей.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались методы теории электрических цепей, теории вероятностей, методы математической статистики, математического анализа и моделирования, методы численного программирования.

Для разработки вычислительной программы применялись программа MS Excel и среда программирования Visual Basic для Windows-приложений.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методический подход для моделирования нелинейных нагрузок на основе измерений параметров режимов гармоник в узлах присоединения нелинейных нагрузок к электрической сети, учитывающий особенности режимов гармоник, в том числе, вероятностный характер их параметров.

2. Алгоритмы моделирования нелинейных нагрузок на основе измерений параметров режимов гармоник в узлах присоединения нелинейных нагрузок к электрической сети, позволяющие представлять их модели в виде набора функций распределения гармоник токов, соответствующих известным законам распределения, и законам, описываемым композициями известных законов.

3. Алгоритм вычислительной программы и вычислительная программа для идентификации функций распределения измеренных рядов случайных величин гармоник активных и реактивных токов нелинейных нагрузок и вычисления их значений с заданной вероятностью, необходимой для расчета режимов гармоник.

4. Результаты исследований параметров режимов гармоник, измеренных в узлах присоединения к питающей сети тяговых трансформаторов железной дороги, поставляющих электрическую энергию нелинейным нагрузкам большой мощности – электровозам, с помощью разработанных методического подхода, алгоритмов и вычислительной программы.

Степень достоверности и апробация результатов работы. Достоверность полученных результатов обеспечивается обоснованным применением методов теории электрических цепей, теории вероятностей, методов математической статистики и математического анализа, результатами расчетов, выполненных с помощью усовершенствованного программно-вычислительного комплекса «Гармоники», а также положительной оценкой результатов выполненной работы на российских и зарубежных научных конференциях.

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири» (г. Иркутск, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017 гг.); VI всероссийской научно-практической конференции «Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов» (г. Томск, 2013 г.); 15-ой международной конференции “International Conference on Renewable Energies and Power Quality” (ICREPQ’17, Испания, г. Малага, 2017 г.); IV международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг» (г. Москва-Челябинск-Новочеркасск, 2018 г.); 18-ой международной конференции “International Conference on Harmonics and Quality of Power” (ICHQP 2018, Словения, г. Любляна, 2018 г.).

Личный вклад автора. Применение метода разделения смесей распределений в алгоритме моделирования токов нелинейных нагрузок, алгоритм вычислительной программы для моделирования гармоник токов нелинейных нагрузок на основе измерений параметров режимов гармоник в узлах присоединения нелинейных нагрузок к электрической сети, вычислительная программа для определения функций распределения рядов случайных величин гармоник активных и реактивных токов и вычисления их значений с заданной вероятностью, результаты исследований параметров режимов гармоник, измеренных в узлах присоединения к питающей сети тяговых трансформаторов железной дороги, поставляющих электрическую энергию нелинейным нагрузкам большой мощности – электровозам, с помощью разработанных методического подхода, алгоритмов и вычислительной программы получены лично автором, все остальные результаты, выносимые на защиту, получены автором совместно с научным руководителем.

Публикации. Основные научные результаты диссертационной работы опубликованы в 15 печатных работах, в том числе, 2 работы в рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК, 1 работа проиндексирована в ядре реферативной базы научных публикаций Web of Science и реферативной базе данных Scopus, 6 работ включены в РИНЦ.

Соответствие диссертации паспорту специальности. Диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы по следующим пунктам:

П. 6. Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике в части разработки методического подхода и алгоритмов моделирования нелинейных нагрузок на основе измерений параметров режимов гармоник в узлах присоединения нелинейных нагрузок к электрической сети;

П. 12. Разработка методов контроля и анализа качества электроэнергии и мер по его обеспечению в части исследований несинусоидальных режимов на основе их параметров, измеренных в узлах присоединения к питающей сети тяговых трансформаторов железной дороги, поставляющих электрическую энергию нелинейным нагрузкам большой мощности – электровозам;

П. 13. Разработка методов использования ЭВМ для решения задач в электроэнергетике в части реализации разработанных алгоритмов моделирования

нелинейных нагрузок в виде компьютерных программ и для усовершенствования программно-вычислительного комплекса «Гармоники».

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 120 наименований, и 7 приложений. Общий объем работы – 172 страницы, включая 58 рисунков, 13 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, показана ее научная новизна, определены цель и задачи исследований, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен обзор источников гармоник и негативных воздействий гармоник токов и напряжений на электрооборудование потребителей и электрических сетей, сделан анализ существующих способов моделирования нелинейных нагрузок и отмечены их недостатки.

Гармоники токов и напряжений в электрических сетях являются серьезной проблемой, потому что причиняют экономический ущерб. Электрооборудование с нелинейными вольт-амперными характеристиками генерирует в сеть токи различных гармоник. В настоящее время к сетям высокого напряжения присоединено значительное количество нелинейного электрооборудования большой мощности: алюминиевые заводы, тяговые подстанции железной дороги, целлюлозно-бумажные комбинаты, химические предприятия и другие. Из сетей высокого напряжения гармоники проникают в сети среднего и низкого напряжений и наоборот.

Основываясь на результатах исследований параметров режимов гармоник, измеренных в электрических сетях, анализе существующих способов моделирования нелинейных нагрузок, в данной работе решается задача моделирования нелинейных нагрузок на основе измерений параметров режимов гармоник в узлах их присоединения к электрической сети.

Во второй главе предложены методический подход и алгоритмы моделирования нелинейных нагрузок на основе измерений. Как указывалось выше, для управления несинусоидальными режимами, выбора специальных технических средств, снижающих величины гармоник токов и напряжений в электрических сетях, требуется проведение расчетов режимов гармоник. Расчет режимов гармоник выполняется путем решения системы уравнений

$$\dot{U}_n = Z_n \dot{I}_n, \quad (1)$$

где $\dot{U}_n$ – матрица-столбец узловых напряжений n -ой гармоники, которые необходимо определить, Z_n – квадратная матрица полных собственных и взаимных сопротивлений n -ой гармоники узлов сети, $\dot{I}_n$ – матрица-столбец n -ой гармоники токов нелинейных нагрузок, присоединенных к узлам сети. Квадратная матрица Z_n вычисляется в результате обращения квадратной матрицы узловых проводимостей Y_n , т.е. $Z_n = Y_n^{-1}$, которая формируется по известным параметрам элементов сети. Элементы матрицы $\dot{I}_n$ неизвестны, их нужно определить по результатам измерений параметров режимов гармоник. Каждый элемент матрицы

$\dot{I}_n$ является комплексным числом $\dot{I}_{ni} = I_{ani} + jI_{rni}$, где i – номер узла сети, I_{ani} и I_{rni} – активная и реактивная составляющие n -ой гармоники тока. Их определению и посвящены представленные во второй главе методический подход и алгоритмы.

Измерения параметров режимов гармоник, необходимые для моделирования нелинейной нагрузки, выполняются в узле ее присоединения к сети, обозначенном

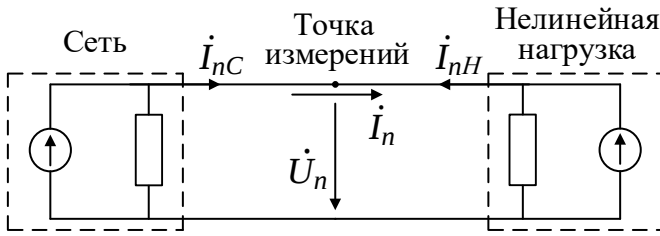


Рисунок 1 – Схема сети и нелинейной нагрузки на n -ой гармонике для измерений

на схеме на Рисунке 1 как точка измерения, где сеть и нелинейная нагрузка представлены источниками тока. На схеме обозначено: $\dot{I}_{nC}$ – вектор n -ой гармоники тока сети, $\dot{I}_{nH}$ – вектор n -ой гармоники тока нелинейной нагрузки, присоединенной к узлу, $\dot{U}_n$ – вектор n -ой гармоники напряжения в узле

присоединения нелинейной нагрузки к сети. Вектор тока $\dot{I}_{nC}$ является результирующим вектором n -ой гармоники тока всех нелинейных нагрузок, присоединенных к сети, за исключением вектора тока $\dot{I}_{nH}$ моделируемой нагрузки. Через узел присоединения, таким образом, протекает ток $\dot{I}_n$, равный векторной сумме токов $\dot{I}_{nC}$ и $\dot{I}_{nH}$, т.е.

$$\dot{I}_n = \dot{I}_{nC} + \dot{I}_{nH}. \quad (2)$$

В узле присоединения нелинейной нагрузки для ее моделирования должны быть измерены следующие параметры режимов гармоник: коэффициенты гармонических составляющих напряжения и тока – $K_{U(n)}, K_{I(n)}$, действующие значения гармоник напряжения и тока – U_n, I_n , величины фазовых углов гармоник напряжения и тока – $\varphi_{U_n}, \varphi_{I_n}$. Массивы всех измеренных параметров гармоник представляют собой ряды случайных величин.

