

**Институт машиноведения, автоматике и геомеханики  
Национальной академии наук Кыргызской Республики  
Ошский государственный университет  
Кыргызский государственный технический университет им. и. Раззакова**

**Диссертационный совет Д 05.24.705**

На правах рукописи

**УДК: 621.3.017:004.383.4(043.3)**

**Бузурманкулова Чолпон Мейманалыевна**

**Исследование влияния качества электрической  
энергии на потери в элементах промышленных сетей с использованием  
компьютерного моделирования**

Специальность 05.14.02 – электростанции и электроэнергетические системы

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Бишкек 2025**

**Работа выполнена** на кафедре электроэнергетика Кыргызского государственного технического университета им. И.Раззакова

**Научный руководитель** Сатаркулов Калмурза  
кандидат технических наук, доцент  
профессор Токмокского технического филиала им. Х.А. Рахматулина  
Кыргызского государственного технического университета  
им. И.Раззакова

**Официальные оппоненты:**

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

**Ведущая организация:**

\_\_\_\_\_

Защита состоится \_\_\_\_\_ 2025 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д.05.24.705 по защите диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук при Институте машиноведения, автоматики и геомеханики Национальной академии наук Кыргызской Республики, Ошского государственного университета, Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова по адресу: 720055, г. Бишкек, ул. Скрябина 23, (корпус 1). Ссылка доступа к видеоконференции защиты диссертации:

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеках Института машиноведения, автоматики и геомеханики Национальной академии наук Кыргызской Республики (720055, г. Бишкек, ул. Скрябина, 23, (корпус 1)), Ошского государственного университета (723500, г. Ош, ул. проспект Ленина, 331), Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова (720044, г. Бишкек, ул. проспект Ч.Айтматова, 66) и на сайте Национальной аттестационной комиссии при Президенте Кыргызской Республики:

Автореферат разослан

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
к.т.н., доцент

Медеров Т.Т.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** Вопросы обеспечения качества электроэнергии (КЭ) систематически возникают в электроэнергетических системах (ЭЭС) разных стран мира. Связано это с увеличением доли электроприемников (ЭП) с нелинейной вольт-амперной характеристикой (ВАХ) (далее «нелинейная нагрузка») в ЭЭС, которые приводят к возникновению гармонических и интергармонических составляющих в составе тока нагрузки и к увеличению потерь электроэнергии в сетях.

Важнейшими количественными показателями технического состояния электрических сетей и уровня их эксплуатации являются величина потерь электроэнергии и тенденция её изменения. Успешное решение задачи поддержания их на минимальном уровне – залог повышения энергоэффективности электрических сетей. Поэтому проблемы исследования и снижения потерь электроэнергии в электрических сетях на основе научных изысканий, направленных на разработку методов исследования процессов в распределительных сетях с целью поиска путей снижения потерь ЭЭ в элементах распределительной сети, дополнительно подтверждает актуальность темы.

**Связь темы диссертации с приоритетными научными направлениями, крупными научными программами (проектами), основными научно-исследовательскими работами, проводимыми образовательными и научными учреждениями.** Данная работа связана с научной работой Института энергетики и связи при КГТУ им. И. Раззакова и научно - исследовательскими работами по грантам Министерства образования и науки Кыргызской Республики на тему «Методика по расчету нормативных требований в степени компенсации реактивной мощности на границе собственных электрических сетей ОАО «НЭСК» и пользователей»

**Цель и задачи исследования.** Разработка инструментария для моделирования и исследования, тока нелинейной нагрузки с гармоническими и интергармоническими составляющими, с целью оценки добавочных потерь электроэнергии в токопроводящих элементах промышленной сети.

Для достижения цели исследования в диссертационной работе необходимо решить следующие задачи:

1. Анализ причин ухудшения качества электроэнергии при различных режимах работы ЭП;
2. Анализ методов моделирования, программных средств, используемых для достижения поставленной цели;
3. Разработка компьютерных моделей исследуемой промышленной сети в среде Simulink/SimPowerSystems, предназначенных для исследования влияния различных факторов на дополнительные потери мощности и электроэнергии в проводящих элементах промышленных сетей, а также для установления коррелированности между характером вольтамперной характеристикой нелинейных элементов и возможностью появления интергармоник;

4. Анализ характера взаимодействия между основной гармоникой и интергармоническими составляющими в токопроводящих элементах промышленной сети с помощью инструментария в виде виртуального прибора в среде LabVIEW;
5. Разработка виртуального прибора для автоматизации расчета реального коэффициента активных потерь во внешней сети промпредприятия.

**Научная новизна работы:**

1. На базе программного комплекса Matlab/Simulink/SimPowerSystems и LabVIEW разработана структурная схема в среде Simulink и имитационная модель (ИМ) исследуемой промышленной сети в среде SimPowerSystems. ИМ позволяет воспроизвести работу электротехнических устройств во временной области, а также выполнять различные виды их анализа по определению добавочных потерь электроэнергии в исследуемой сети от гармонических и интергармонических составляющих в нагрузочном токе.
2. Разработанные компьютерные модели нелинейных элементов (НЭ) позволило исследовать, влияние вида характеристик НЭ на спектральный состав сгенерированных ими высших гармоник включая и интергармоники.
3. Предложено аналитическое описание несинусоидального тока в составе интергармоник. Результат аналитического описания показал, что, на амплитуду одной интергармоники накладываются синусоидальные колебания усреднённой частотой модулированной амплитудой смещения, что дает значительное увеличение общей амплитуды. Этим результатом можно обосновать одно из возможных причин увеличение потерь в проводнике за счет возникновения дополнительных потерь мощности.
4. На базе графической среды программирования LabVIEW, ориентированной на решение задач из области АСНИ, разработан инструментарий в виде ВП для моделирования мгновенных значений тока нагрузки с высшими гармониками и интергармониками с возможностью статистической их обработки и оценки потерь электроэнергии в токопроводящих элементах промышленной сети. Результаты численного эксперимента и их графическое представление, а также статистическая обработка полученных результатов позволили, установить еще одну из возможных причин возникновения дополнительных потерь мощности от интергармонических составляющих в сигнале (ток, напряжение) обусловленную нелинейной нагрузкой.
5. Результаты численного эксперимента показали, что когда на каноническую гармонику накладываются, ряд интергармоник одной из причин увеличение потерь мощности, за счет добавочных потерь связан с появлением постоянной составляющей в составе сигнала (ток, напряжение). Численный эксперимент проводился на примере сигнала состоящих из следующих частот (50, 92, 167, 270, 273, 276, 279, 282, 285, 288, 291) [Гц] с соответствующими амплитудными значениями (220, 40, 40, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20) [В]. Как известно, когда несинусоидальность обусловлена только гармониками, кратные 50 Гц, постоянная составляющая отсутствует, разумеется, при отсутствии постоянной составляющей в исходном несинусоидальном сигнале.