Для решения системы уравнений (1) необходимо определить с вероятностью 95% величины активного I_{an} и реактивного I_{rn} токов. Значения параметров с вероятностью 95% используются в ГОСТе 32144-2013 для оценки степени несинусоидальности напряжения. Величины I_{an} и I_{rn} определяются по измеренным действующим значениям модуля тока I_n и фазовому углу между гармониками напряжений и токов $\varphi_{UI(n)}$ по выражениям

$$I_{an} = I_n \cos \varphi_{UI(n)}, \quad (3)$$

$$I_{rn} = I_n \sin \varphi_{UI(n)}, \quad (4)$$

где фазовый угол $\varphi_{UI(n)}$ определяется через измеренные углы φ_{U_n} и φ_{I_n} как

$$\varphi_{UI(n)} = \varphi_{U_n} - \varphi_{I_n}. \quad (5)$$

Для вычисления с заданной вероятностью величин гармоник токов необходимо знание их функций распределения, которые могут быть получены с помощью функций плотности вероятностей, идентифицированных после соответствующей обработки результатов измерений. Таким образом, моделью нелинейной нагрузки

является набор функций распределения гармоник токов, позволяющих вычислять с заданной вероятностью величины гармоник активных и реактивных токов.

С учетом выше сказанного и на основе анализа параметров режимов гармоник, измеренных в электрических сетях, разработан методический подход к моделированию нелинейных нагрузок для расчета несинусоидальных режимов. Он включает семь пунктов, которые представлены ниже.

1. Проверка измеренных рядов случайных величин параметров режима гармоник на наличие выбросов.

Выбросами называются элементы, которые по величине значительно

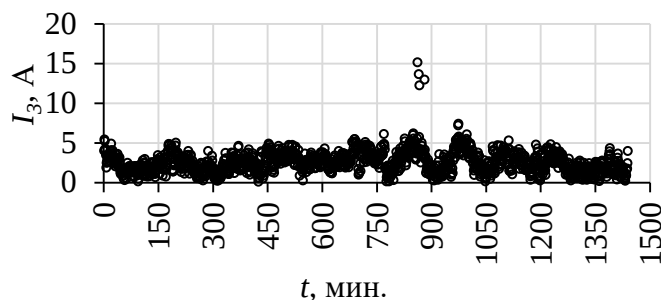


Рисунок 2 – Точечная диаграмма 3-ей гармоники тока

отличаются от других элементов ряда. Они искажают картину режима, делают ряды измеренных параметров нестационарными, не позволяют построить реальную гистограмму и правильно определить закон распределения. Их наличие можно визуально определить, построив точечную диаграмму. На Рисунке 2, в качестве

примера, приведена точечная диаграмма 3-ей гармоники тока. На рисунке хорошо видны четыре выброса. При обработке выбросы могут заменяться соседними элементами, средним значением соседних элементов или другими способами, представленными в специальной литературе.

2. Анализ измеренных параметров режима гармоник для определения интервалов времени, которые характеризуются значениями параметров, заметно отличающимися по величине.

При анализе измеренных данных выяснилось, что на определенных интервалах времени измерений величины параметров режимов гармоник значительно отличаются друг от друга. Причиной таких изменений являются изменения в схеме сети, параметрах ее элементов, мощностей и характера нагрузок и другие, возникающие при эксплуатации электрических сетей. Поэтому, при значительных отличиях параметров режимов гармоник на разных интервалах времени все время измерений следует разделить на временные интервалы, на которых имеют место режимы, характеризующиеся определенными значениями измеряемых параметров. Для каждого из таких интервалов и следует разрабатывать модели нелинейных нагрузок.

На Рисунке 3, в качестве примера, приведены изменения величин гармоник напряжений и токов в узле сети при включении конденсаторной батареи (КБ). Из графиков видно, что после включения конденсаторной батареи наблюдаются резкие увеличения величин гармоник напряжений в трех фазах и тока в фазах В и С. Таким образом, весь интервал времени измерений должен быть представлен двумя интервалами, характеризующимися заметно отличающимися по величине параметрами режима: режим сети до включения и режим сети после включения конденсаторной батареи.

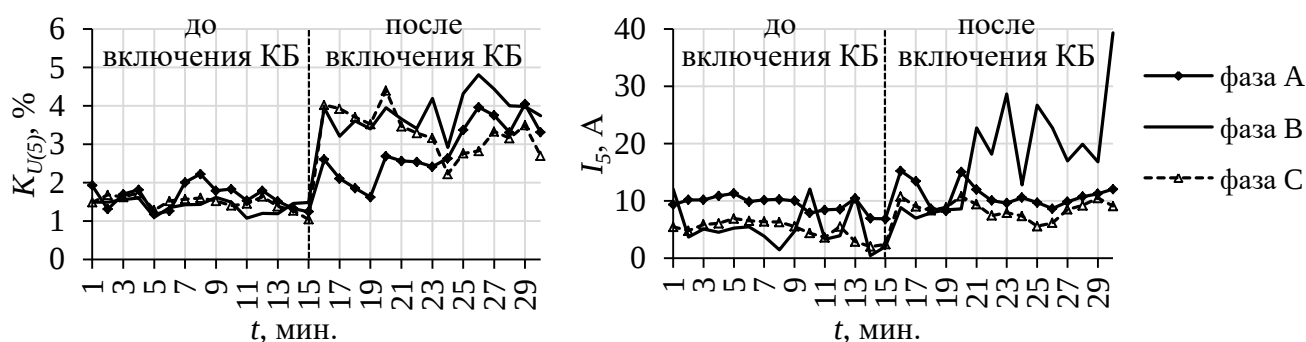


Рисунок 3 – Изменения $K_{U(5)}$ и величин 5-ой гармоник тока при включении конденсаторной батареи

3. Анализ корреляционных связей между гармониками токов и соответствующими гармониками напряжений.

Анализ корреляционных связей выполняется с целью определения математических методов, которые необходимо использовать при моделировании гармоник токов по измеренным случайным величинам. Анализ осуществляется для каждого из интервалов времени, установленных во втором пункте методического подхода.

Если предполагается, что случайные величины гармоник токов и напряжений имеют нормальный закон распределения, то для выяснения силы связи между гармониками токов и напряжений вычисляются коэффициенты корреляции (r), которые затем сравниваются с коэффициентами по шкале Чеддока. При отклонении распределения случайных величин от нормального используются методы, основанные на применении порядковых статистик или на замене измеренных величин их рангами с использованием критерия Кенуя, квадрантного критерия, знакового корреляционного критерия Нельсона.

В Таблице 1, в качестве примера, представлены коэффициенты корреляции r_{UnIn} между гармониками токов и соответствующими гармониками напряжений в узлах присоединения к питающей сети блока алюминиевого завода (БАЗ), целлюлозно-бумажного комбината (ЦБК), подстанции железной дороги (ПЖД).

Таблица 1 – Коэффициенты корреляции r_{UnIn}

n		3	5	7	9	11	13	17	19	23	25
r_{UnIn}	БАЗ	-0.04	0.02	-0.05	-0.05	-0.43	0.15	0.45	0.20	-0.06	-0.03
	ЦБК	0.61	0.47	-0.06	0.62	0.74	0.56	0.18	0.40	0.59	0.53
	ПЖД	0.29	-0.04	0.37	-0.03	0.12	0.05	0.06	0.10	0.75	0.41

Результаты сравнения r_{UnIn} с коэффициентами по шкале Чеддока показали, что в большинстве случаев, за исключением коэффициентов, выделенных в Таблице 1 жирным шрифтом, корреляция между гармониками токов и соответствующими гармониками напряжений отсутствует или является незначительной. Это свидетельствует о независимости или слабой зависимости величин гармоник напряжения от гармоник тока, т.е. вероятностном характере

обоих параметров, что дает возможность применять при моделировании гармоник тока соответствующие математические методы.

Если в некоторых случаях корреляционные связи между гармониками токов и соответствующими гармониками напряжений имеют место, то необходимо выявить существующие между ними связи с помощью регрессионного анализа. В данной работе эта задача не ставилась и не рассматривалась. Она будет решаться в дальнейших исследованиях.

4. Анализ коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_{U(n)}$ с целью выбора номеров гармоник для моделирования.

Моделирование может быть выполнено не для всех гармоник из интервала от 2 до 40-ой, рекомендованного ГОСТом 32144-2013. Для моделирования выбираются номера гармоник, коэффициенты $K_{U(n)}$ которых превышают нормативные значения ГОСТа 32144-2013. С этой целью необходимо сравнить измеренные величины коэффициентов $K_{U(n)}$ с нормативными значениями для 95% и 100% времени измерений. На Рисунке 4, в качестве примера, приведены графики измеренных коэффициентов $K_{U(n)}$ в узлах присоединения к питающей сети блока алюминиевого завода, целлюлозно-бумажного комбината, подстанции железной дороги и нормативные – $K_{U(3,5)n}$, $K_{U(7,11)n}$, $K_{U(13)n}$, $K_{U(17)n}$, $K_{U(9,19,23,25)n}$ для 95% времени измерений. Из рисунка видно, что в узле присоединения блока алюминиевого завода превышены нормативные значения $K_{U(11)n}$, $K_{U(13)n}$, $K_{U(23)n}$, $K_{U(25)n}$, в узле присоединения целлюлозно-бумажного комбината – $K_{U(5)n}$, $K_{U(7)n}$, $K_{U(9)n}$, $K_{U(11)n}$, $K_{U(13)n}$, $K_{U(25)n}$, в узле присоединения подстанции железной дороги – $K_{U(3)n}$, $K_{U(5)n}$, $K_{U(9)n}$, $K_{U(11)n}$, $K_{U(13)n}$, $K_{U(17)n}$, $K_{U(19)n}$, $K_{U(23)n}$, $K_{U(25)n}$. Таким образом, необходимо моделировать 11, 13, 23, 25-ую гармоники тока в узле присоединения к сети блока алюминиевого завода; 5, 7, 9, 11, 13, 25-ую гармоники тока в узле присоединения целлюлозно-бумажного комбината; 3, 5, 9, 11, 13, 17, 19, 23, 25-ую гармоники тока в узле присоединения подстанции железной дороги.

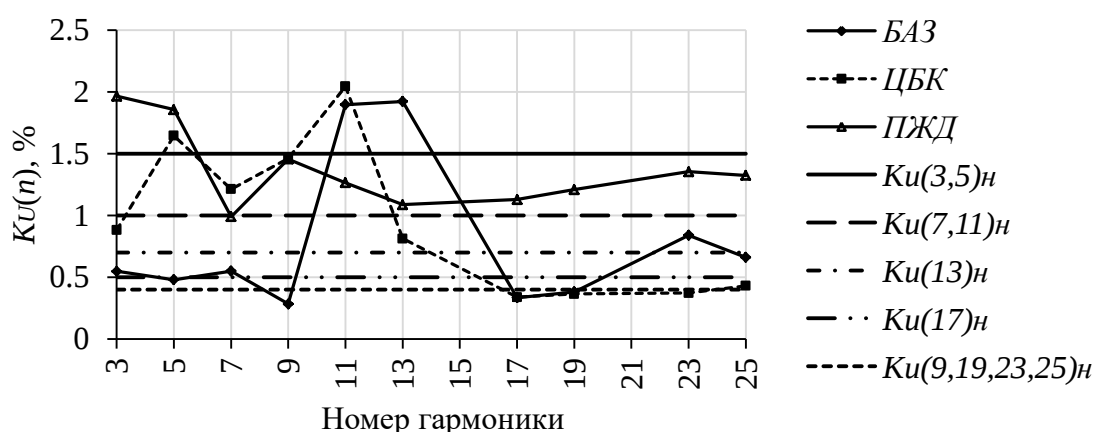


Рисунок 4 – Измеренные величины $K_{U(n)}$ в узлах присоединения к сети трех предприятий и нормативные значения для десяти гармоник

5. Анализ направлений протекания гармоник активных и реактивных токов через узел присоединения к сети нелинейной нагрузки с целью выбора вариантов для моделирования.

Значения гармоник токов для $n > 1$ по величине значительно меньше значений первой гармоники тока. Их направления протекания могут изменяться по очень многим незначительным для первой гармоники тока причинам. На каждом временном интервале, определенном во втором пункте методического подхода, необходимо осуществить анализ направлений протекания гармоник активных и реактивных токов через узел присоединения нелинейной нагрузки, т.е. относительно точки измерений на Рисунке 1. Анализ выполняется с помощью фазового угла между гармониками напряжений и токов $\varphi_{UI(n)}$.

Активный и реактивный токи направлены из сети на нагрузку, если угол $\varphi_{UI(n)}$ лежит в интервале от 0 до $\pi/2$, т.е. в 1-ом квадранте комплексной плоскости (КП). Активный ток направлен из нагрузки в сеть, а реактивный – из сети в нагрузку, если угол $\varphi_{UI(n)}$ лежит в интервале от $\pi/2$ до π , т.е. во 2-ом квадранте. Оба тока направлены из нагрузки в сеть, если угол $\varphi_{UI(n)}$ лежит в интервале от π до $3\pi/2$, т.е. в 3-ем квадранте. Активный ток направлен из сети в нагрузку, а реактивный в противоположном направлении, если угол $\varphi_{UI(n)}$ лежит в интервале от $3\pi/2$ до 2π , т.е. в 4-ом квадранте. Таким образом, время измерений параметров режима гармоник на каждом из определенных во втором пункте методического подхода интервалов времени может быть разделено еще на четыре временных подинтервала, которые соответствуют расположениям угла $\varphi_{UI(n)}$ в 1, 2, 3 и 4-ом квадрантах КП. Для моделирования выбираются подинтервалы (далее – варианты), преобладающие над другими по количеству измерений, т.е. содержащие наибольшее количество измерений от их общего числа.

В Таблице 2, в качестве примера, представлены результаты анализа направлений активного и реактивного токов подстанции железной дороги с помощью угла $\varphi_{UI(n)}$. Каждая клетка таблицы соответствует квадранту КП. В клетке таблицы приведено количество измеренных $\varphi_{UI(n)}$, принадлежащих соответствующему квадранту КП в процентах от общего количества измерений $\varphi_{UI(n)}$, которое составляет 1440. Для моделирования гармоник активного и реактивного токов подстанции железной дороги должны использоваться варианты, выделенные в таблице жирным шрифтом.

Таблица 2 – Распределение направлений гармоник активного и реактивного токов подстанции железной дороги по квадрантам КП

n			3	5	7	9	11	13	17	19	23	25
Количество $\varphi_{UI(n)}$, %	Квадранты КП	1	10.3	81.7	0.9	26.2	21.7	19.5	19.7	17.5	60.3	45.7
		2	14.7	5.1	19.5	22.4	32.1	26.9	23.3	21.9	26.8	23.0
		3	37.5	0.3	68.5	21.9	29.4	33.7	31.7	34.8	4.5	11.0
		4	37.5	12.9	11.1	29.5	16.8	19.9	25.3	25.8	8.4	20.3

6. Моделирование гармоник активных и реактивных токов.

Задачей моделирования гармоник активных и реактивных токов является идентификация их функций распределения, а затем определение с вероятностью 95% или другой заданной величин I_{an} и I_{rn} для решения системы уравнений (1).