6. Численный эксперимент также показал, что сумма основной гармоники и интергармоник ведет себя как случайный процесс, тогда как каждая из слагаемых временных функций детерминированы. Интересным является тот факт, что при отсутствии некоторых интергармоник (276 Гц выше приведенном примере) процесс преобразуется в устойчивую функцию со случайно изменяющейся амплитудой в сторону возрастания времени и представляющей одну из реализаций случайного процесса.

7. Разработан ВП для автоматизации расчета реального коэффициента активных потерь во внешней сети промпредприятия, с учетом, что в составе нагрузочного тока возможны интергармоники.

#### **Практическая значимость полученных результатов.**

Разработанные виртуальные приборы позволяют обосновать и исследовать влияние дополнительных, ранее трудно учитываемых факторов на потери мощности и энергии в проводящих элементах промышленных сетей, что должно использоваться при оценке потерь в процессе эксплуатации промышленных сетей, содержащих нелинейные нагрузки.

Результаты диссертационной работы рекомендованы для анализа возможных добавочных потерь в службе эксплуатации промышленных сетей, а также используются для проведения исследовательских работ на кафедре «Электроэнергетика» КГТУ им. И. Раззакова при анализе степени влияния различных, трудно учитываемых факторов на величину технических потерь в проводящих элементах промышленных сетей.

Разработанные методы моделирования ГЭН используются в дипломном и курсовом проектировании на выше указанной кафедре.

#### **Основные положения диссертации, выносимые на защиту.**

1. Структурная схема в среде Simulink и имитационная модель исследуемой промышленной сети в среде SimPowerSystems, с результатами численного эксперимента;
2. Многофункциональный виртуальный прибор на основе LabVIEW, предназначенный для исследования влияния различных факторов на потери мощности и электроэнергии в проводящих элементах промышленных сетей и имеющий возможность рассчитать электрическую нагрузку исследуемого элемента сети;
3. Инструментарий в виде ВП для моделирования мгновенных значений тока нагрузки с высшими гармониками и интергармониками с возможностью статистической их обработки и оценки потерь электроэнергии в токопроводящих элементах промышленной сети;
4. Виртуальный прибор для автоматизации расчета реального коэффициента активных потерь во внешней сети промпредприятия;
5. Результаты анализа влияния различных факторов на потери в проводящих элементах

на основе компьютерного моделирования режимов с использованием LabVIEW и Simulink/ SimPowerSystems.

**Личный вклад соискателя.** Все результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно. Из работ, которые опубликованы в соавторстве, использованы только те положения и идеи, которые являются результатом собственных исследований соискателя.

**Апробация результатов диссертации.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на

- VII международной научно-практической конференции «Интеграционные прогрессы в научно-техническом и образовательном пространстве» (Москва-Бишкек КГТУ-НИУ МЭИ, 2021 г.);

- Международной научной конференции «Региональный вуз – основа развития региона» (Токмок, 2022 г.);

- Международной научно-практической конференции посвященной 70-летию известного ученого М.Дж. Джаманбаева (Бишкек, 2022);

- Международной научно-практической конференции «Роль науки и инновационных технологий в устойчивом развитии горных территорий и экосистем» (Бишкек, 2022);

- 65- ой международной сетевой научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов магистрантов и студентов «Современная наука: актуальные вопросы, достижения и инновации» (Бишкек, 2023);

- 30-ой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. Радиоэлектроника, электротехника и энергетика (Бишкек, 2024)

**Полнота отражения результатов диссертации в публикациях.** Основные научные результаты, полученные в диссертации, опубликованы в 14 печатных работах, имеется 3 патента на изобретение (от Кыргызпатент).

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и 4 приложений; содержит 139 стр. основного текста, включая 54 рисунка, 11 таблиц и библиографический список использованной литературы из 114 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель и задачи исследования, указаны методы исследования, определены научная новизна и практическая ценность результатов исследования, изложены основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации основных результатов.

**Глава 1. Обзор литературы. Анализ причин ухудшения качества электроэнергии. Последствия ухудшения в системах электроснабжения.** Значительный вклад в развитие методов исследования, теории и практических подходов к обеспечению КЭ внесли такие зарубежные ученые как Дж. Арриллага, Д. Брэдли, Р. Дрехслер, М. Масум, Э. Фукс и др. В России и странах бывшего Советского Союза вопросами обеспечения КЭ

занимались В.Э. Воротницкий, И.В. Жежеленко, Ю.С. Железко, И.И. Карташев, В.Г. Кузнецов, Л. И. Коверникова., Ю.К. Розанов, В.Г. Сальников, А.К. Шидловский, Ф.А. Зыкин, В.Я. Майер., В.Г. Курбатский, Л.А. Кучумов., С.С. Смирнов, Г.Г. Трофимов и др. В области КЭ множество исследований выполнено в следующих ведущих научно-

исследовательских институтах: ВНИИЭ, институт электродинамики АН Украины, ИСЭМ СО РАН и НИУ «МЭИ». Разносторонне обсуждают проблемы КЭ на Международной конференции по системам распределения электроэнергии (CIRED), Международном совете по большим электрическим системам (CIGRE), проводятся исследования под управлением комитета качества электроэнергии международного Института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике (IEEE). При этом в опубликованных материалах перечисленных конференций на недостаточном уровне уделено внимание влиянию токов высших интергармонических составляющих на потери мощности в токопроводящих элементах ЭП и ЭО и дальнейшему развитию инструментов исследования. Поэтому данная научная работа посвящена исследованиям в этом направлении.