В результате анализа информации многочисленных замеров гармоник токов было получено, что для идентификации их функций распределения необходимо использовать два различных подхода, которые на Рисунке 5 представлены в виде двух алгоритмов. На рисунке обозначено: $F(x)$ – функция распределения, $f(x, \theta)$ – функция плотности вероятностей, x_{95} – величина гармоники тока с вероятностью 95%. Первый алгоритм, включающий блоки 2, 3, 4, 5, 6, 7, предназначен для идентификации функций распределения случайных величин гармоник токов, соответствующих известным законам распределения. Второй алгоритм, включающий блоки 8, 9, 10, 11, 12, предназначен для идентификации функций распределения случайных величин гармоник токов, соответствующих композициям известных законов распределения. На основе представленных алгоритмов разработана вычислительная программа, алгоритм которой описан в третьей главе.

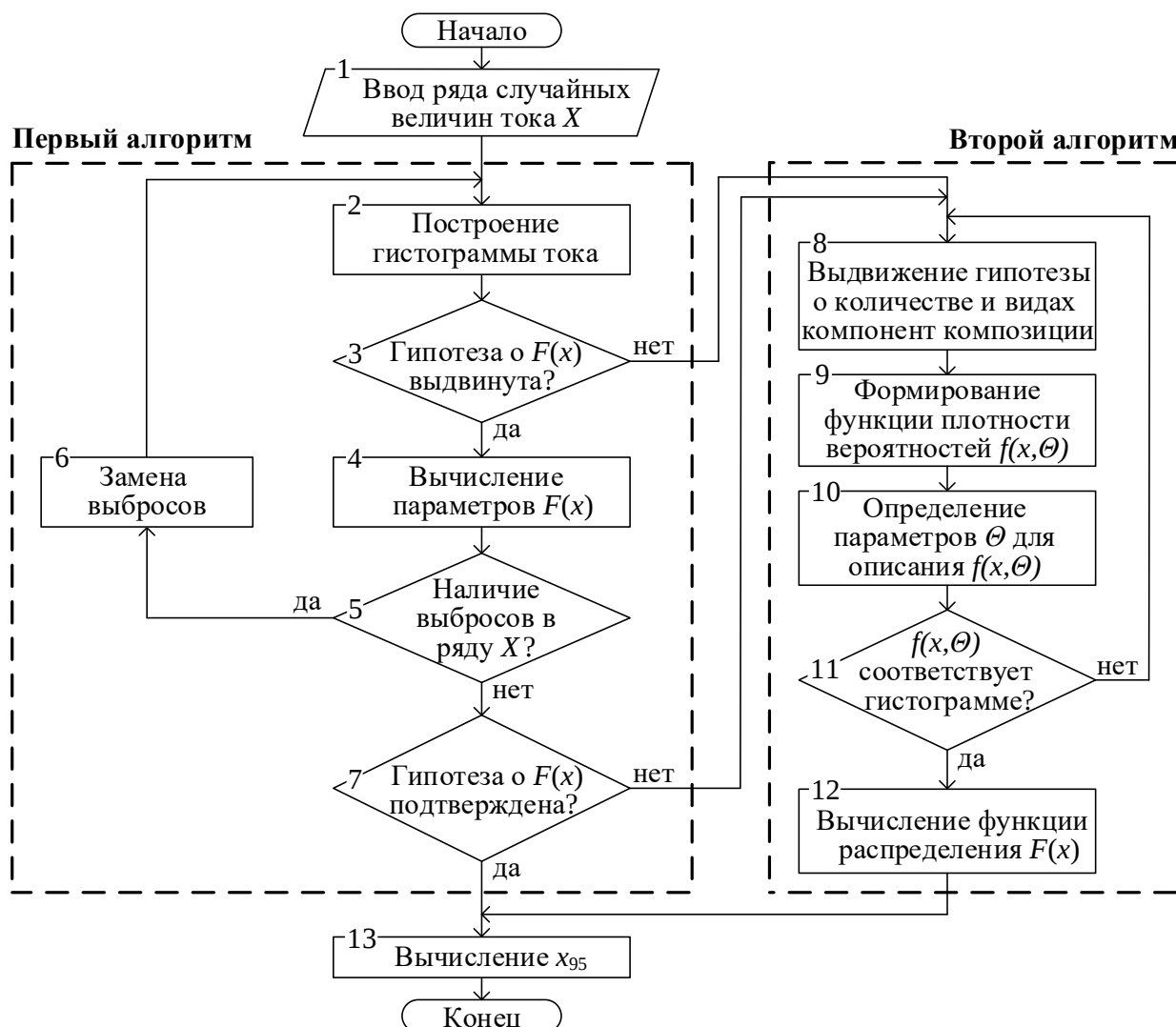


Рисунок 5 – Блок-схема алгоритмов моделирования одной гармоники тока

7. Проверка правильности вычислений с заданной вероятностью величин активных и реактивных токов.

После вычислений величин I_{an} и I_{rn} необходимо проверить правильность полученных значений. С этой целью необходимо вычислить модуль тока I_n по величинам I_{an} и I_{rn} , затем сопоставить полученное значение I_n с измеренными величинами тока. Вычисленное значение I_n не должно выходить за пределы измеренных величин тока. Если в некоторых случаях вычисленное значение I_n выходит за пределы, то необходимо выявить причины и при необходимости заново провести моделирование. Причинами выхода вычисленного I_n за пределы измеренных величин тока могут быть округления значений I_{an} , I_{rn} , I_n в большую сторону, недостаточно точное определение функции распределения для описания гармоник активных и реактивных токов, хотя идентифицированная функция распределения соответствует измеренным величинам гармоник активных и реактивных токов по критериям согласия. В последнем случае необходимо попытаться подобрать другой закон распределения, наиболее точно описывающий распределение гармоник активных и реактивных токов.

В третьей главе представлен алгоритм вычислительной программы, позволяющей идентифицировать функцию распределения и вычислять с заданной вероятностью гармоники активных и реактивных токов нелинейной нагрузки. Блок-схема алгоритма приведена на Рисунке 6 и содержит следующие блоки.

Блок 1. Ввод ряда случайных величин гармоники активного или реактивного тока X : $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_m$, где m – количество элементов ряда X .

Блок 2. Определение числа интервалов гистограммы – S , их граничные значения – x_s , количество случайных величин ряда X , попавших в s -й интервал – m_s и построение гистограммы тока. В данной работе на основании многочисленных обработок результатов измерений параметров режимов гармоник и с учетом предложений, имеющих в литературе, принимается, что число S равно 19, если $m > 1000$; S равно 15, если $500 \leq m \leq 1000$; S равно 11, если $m < 500$.

Блоки 3-5. Сравнение гистограммы тока с кривыми двенадцати известных функций плотности вероятностей, используемых в вычислительной программе, для выдвижения гипотез о законе распределения тока.

Блок 6. Вычисление параметров, описывающих предполагаемый закон распределения тока ряда случайных величин X , по выражениям, представленным в специальной литературе.

Блок 7. Выбор критерия для проверки ряда случайных величин X на наличие выбросов в зависимости от предполагаемого закона распределения. Если предполагаемый закон распределения является нормальным, то для проверки ряда X на наличие выбросов используется критерий Ирвина. Если предполагаемый закон распределения отличается от нормального, то для проверки используется модификация критерия Дарлинга.

Блоки 8-9. Проверка на выброс наибольшего $x_{(m)}$ и наименьшего $x_{(1)}$ значений упорядоченного в порядке возрастания ряда случайных величин X ($x_{(1)} \leq x_{(2)} \leq \dots \leq x_{(i)} \leq \dots \leq x_{(m)}$) с помощью критерия Ирвина.

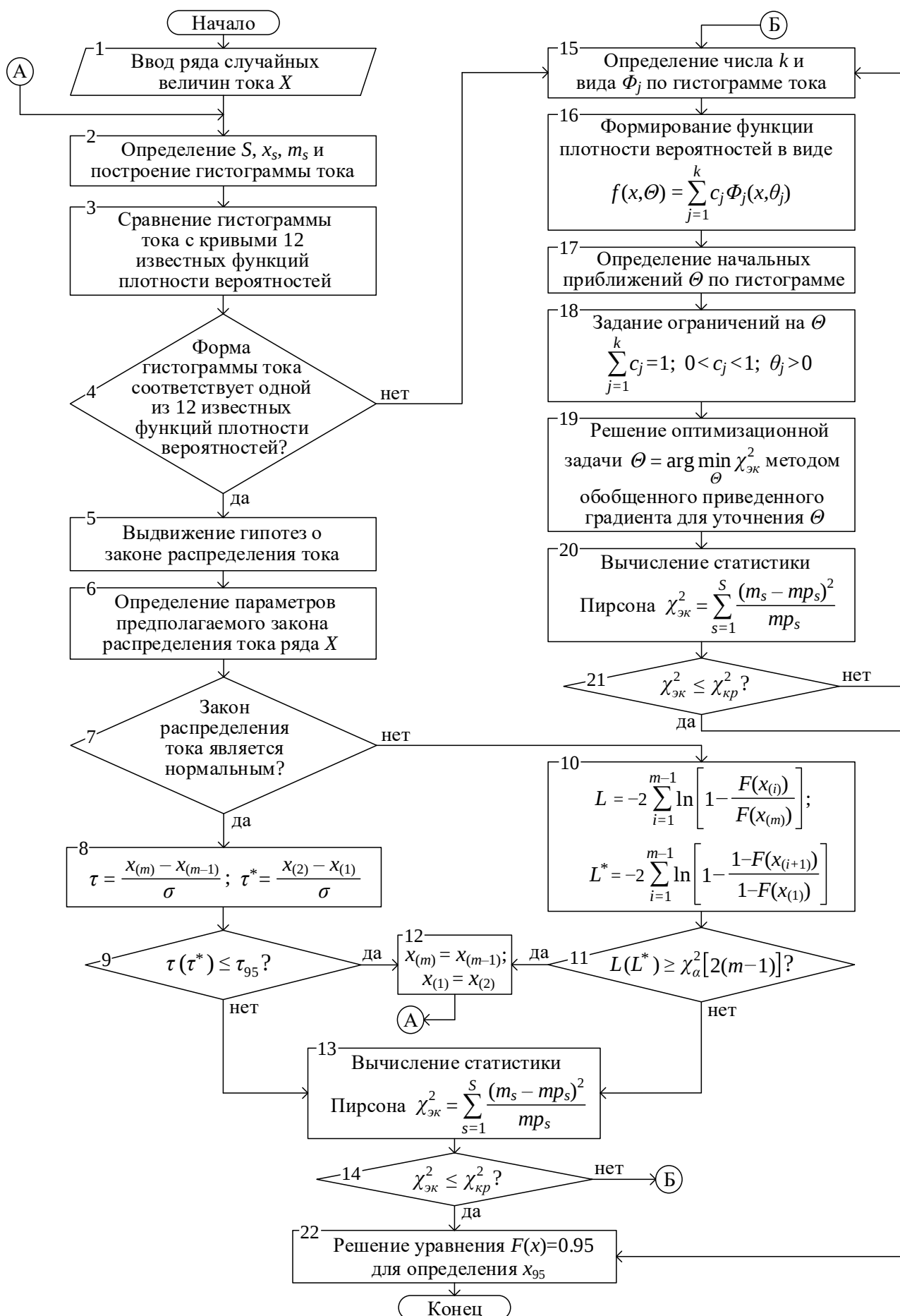


Рисунок 6 – Блок-схема алгоритма вычислительной программы

Статистики τ , τ^* вычисляются по выражениям, приведенным на Рисунке 6, где $\sigma = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2}$. Затем они сравниваются с критическим значением τ_{95} , приведенным в справочной литературе.

Блоки 10-11. Проверка на выброс наибольшего $x_{(m)}$ и наименьшего $x_{(1)}$ значений упорядоченного в порядке возрастания ряда случайных величин X ($x_{(1)} \leq x_{(2)} \leq \dots \leq x_{(i)} \leq \dots \leq x_{(m)}$) с помощью модификации критерия Дарлинга.

Статистики L , L^* вычисляются по выражениям, приведенным на Рисунке 6, где $F(x_{(i)})$, $F(x_{(m)})$, $F(x_{(i+1)})$, $F(x_{(1)})$ – значения функции распределения для соответствующих x . Затем статистики сравниваются со значением α -квантиля χ^2 -распределения $\chi^2_{\alpha}[2(m-1)]$, приведенным в справочной литературе.

Блок 12. Выполнение замены выбросов соседними элементами ряда X как $x_{(m)} = x_{(m-1)}$, $x_{(1)} = x_{(2)}$.

Блоки 13-14. Проверка согласия предполагаемого закона распределения тока с гистограммой с помощью критерия согласия Пирсона $\chi^2_{\text{эк}} \leq \chi^2_{\text{кр}}$.

Статистика критерия согласия Пирсона вычисляется по выражению

$$\chi^2_{\text{эк}} = \sum_{s=1}^S \frac{(m_s - mp_s)^2}{mp_s}, \quad (6)$$

где p_s – теоретическая вероятность попадания случайных величин ряда X в s -й интервал, которая вычисляется как разность значений функции распределения ряда X в конце и начале s -го интервала

$$p_s = F(x_{s+1}) - F(x_s), \quad (7)$$

где $F(x)$ – функция распределения ряда X , вычисляемая как

$$F(x) = \int_{x_{(1)}}^x f(x) dx, \quad (8)$$

mp_s – теоретическая частота попадания случайных величин ряда X в s -й интервал.

Затем вычисленное значение $\chi^2_{\text{эк}}$ сравнивается с критическим значением $\chi^2_{\text{кр}}$, приведенным в справочной литературе.

Блоки 15-21. Идентификация функции плотности вероятностей тока с помощью метода разделения смесей распределений.

Сначала визуальное по форме гистограммы тока выдвигается гипотеза о количестве компонент композиции и видах их функций плотности вероятностей. В качестве функций плотности вероятностей компонент композиции предлагаются двенадцать известных функций плотности вероятностей, используемых в вычислительной программе. Затем формируется функция плотности вероятностей тока в виде весовой суммы k компонент композиции

$$f(x, \Theta) = \sum_{j=1}^k c_j \Phi_j(x, \theta_j), \quad (9)$$

где $f(x, \Theta)$ – искомая функция плотности вероятностей тока; $k \geq 1$ – натуральное число; Φ_j – известная функция плотности вероятностей j -ой компоненты композиции; $\Theta = (c_1, \dots, c_k, \theta_1, \dots, \theta_k)$ – вектор параметров компонент композиции, которые необходимо определить; c_j – весовой коэффициент j -ой компоненты, $c_j > 0, j = 1, \dots, k, c_1 + \dots + c_k = 1$; θ_j – вектор параметров j -ой компоненты композиции.

Вектор Θ определяется с помощью ряда случайных величин X следующим образом. Задаются начальные приближения параметров вектора Θ , определенные в результате визуального анализа гистограммы. Например, на Рисунке 7 приведена гистограмма тока с двумя вершинами. Выдвигается гипотеза, что гистограмма имеет две компоненты и их функции плотности вероятностей описываются нормальным законом распределения, которое характеризуется двумя параметрами: μ – математическое ожидание и σ – стандартное отклонение.

Вектор θ_j в таком случае состоит из двух параметров, т.е. $\theta_1 = (\mu_1, \sigma_1)$ и $\theta_2 = (\mu_2, \sigma_2)$, а вектор Θ – из шести, т.е. $\Theta = (c_1, c_2, \mu_1, \mu_2, \sigma_1, \sigma_2)$. Начальные значения $\mu_1, \sigma_1, \mu_2, \sigma_2$ определяются по гистограмме следующим образом. Для определения c_1, c_2 принимается, что общая площадь гистограммы, находящаяся под кривыми компонент композиции равна 1. Величины c_1, c_2 задаются величинами, равными долям площадей под соответственными кривыми компонент композиции. Для нормального распределения положение вершин гистограммы относительно оси абсцисс позволяет определить математическое ожидание

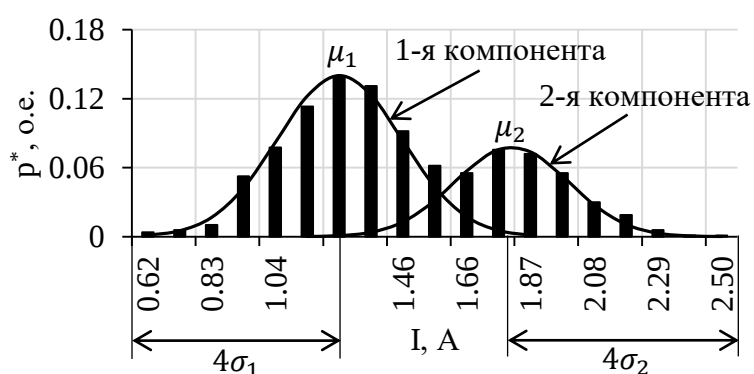


Рисунок 7 – Гистограмма тока с двумя вершинами

для каждой из компонент. Половина ширины фигуры под кривой плотности вероятностей компоненты дает возможность определить стандартное отклонение, так как при нормальном распределении интервал «четырех стандартных отклонений» включает в себя 99.99% значений ряда случайных величин X .