По материалам обзора изложены некоторые особенности энергетических процессов в системах электроснабжения с нагрузками, ухудшающими качество электроэнергии. В настоящее время такие нагрузки называются искажающими. Они включают нагрузки с нелинейными характеристиками, с несимметричными трехфазными сопротивлениями и с сопротивлениями, изменяющимися во времени.

Указывается, что при рассмотрении ряда проблем неучёт выше отмеченных энергетических процессов может привести к некорректным выводам или к значительным затруднениям. Характерной особенностью искажающих нагрузок является то, что они снижают КЭ в системах электроснабжения и являются источниками высших гармоник, трехфазных симметричных составляющих обратной и нулевой последовательностей. Иначе говоря, можно считать, что искажающие нагрузки обладают преобразовательными свойствами: получая энергию из сети, такие нагрузки большую часть ее используют, превращая в другие виды энергии, а оставшаяся часть передается обратно в сеть в виде искажений, образуя аномальные составляющие тока и напряжения (кратные и некратные гармоники, составляющие обратной и нулевой последовательностей).

В научных публикациях отмечается необходимость учета этих процессов: при контроле и учете качества электрической энергии (КЭ); при измерении, анализе и учете дополнительных потерь в сетях. Важность этих вопросов определяется тем, что потери электроэнергии являются важнейшим показателем экономичности работы электрических сетей и одним из главных индикаторов эффективности деятельности энергоснабжающих организаций.

На основе выше отмеченных сведений можно заключить, что: для оценки КЭ по системе в целом при анализе основных требований к моделям электрических систем, содержащих распределенные смешанные источники искажения напряжения, необходимо решение ряда задач, которые решаются только расчетным путем или методом компьютерного моделирования; одним из вариантов решения задачи по контролю качества электроэнергии является использование системы мониторинга, основанной на методах виртуального (компьютерного) моделирования физических процессов, которые широко применяются во всех областях науки и производства, так как они позволяют оперативно и с наименьшими затратами найти определенные параметры конечного результата; несомненным достоинством компьютерных экспериментов на основе моделирования является возможность совместного расчета потери электроэнергии и расчетного значения электрической нагрузки с учётом возможного ухудшения качества электроэнергии. При этом

можно учитывать сколь угодно большое количество факторов, обеспечивая тем самым полный контроль влияния всех входных параметров на результат, что не всегда возможно в реальном эксперименте.

**Глава 2. Материалы и методы исследования. Компьютерный метод расчета потерь мощности в токопроводящих элементах промпредприятий.** Посвящена компьютерным методам расчета потерь мощности в проводящих элементах промпредприятий.

**Объектом исследования** являются токопроводящие элементы (провода, кабели, шинопроводы) промышленных сетей, содержащих ЭП с нелинейной ВАХ.

**Предметом исследования** является влияние токов высших гармоник и интергармоник на потери электроэнергии в объекте исследования.

**Методы исследования.** В работе использованы методы теории электрических цепей и численного эксперимента на основе компьютерного моделирования в среде LabVIEW и системы Matlab с пакетом расширений Simulink и библиотеки SimPowerSystems.

В ней приведены некоторые результаты собственных исследований. В начале главы приведены результаты анализа обзора научных публикаций, касающихся методов расчета потерь электроэнергии. Отмечено, что многие ученые обращают внимание на отсутствие в настоящий момент общепринятой теории мощности при несинусоидальных напряжениях и токах, которая могла бы использоваться в качестве 1

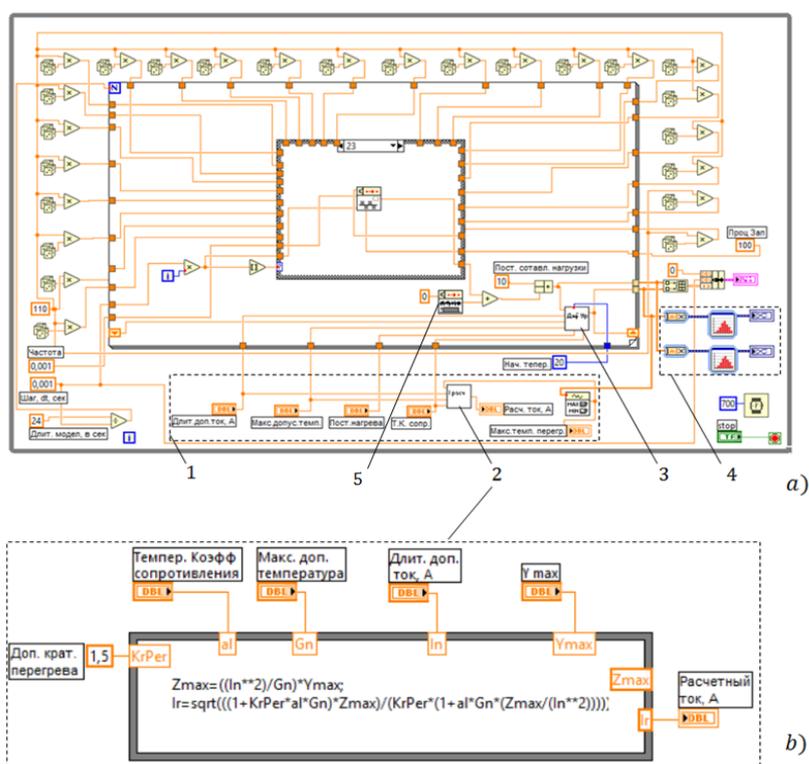


Рисунок 1 - *a* – блок-диаграмма ВП по исследованию теплового режима работы токоведущих элементов; *b* – ВПП определения расчетного тока

При разработке ВП для исследования теплового режима работы токоведущих элементов электрической сети использовано более точное дифференциальное уравнение (ДУ), учитывающее зависимости сопротивления и постоянного нагрева токопровода от температуры.

На рисунке 1 представлен блок-диаграмма разработанного ВП для исследования теплового режима и выбора по нагреву токоведущих элементов. Сама программа представлена в виде иконок графического языка LabVIEW, связанных между собой

проводниками, по которым передаются данные от узла к узлу программы. В блок-диаграмме закладывается алгоритм работы ВП, ВПП и последовательность производимых операций. Использованные при разработке ВП и ВПП элементы языка LabVIEW (константы, функции, подприборы и структуры) в диссертации показаны в соответствующих таблицах.

В блок-диаграмме (рисунок 2, а) алгоритм функционирования ВП реализован с помощью подпрограмм (подприборов), пронумерованных цифрами 1, 2, 3, 4. Вся оставшаяся непронумерованная область блок-диаграммы соответствует подпрограмме моделирования группового графика нагрузки. С помощью функции, пронумерованной цифрой 5, можно воздействовать на смоделированный график нагрузки с целью воздействия на качество ЭЭ. На участках 1-3 реализованы функциональные возможности ВПП, выполняющего операцию численного интегрирования нелинейного дифференциального уравнения (НДУ) (2), определение расчетного тока от группы ЭП. При этом непосредственное численное интегрирование производится в ВПП (цифра 3).

В результате во второй главе решена задача по разработке в среде LabVIEW виртуального прибора для численного интегрирования дифференциального уравнения перегрева жил ткопроводов относительно температуры окружающей среды, позволяющего произвести выбор токоведущих элементов по нагреву. При этом LabVIEW-программа в комплексе с соответствующими аппаратными средствами позволяет разрабатывать системы измерения, контроля, диагностики и управления практически любой сложности.

**Глава 3. Результаты собственных исследований. Исследование потерь мощности в элементах сети с учетом качества электроэнергии в среде matlab/simpowersystems/simulink и labview.** Использована технология компьютерного моделирования при исследовании потери мощности в элементах сети с учетом качества электроэнергии. Используя достоинство Simulink и SimPowerSystems (SPS), комбинируя возможности, заложенные в этих пакетах, можно имитировать работу электротехнических устройств во временной области, а также выполнить различные виды их анализа. Кроме того, SimPowerSystems (SPS) позволяет моделировать сложные электротехнические системы, сочетая методы имитационного и структурного моделирования. SPS обладает многочисленной библиотекой готовых блоков, необходимых для построения моделей исследуемых систем. При отсутствии необходимых исследователю моделей устройств их можно создать на основе Simulink и SPS - блоков. В этом разделе диссертации созданы модели нелинейных резисторов и индуктивностей (насыщающегося реактора), которые использованы при разработке SPS – модели исследуемой сети. В качестве модели использована электрическая цепь с резистором, имеющая нелинейную вольт-амперную характеристику (рисунок 2).

Проведено исследование влияния нелинейного резистора на гармонический состав тока в сети, являющийся одним из параметров, оценивающих качество электроэнергии и потери мощности и энергии в элементе этой сети, с помощью SPS - модели (рисунок 2) исследуемой сети, которая состоит из следующих блоков (на рисунок 2 они ограничены пунктирными прямоугольниками).

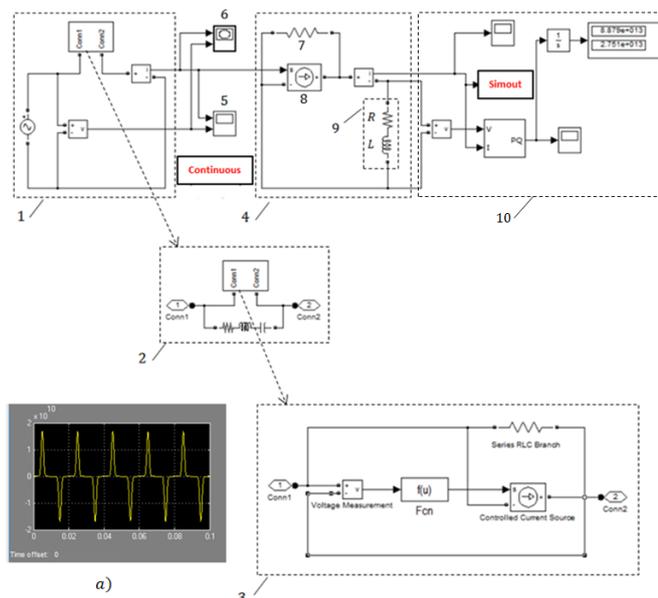


Рисунок 2 - SPS – модель участка исследуемой сети

Назначение этих блоков заключается в следующем: 1– формирует сигнал управления, (рисунок 2, а), который является безразмерным Simulink – сигналом, закон изменения которого соответствует работе нелинейного резистора; 2 – содержание блока  $R_{нр-ш}$ , представляющего нелинейный резистор (блок 3), шунтированный  $RLC$  – ветвью. Шунт обеспечивает устойчивое функционирование нелинейного резистора, т.е. устойчивость его ВАХ; 3 – схема, представляющая модель нелинейного резистора; 4 – схема, формирующая в нагрузке 9 электрический ток в соответствии с сигналом управления (рисунок 5, а), при этом использован управляемый источник тока 8, который шунтирован резистором 7; 5 - осциллограф; 6 – графопостроитель; 10 - измерительный блок, содержащий осциллограф, на экране которого высвечивается временная зависимость потери мощности при  $R - L$  нагрузке. Блок содержит и дисплей, показывающий потери энергии за период продолжительности моделирования.

Для оценки степени уровня корреляции качества электроэнергии с потерей мощности в элементе электрической сети ( $R - L$ ) проведены вычислительные эксперименты (ВЭ) при следующих численных значениях параметров модели нелинейного резистора  $\log i = \log I_0 + \alpha(\log u - \log U_0)$ :  $U_0 = 110$  Кв;  $I_0 = 500$  А;  $\alpha = 25$ .