Если компоненты гистограммы имеют законы распределения, отличные от нормального, то начальные приближения параметров вектора Θ вычисляются с использованием цензурированных выборок, полученных из ряда случайных величин X .

Далее выполняется уточнение Θ путем решения оптимизационной задачи

$$\Theta = \operatorname{argmin}_{\Theta} \sum_{s=1}^S \frac{(m_s - mp_s)^2}{mp_s}, \quad (10)$$

при ограничениях

$$g_1(\Theta) = \sum_{j=1}^k c_j - 1 = 0, \quad (11)$$

$$h_1(\Theta) = -c_j < 0, \quad (12)$$

$$h_2(\Theta) = c_j - 1 < 0, \quad (13)$$

$$h_3(\Theta) = -\theta_j < 0. \quad (14)$$

Ограничения соответствуют следующему: (11) – сумма всех весовых коэффициентов должна равняться 1; (12) – все весовые коэффициенты являются положительными величинами; (13) – диапазон, в котором должны находиться значения весовых коэффициентов; (14) – все параметры вектора θ_j являются положительными величинами.

Выражение (6) связано с коэффициентами c_j и параметрами вектора θ_j с помощью выражений (7), (8), (9), из которых видно, что $\chi_{\text{эк}}^2$ является нелинейной функцией от $\Theta = (c_1, \dots, c_k, \theta_1, \dots, \theta_k)$, поэтому и оптимизационная задача является нелинейной. В данной работе она решается методом обобщенного приведенного градиента. В результате решения вычисляются уточненные параметры вектора Θ для описания закона распределения тока.

После уточнения параметров вектора Θ и их подстановки в (9) проводится проверка соответствия полученной функции плотности вероятностей форме гистограммы с помощью критерия согласия Пирсона. Если условие критерия согласия Пирсона не выполняется, то следует вернуться к блоку 15, чтобы предложить другие количество и/или виды компонент композиции распределений. Если условие выполняется, то следует переход к Блоку 22 для определения с вероятностью 95% величины тока в результате решения уравнения $F(x)=0.95$.

Вычислительная программа, разработанная на основе алгоритма, представленного на Рисунке 6, реализована в MS Excel и среде программирования Visual Basic для Windows-приложений. В программе представлены кривые функций плотности вероятностей двенадцати распределений, наиболее часто используемых при различных анализах: нормальное, Вейбулла, экспоненциальное, гамма-распределение, Рэлея, логнормальное, бета-распределение, распределение минимального значения, распределение максимального значения, логистическое, Максвелла и распределение Коши. Гипотезы о законе распределения гармоник тока выдвигаются на основе визуального сравнения формы гистограммы гармоник активного или реактивного токов с кривыми функций плотности вероятностей. Для вычисления параметров двенадцати распределений написана специальная программа в среде программирования Visual Basic для Windows-приложений, состоящая из двенадцати подпрограмм, каждая из которых предназначена для вычисления параметров одного конкретного распределения.

Вычислительная программа состоит из 8 листов MS Excel. На первом листе реализованы Блоки 1-2 алгоритма, на втором – Блоки 3-5, на третьем – Блок 6. Фрагмент листа программы Блок 6 представлен на Рисунке 8 в качестве иллюстрации.

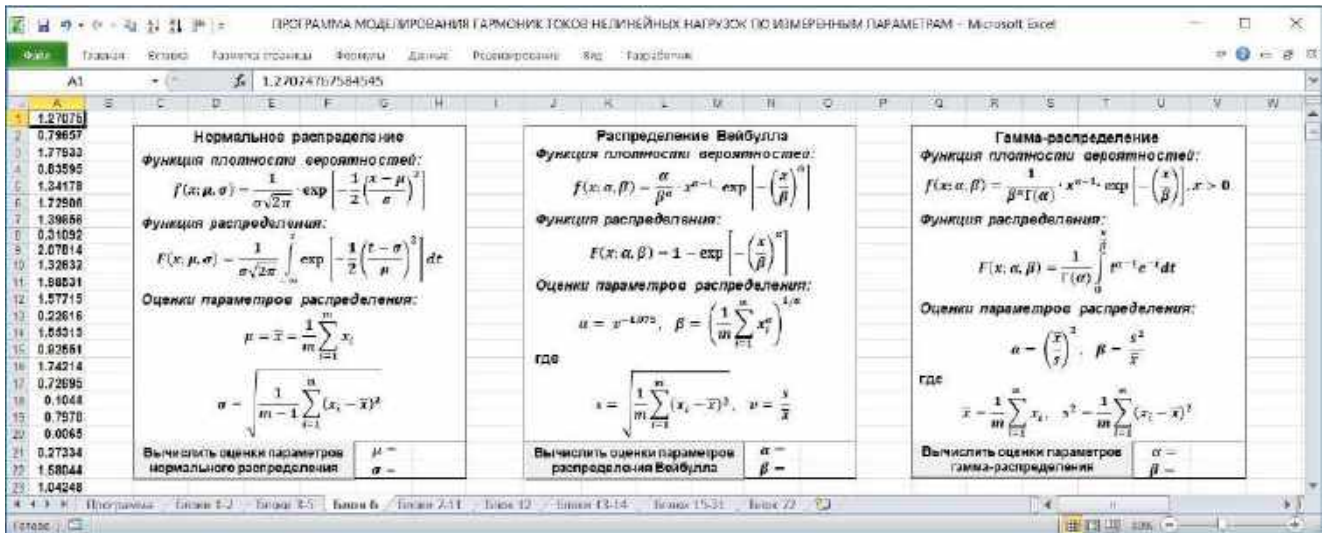


Рисунок 8 – Фрагмент третьего листа программы – Блок 6

На четвертом листе реализованы Блоки 7-11 алгоритма, на пятом – Блок 12, на шестом – Блоки 13-14. Лист шестой приведен на Рисунке 9.

На седьмом листе программы реализованы Блоки 15-21 алгоритма, на восьмом – Блок 22. Последний лист программы представлен на Рисунке 10.

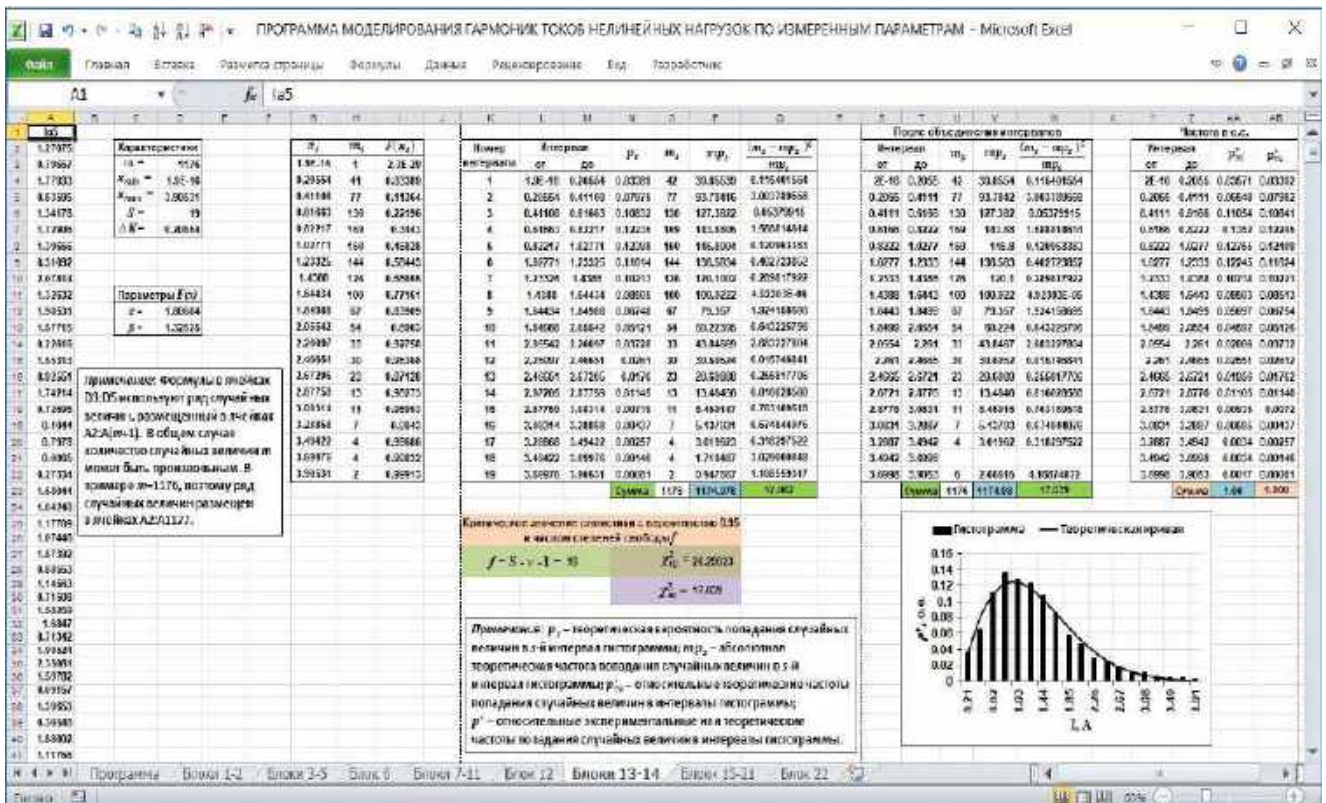


Рисунок 9 – Шестой лист программы – Блоки 13-14

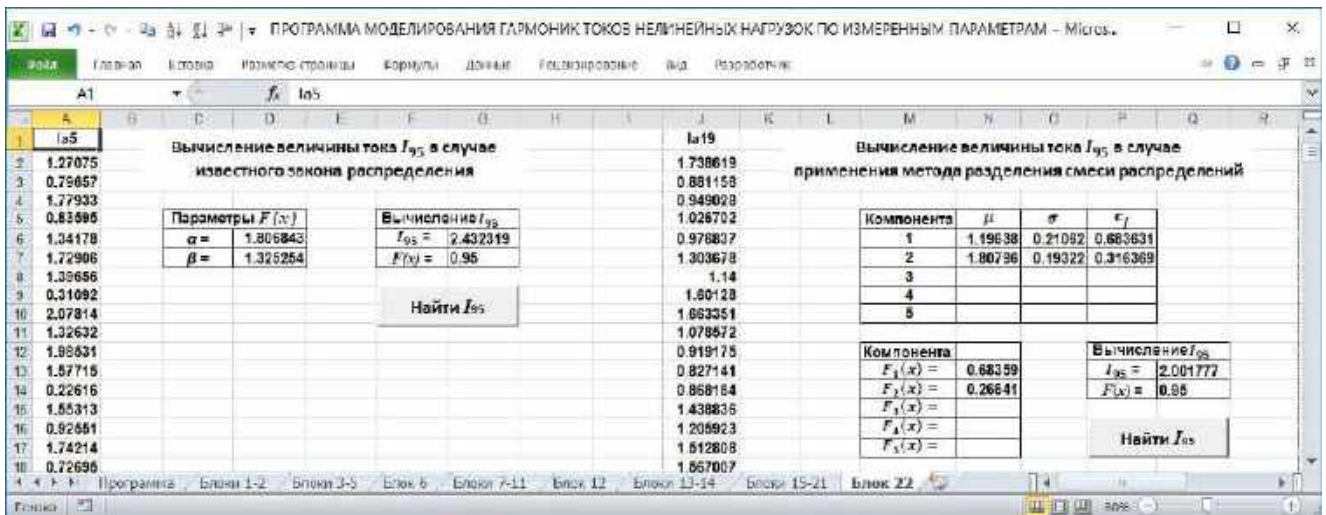


Рисунок 10 – Восьмой лист программы – Блок 22

В четвертой главе приведен пример применения разработанных методического подхода, алгоритмов и вычислительной программы для исследований и моделирования 3 и 5-ой гармоник токов в узлах присоединения к питающей сети тяговых трансформаторов четырех подстанций Восточно-Сибирской железной дороги (Мысовой, Татаурово, Заиграево, Ново-Ильинск), поставляющих электрическую энергию нелинейным нагрузкам большой мощности – электровозам. В результате исследований и вычислений получено, что гармоники токов и напряжений можно считать независимыми случайными величинами, что дает возможность использовать соответствующие математические методы. Законы распределения большинства гармоник активных и реактивных токов не подчиняются известным законам распределения, а имеют более сложные формы, представляющие собой композиции известных законов, таких как нормальный, Вейбулла, экспоненциальный и гамма-распределение. Законы распределения 3, 5-ой гармоник активных и реактивных токов приведены в Таблице 3. В таблице обозначено: В – распределение Вейбулла, Г – гамма-распределение, Э – экспоненциальное распределение, В + В – композиция двух распределений Вейбулла, В + Г – композиция распределения Вейбулла и гамма-распределения, Н + В – композиция нормального распределения и распределения Вейбулла, В + В + В – композиция трех распределений Вейбулла, Н + Г – композиция нормального распределения и гамма-распределения, В + Э – композиция распределения Вейбулла и экспоненциального.

Таблица 3 – Законы распределения гармоник активных и реактивных токов

n	Токи	Подстанция			
		Мысовая	Татаурово	Заиграево	Ново-Ильинск
3	I_{an}	В + В	В + Г	Э	Н + Г
	I_{rn}	В + Г	Г	В + Г	Н + В
5	I_{an}	В + В	В + В + В	В + Э	В + В
	I_{rn}	Н + В	Н + В	В	Н + В

Вычисленные с вероятностью 95% величины 3 и 5-ой гармоник активных и реактивных токов в узлах присоединения подстанций с учетом направлений протекания представлены в Таблице 4. В таблице знак минус “-” означает, что активные или реактивные токи направлены из нагрузки в сеть. Токи без знака (положительные) направлены из сети в нагрузку. Правильность вычислений величин гармоник активных и реактивных токов подтверждена проверкой, выполненной в соответствии с пунктом 7 методического подхода на стр. 15.

Таблица 4 – Вычисленные с вероятностью 95% величины гармоник активных и реактивных токов, А

n	Токи	Подстанция			
		Мысовая	Татаурово	Заиграево	Ново-Ильинск
3	I_{an}	3.7	-71.0	3.8	-9.2
	I_{rn}	-2.8	-73.5	2.5	-7.2
5	I_{an}	2.4	-15.6	2.2	1.7
	I_{rn}	-2.5	-55.2	2.9	3.1

Задачей данной диссертации являлась разработка нового способа моделирования нелинейных нагрузок для усовершенствования программно-вычислительного комплекса «Гармоники», разработанного в ИСЭМ СО РАН. При задании параметров нелинейных нагрузок в прежней версии комплекса «Гармоники» принималось, что ряды измеренных случайных величин всех гармоник токов распределены по нормальному закону, что позволяло вычислять лишь ориентировочные значения токов. Затем в течение длительного времени методом проб и ошибок они изменялись, чтобы в результате получить измеренные или близкие к измеренным величины гармоник напряжения в узлах сети. Для некоторых схем сети подобрать значения токов не удавалось, поскольку вычисленные по (1) значения гармоник напряжения значительно отличались от измеренных. Для реализации в комплексе «Гармоники» предложенного в данной работе способа моделирования нелинейных нагрузок в ряд программ комплекса были внесены изменения, представленные в диссертации.