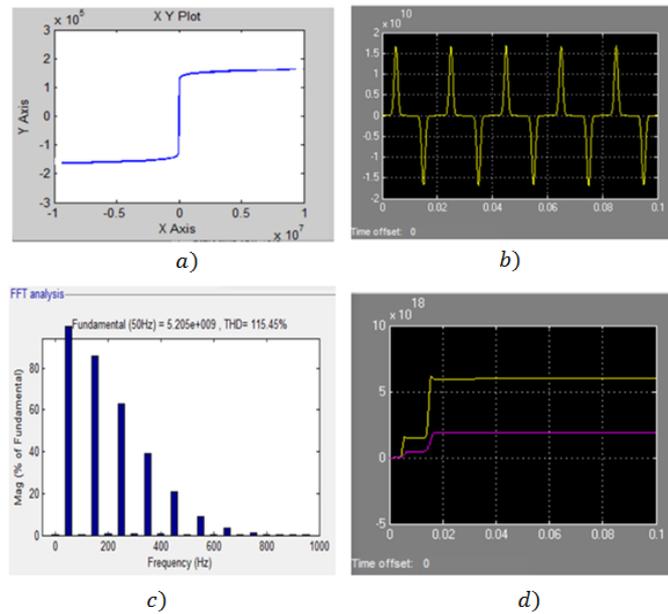


Рисунок 3 - Результаты численного эксперимента

На рисунке 3 представлены результаты численного эксперимента: *a* – ВАХ нелинейного резистора, шунтированного *RLC* – ветвью; *b*, *c* – соответственно, временная зависимость и спектральный состав тока в нагрузке (*R – L*); *d* – временная зависимость потери мощности в нагрузке *R*.

Для сопоставления повторены ВЭ при  $\alpha = 24$  при прочих равных параметрах.

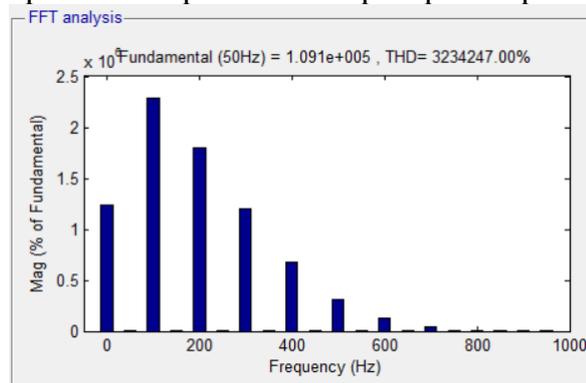


Рисунок 4 - Спектральный состав тока в нагрузке (*R – L*) при  $\alpha = 24$

Сравнение результатов эксперимента показало, что изменение характера нелинейности НР существенно изменило спектральный состав тока в резисторе (рисунок 4) и величины потерь мощности и энергии. Полученные результаты имеют важное практическое значение.

В этом же разделе работы проведено исследование влияния изменения степени нелинейности индуктивности (НИ) на качество и потери электроэнергии в электрической сети. При этом уравнения, связывающие мгновенные значения тока *i*, напряжения *u* и потокосцепления  $\psi$  НИ представлены формулами:

$$u = Ri + \frac{d\psi}{dt}; \quad i = a\psi + b\psi^3, \quad (1)$$

где *a*, *b* – параметры модели, связывающие зависимости между потокосцеплением и током и определяющие степень нелинейности катушки индуктивности. Первое выражение – дифференциальное уравнение, определяющее напряжение на

индуктивности, второе – уравнение, связывающее ток реактора с потокосцеплением. Структура второго уравнения определяется, в зависимости от требования к точности аппроксимации нелинейности индуктивности: оно может быть и другим.

С использованием SPS – модели нелинейной индуктивности (насыщающегося реактора) проведены численные эксперименты.

Сопоставления результатов численного эксперимента показали существенное влияние степени нелинейности насыщающегося реактора на все процессы, происходящие в цепи, содержащей НИ, в том числе и на потери, обусловленные гармониками и интергармониками.

Отметим, что, по мнению многих ведущих специалистов РФ, в системах электроснабжения современных промышленных предприятий присутствует достаточно большая доля нелинейных и резкопеременных нагрузок. При функционировании резкопеременных нагрузок, а также нагрузок, получающих питание от преобразователей частоты, в амплитудном спектре сетевого тока наряду с высшими гармониками присутствует существенный спектр интергармоник, которые являются причинами возникновения дополнительных потерь мощности и электроэнергии в элементах электрических сетей. При этом в научных публикациях отмечается, что полного понимания природы электромагнитных возмущений, ассоциирующихся с интергармониками, еще нет, и в настоящее время к этому явлению не угасает повышенный интерес.

*Разработанный в этой главе ВП в среде LabVIEW (рисунок 5) позволил прояснить одну из возможных причин возникновения дополнительных потерь мощности от интергармонических составляющих в сигнале (ток, напряжение), обусловленным нелинейной нагрузкой. Результаты численного эксперимента на примере с частотными компонентами (50, 92, 167, 270, 273, 276, 279, 282, 285, 288, 291) [Гц] и соответственно амплитудными (220, 40, 40, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20) [В] показали, что такой причиной является появление постоянной составляющей в составе сигнала (ток, напряжение). Как известно, когда несинусоидальность обусловлена только гармониками, кратными 50 Гц, постоянная составляющая отсутствует, разумеется, при отсутствии постоянной составляющей в исходном несинусоидальном сигнале.*

*Численный эксперимент также показал, что сумма основной гармоники и интергармоник ведет себя как случайный процесс 1, тогда как каждая из слагаемых временных функций детерминирована. Интересным является тот факт, что при отсутствии интергармоники частотой 276 Гц в составе выше перечисленных интергармоник процесс преобразуется в устойчивую функцию со случайно изменяющейся амплитудой в сторону возрастания времени и представляющую одну из реализаций случайного процесса.*