В Таблице 5 приведены результаты сопоставления $K_{U(3)}$, $K_{U(5)}$ для фрагмента сети, питающей двенадцать подстанций Восточно-Сибирской железной дороги, вычисленных до ($K_{U(n)-Д}$) и после ($K_{U(n)-П}$) усовершенствования комплекса «Гармоники». В прежней версии комплекса режим гармоник был смоделирован с учетом результатов измерений $K_{U(n)}$ на четырех названных подстанциях. Для вычисления $K_{U(n)-Д}$, $K_{U(n)-П}$ использовались величины гармоник активных и реактивных токов, приведенные в Таблице 4. В последней колонке Таблицы 5 приведены отличия $\Delta K_{U(n)}$ коэффициентов $K_{U(n)-Д}$ от коэффициентов $K_{U(n)-П}$, вычисленные как $\Delta K_{U(n)} = \frac{|K_{U(n)-П} - K_{U(n)-Д}|}{K_{U(n)-Д}} \cdot 100\%$. Из таблицы видно, что отличия коэффициентов $K_{U(3)}$, $K_{U(5)}$ незначительные.

Таблица 5 – Результаты сопоставления $K_{U(3)}$, $K_{U(5)}$, вычисленных до и после усовершенствования комплекса «Гармоники»

Подстанция	n	$K_{U(n)-Д}$, %	$K_{U(n)-П}$, %	$\Delta K_{U(n)}$, %
Мысовая	3	1.12	1.10	1.79
	5	1.16	1.06	8.62
Посольская	3	1.25	1.28	2.40
	5	1.19	1.07	10.08
Каменск	3	1.27	1.31	3.15
	5	1.22	1.09	10.66
Селенгинский ЦКК	3	1.29	1.32	2.32
	5	1.23	1.10	10.57
Татаурово	3	1.37	1.44	5.11
	5	1.29	1.14	11.63
Северная	3	1.36	1.41	3.68
	5	1.38	1.26	8.70
Районная	3	1.37	1.42	3.65
	5	1.39	1.29	7.19
Моторная	3	1.38	1.43	3.62
	5	1.41	1.32	6.38
Заиграево	3	1.49	1.56	4.70
	5	1.76	1.73	1.70
Ново-Ильинск	3	1.66	1.58	4.82
	5	2.07	2.02	2.42
Кижа	3	1.69	1.74	2.96
	5	2.27	2.24	1.32
Петровск-Забайкальский	3	1.70	1.73	1.76
	5	2.56	2.54	0.78

Таким образом, результаты расчетов показывают, что разработанный в данной работе подход к моделированию нелинейных нагрузок является эффективным и целесообразным, поскольку позволяет повысить точность определения величин гармоник токов и, в результате, значительно сократить время моделирования нелинейных нагрузок и режимов гармоник всей сети.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты и выводы по диссертационной работе заключаются в следующем:

1. Разработан методический подход для моделирования нелинейных нагрузок на основе измерений параметров режимов гармоник в узлах присоединения

нелинейных нагрузок к электрической сети, учитывающий особенности режимов гармоник, в том числе, вероятностный характер их параметров.

2. Разработаны алгоритмы моделирования нелинейных нагрузок на основе измерений параметров режимов гармоник в узлах присоединения нелинейных нагрузок к электрической сети, позволяющие представить их модели в виде набора функций распределения гармоник токов, соответствующих известным законам распределения, и законам, описываемым композициями известных законов, позволяющие определять величины токов с заданной вероятностью, необходимой для расчета режимов гармоник.

3. Разработаны алгоритм вычислительной программы и вычислительная программа для идентификации функций распределения измеренных рядов случайных величин гармоник активных и реактивных токов нелинейных нагрузок и вычисления их значений с заданной вероятностью, позволяющие повысить эффективность идентификации функций распределения гармоник активных и реактивных токов.

4. С помощью разработанных методического подхода, алгоритмов и вычислительной программы проведены исследования и моделирование 3 и 5-ой гармоник токов в узлах присоединения к электрической сети тяговых трансформаторов четырех подстанций Восточно-Сибирской железной дороги, поставляющих электрическую энергию нелинейным нагрузкам большой мощности – электровозам. Полученные результаты показали, что величины гармоник токов распределены по различным законам, в том числе, нормальному, Вейбулла, экспоненциальному, гамма-распределению, а также по законам, описываемым композициями распределений.

5. Разработан ряд программ, позволивших усовершенствовать программно-вычислительный комплекс «Гармоники», для представления нелинейных нагрузок в виде моделей, предложенных в данной работе. На примере моделирования гармоник токов в узлах присоединения к электрической сети тяговых трансформаторов четырех подстанций Восточно-Сибирской железной дороги проведены вычисления коэффициентов $K_{U(3)}$ и $K_{U(5)}$ с помощью программно-вычислительного комплекса «Гармоники» до и после его усовершенствования. Результаты расчетов показывают, что разработанный в данной работе подход к моделированию гармоник токов нелинейных нагрузок является эффективным и целесообразным.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК, включенные в РИНЦ

1. Коверникова Л.И., Лыонг Ван Чынг. Алгоритм моделирования нелинейных нагрузок сети высокого напряжения по измеренным параметрам // Электричество. – 2017. – № 10. – С. 16-25.

2. Коверникова Л.И., Лыонг Ван Чынг. Алгоритм и компьютерная программа моделирования нелинейных нагрузок по измеренным параметрам режима электрической сети // Вестник ИрГТУ. – 2018. Т. 22. № 5. С. 152-165. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-5-152-165.

Статья в зарубежном издании, индексируемом в Web of Science и Scopus

3. Kovernikova L.I., Luong Van Chung. An Algorithm for Modeling Nonlinear Loads Based on Field Measurement Parameters // Proceedings of 18th IEEE International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Ljubljana (Slovenia), 13-16th May, 2018. DOI: 10.1109/ICHQP.2018.8378814. WOS: 000444771900003.

В других изданиях, четыре из которых включены в РИНЦ

4. Коверникова Л.И., Лыонг Ван Чынг. Некоторые результаты анализа токов гармоник в узле присоединения тяговой подстанции к питающей сети // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2013. – Т. 2, С. 204-208.

5. Лыонг Ван Чынг, Коверникова Л.И. Анализ режима гармоник в узле присоединения тяговой подстанции к питающей сети // Сборник трудов VI Всероссийской научно-практической конференции «Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов». – Томск, 24-26 апреля 2013. – Т. 1, С. 286-291.

6. Коверникова Л.И., Лыонг Ван Чынг. Оценка стационарности временных рядов измеренных параметров // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2014. – Т. 2, С. 260-264.

7. Коверникова Л.И., Лыонг Ван Чынг. Анализ активных мощностей гармоник целлюлозно-бумажного комбината // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2015. – Т. 2, С. 123-128.

8. Коверникова Л.И., Лыонг Ван Чынг. Алгоритм моделирования нелинейных нагрузок по измеренным параметрам // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2016. – Т. 2, С. 279-284.

9. Kovernikova L.I., Luong Van Chung. Modeling of nonlinear loads in high-voltage network by measured parameters // Proceedings of 15th International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'17), Malaga (Spain), 2017.

10. Kovernikova L.I., Luong Van Chung. Modeling of nonlinear loads in high-voltage network by measured parameters // Renewable Energy & Power Quality Journal of European Association for the Development of Renewable Energies. – 2017. – Vol. 1, No. 15. – P. 463-467.

11. Лыонг Ван Чынг, Коверникова Л.И. Применение смесей вероятностных распределений при моделировании нелинейных нагрузок // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2017. – Т. 2, С. 216-221.

12. Коверникова Л.И., Лыонг Ван Чынг, Федчишин В.В. Моделирование токов нелинейных нагрузок методом разделения смесей распределений // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2018. – Т. 5, № 2. – С. 10-15. DOI: 10.24892/RIJEE/20180202.

13. Kovernikova L.I., Luong Van Chung, Fedchishin V.V. Modeling Non-Linear Load Currents by Mixture Distribution Separation // Proceedings - 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Moscow (Russian), 15-18th May, 2018. DOI: 10.1109/ICIEAM.2018.8728851.

14. Коверникова Л.И., Лыонг Ван Чынг. Алгоритм и компьютерная программа моделирования нелинейных нагрузок по измеренным параметрам режима электрической сети // Оперативное управление в электроэнергетике: Подготовка персонала и поддержание его квалификации. – № 5(74)-2018. – С. 46-57.

15. Коверникова Л.И., Лыонг Ван Чынг, Нго Ван Кыонг. Особенности параметров режимов гармоник в узле присоединения целлюлозно-бумажного комбината к питающей сети // Интеллектуальная электротехника. – 2018. – № 3. – С. 15-33.