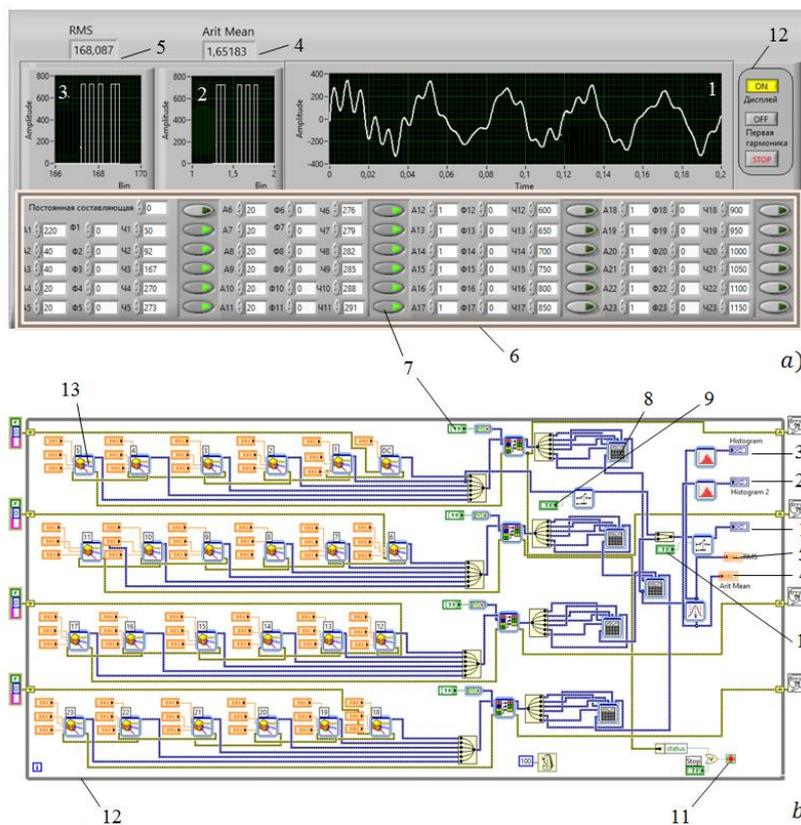


Рисунок 5 - Лицевая панель - *a* и блок-диаграмма *b* ВП

Интерфейсная часть (передняя панель) ВП показана на рисунке 5, *a* функциональная - на рисунке 5, *b*.

На рисунке 5, *a* представлены: 1, 2, 3 графические индикаторы, в виде осциллографа на экране которых изображаются результаты моделирования, соответственно сигнала в виде случайного процесса и его вероятностные характеристики (гистограммы - Arit Mean и RMS); 12 – пульт управления. Пульт управления состоит из кнопок: включения /отключения экрана осциллографа (первая сверху); вывода графика первой гармоники на экран (средняя кнопка); включения /отключения ВП; 6 – область лицевой панели, где расположены средства ввода параметров моделируемых гармоник/интергармоник. К параметрам относятся величины: амплитуда  $A_i$ , фаза  $\Phi_i$  и частота  $\chi_i$ ,  $i$ -ой гармоники/интергармоники.

На рисунке 5, *b* представлен соответственно: 13 – Экспресс-ВП для имитации сигнала, который может воспроизводить синусоидальное, прямоугольное, треугольное, пилообразное колебания или шумовой сигнал; 7 – четыре группы из шести логических элементов в виде кнопок; 8 – пять Экспресс-ВП - Формула для математической обработки входных данных. Входящие и выходящие данные в Экспресс-ВП имеют динамический тип, данные другого типа преобразуются в динамический. Логические элементы 9, 10 на передней панели представлены кнопками управлением экраном осциллографа и вводом / выводом графика первой гармоники на экран; 1, 2, 3 – на блок-диаграмме представляют осциллографы; 11 – кнопка включения / отключения ВК, на передней панели представлена изображением кнопки Stop; 12 – цикл по условию осуществляет итерационное выполнение программы внутри данной структуры до нажатия кнопки Stop.

**Глава 4. Определение потерь электроэнергии во внешней сети предприятия путем моделирования электрической нагрузки и ее контроля.** Рассматриваются

вопросы, связанные с автоматизацией определения коэффициента активных потерь в системе внешнего электроснабжения потребителя.

В вводной части главы отмечено, что графики электрических нагрузок (ГЭН): активной  $P = P(t)$ ; реактивной  $Q = Q(t)$ ; полной мощности  $S = S(t)$ ; тока  $I = I(t)$  широко используются при решении важных задач проектирования: определение рациональных параметров систем электроснабжения (сечений проводов ЛЭП, мощностей трансформаторов и т.д.), расчет потерь электрической энергии. А также задач возникающих при эксплуатации электроустановок, например регулирование напряжения в электрических сетях, управление режимами работы электрических систем. При этом величины ( $P, Q, S, I$ ) в условиях эксплуатации определяются по показаниям соответствующих приборов и представляются усредненными за промежутки времени.

В современных условиях при проектировании новых промышленных предприятий, где планируется выпуск изделий, основанных на новых технологических операциях, для решения необходимых проектных задач широко используется технология компьютерного моделирования, например, при заданных исходных данных о режимах работы ЭП графики электрических нагрузок получают методом имитационного моделирования

В главе обращено внимание на то, что важным составляющим энергосберегающих мероприятий промышленного предприятия является снижение потерь электроэнергии  $\Delta W$  во внешней сети его электроснабжения.

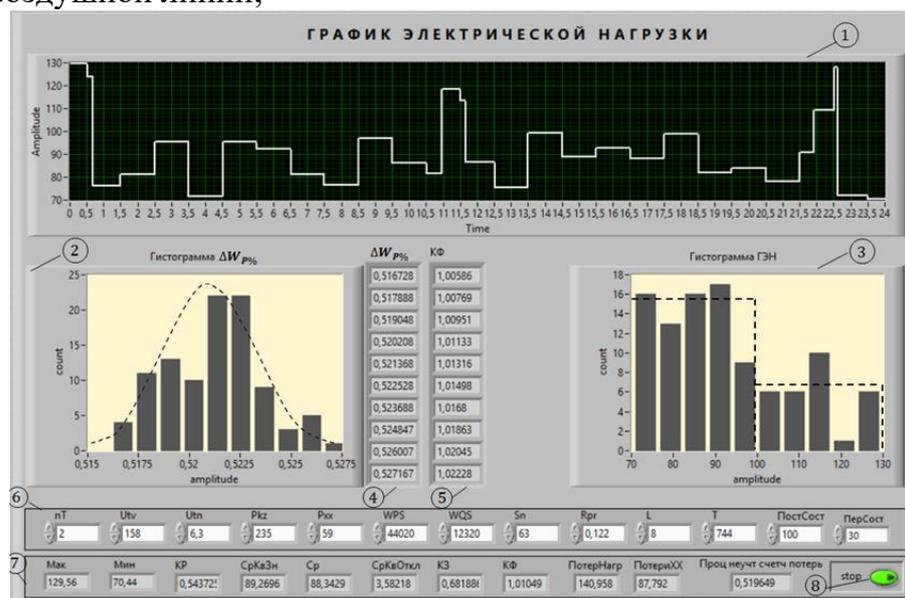
Проанализированы существующая методика и формулы определения потерь электроэнергии во внешней сети предприятия. Ограниченностью рассмотренного метода «ручного» расчета является то, что коэффициенты заполнения  $K_z$  и формы  $K_\phi$  графика полной мощности в общем случае изменяются во времени случайным образом, а так как значение  $\Delta W$  зависит от этих коэффициентов, то при проведении уточняющих расчетов  $\Delta W$  во внешней сети предприятия необходимо учитывать эти влияющие факторы.

В данной главе для снятия отмеченного выше ограничения предложены два подхода: путем моделирования ГЭН, чтобы он был близок к реальному графику; путем контроля тока нагрузки с использованием внешнего модуля сбора данных USB 6009 и разработкой соответствующей ВП.

Результат первого подхода представлен на рис. 6 в виде компьютерной программы (виртуального прибора в среде LabVIEW).

На лицевой панели ВП (рисунок 6, а) показаны элементы интерфейса, пронумерованные цифрами 1, ..., 8. Они предназначены для отображения полученных результатов моделирования (1, 2, 3) – графические индикаторы, (4, 5) – одномерные массивы индикации числовых результатов моделирования, (6) – поля для ввода исходных данных, (7) – поля индикации полученных результатов моделирования, (8) – элемент управления работой ВП. При этом: 1 - смоделированный ГЭН; 2 - гистограмма  $\Delta W$  - показывает частоту появления (высота каждого столбца) смоделированных значений  $\Delta W$  в выбранном диапазоне его изменения. Количество столбцов – число

выбранных диапазонов. Пунктирными линиями показано распределение Гаусса (нормальное распределение); 3- гистограмма ГЭН. Пунктирными линиями отмечена двухступенчатость равномерного распределения частоты следования столбцов гистограммы, так как ГЭН состоит из базовой (неизменной) составляющей и переменной составляющей, подчиненной равномерному закону распределения; 4- одномерный массив индикации зоны рассеяния значений  $\Delta W$ ; 5- одномерный массив индикации зоны рассеяния значений КФ; 6- поля ввода значений для моделирования:  $nT$  – количество трансформаторов;  $U_{tv}, U_{tn}$  – напряжения трансформатора высокой и низкой сторон;  $P_{kz}, P_{xx}$ - потери короткого замыкания и холостого хода;  $WPS, WQS$  - суммарные месячные потребления заводом активной и реактивной электроэнергии;  $S_n$  [МВ · А] – мощность трансформатора;  $R_{pr}$  [Ом/км] - погонный параметр ЛЭП;  $L$  [км] – длина воздушной линии;



а)

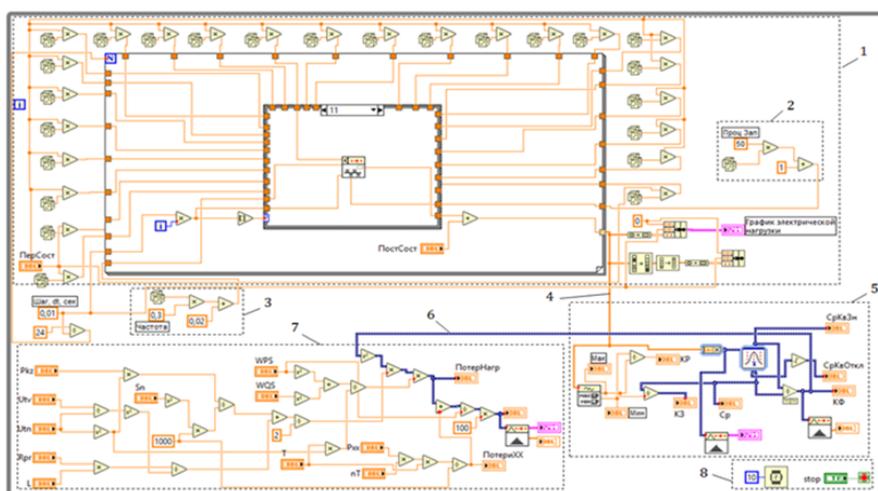


Рисунок б - а - передняя панель; б – блок-диаграмма ВП на графическом языке программирования (G) в среде LabVIEW

$T = 744$  ч. – длительность месяца в часах; ПостСост, ПерСост – соответственно базовая (неизменная) и переменная составляющие нагрузки; 7- поля вывода значений результатов моделирования: Мак, Мин максимальный, минимальный значения тока нагрузки; КР – коэффициент равномерности; СрКвЗн – значение

среднеквадратичного тока;  $S_r$  – значение среднего тока;  $S_{pKVOTkl}$  – среднеквадратичное отклонение тока;  $K_3$  – коэффициент заполнения;  $K_F$  – коэффициент формы;  $P_{отерНагр}$  – нагрузочные потери;  $P_{отериXX}$  – потери электроэнергии холостого хода в трансформаторах;  $P_{роц\ неучт\ счетч\ потерь}$  – процент неучтенных счетчиком потерь активной электроэнергии в трансформаторах ГПП и воздушных ЛЭП. 8- кнопка управления.

Блок-диаграмма ВП (рисунок 6, *b*), как известно, предназначена для создания программы работы ВП, причем все команды, операторы циклов и сравнения изображаются графическими обозначениями. Компоненты, из которых строятся виртуальные приборы, сами также являются виртуальными приборами.

На рисунке 6, *b* выделены пунктирными линиями и пронумерованы объекты блок-диаграммы, имеющие определенные функциональные назначения. Например, 1 – для моделирования ГЭН; 2 – моделирует случайное изменение ширины столбцов ГЭН; 3 – моделирует случайное изменение частоты следования столбцов ГЭН; 4 – проводник данных, по которому передается массив данных в виде смоделированных ГЭН из 1 в 5, где производится статистическая обработка ансамбля ГЭН, вычисляются основные числовые параметры ГЭН и строятся гистограммы 2, 3 (рисунок 6, *b*); 6 – проводник данных для передачи текущего значения  $K_F$  в 7, где определяются нагрузочные потери; потери электроэнергии холостого хода в трансформаторах; процент неучтенных счетчиком потерь активной электроэнергии в трансформаторах ГПП и воздушных ЛЭП; 8 – элементы программы для управления ВП.

Для автоматизации расчета коэффициента активных потерь  $\Delta W$  в системе внешнего электроснабжения потребителя предлагается использовать экспресс-ВП **DAQ Assistant** (рисунок 7), обеспечивающий программный интерфейс между аппаратной частью измерительного модуля USB 6009 подключенного с помощью USB – кабеля к ПК (рис.8), и виртуальным прибором (ВП).



Рисунок 7 - Экспресс-ВП **DAQ Assistant**

Аппаратная часть схемы контроля тока нагрузки может быть реализована с помощью соответствующих датчиков тока (измерительный шунт), рисунок 8. На рисунках 8, 9 пронумерованные элементы имеют следующие назначения. Рисунок 8: 1-DAQ модуль; 2 - клеммные колодки; 3 - этикетки с обозначением сигналов. DAQ модуль подключен к персональному компьютеру (ПК) - 5 с помощью USB – кабеля – 4. Информация о потребленной электроэнергии обрабатывается в ПК с помощью ВП.

На рисунке 9: 1 - экспресс-ВП DAQ Assistant; 2 – производит статистическую обработку сигнала, поступающего из элемента 1; 3 – проводник данных для передачи текущего значения  $K_F$  в 4; 5 – виртуальный подприбор (ВПП), где сигнал, полученный из 1, обрабатывается для получения активной ( $WPS$ ) и реактивной ( $WQS$ ) потребленной энергии в текущий момент измерения; 6 – сигнал, поступающий от трансформатора напряжения; 7 – блок управление ВП.

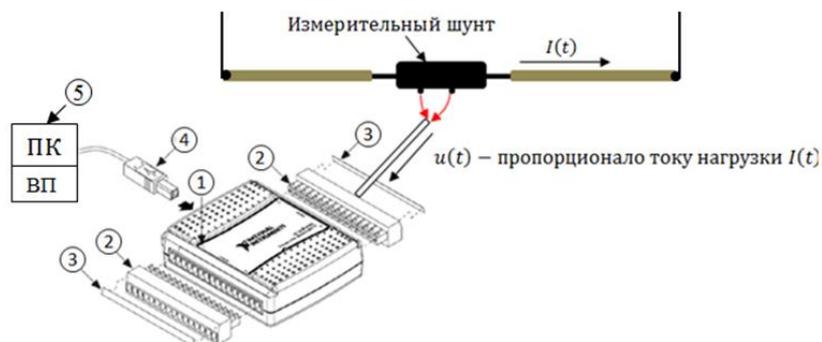


Рисунок 8 - Схема автоматического учета потребленной электроэнергии с помощью измерительного модуля USB 6009, получающий сигнал со стороны трансформатора тока (ТТ)

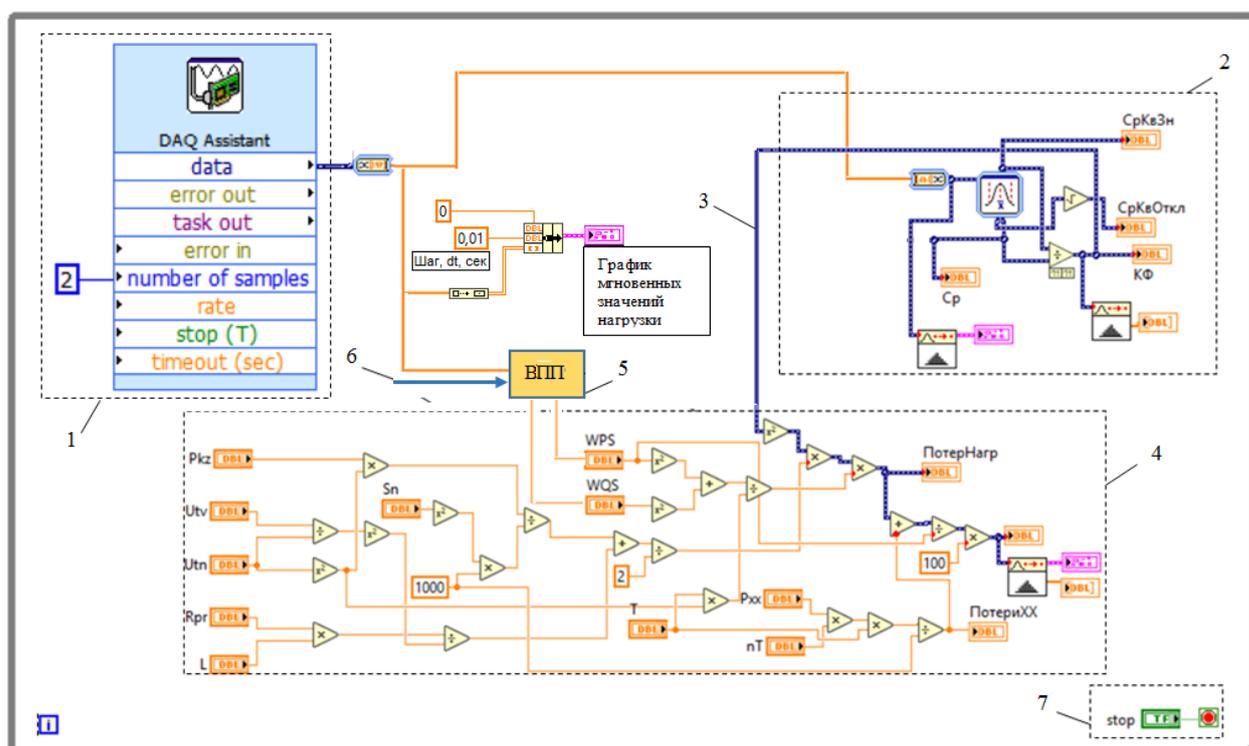


Рисунок 9 - Блок – диаграмма ВП с расширенными функциональными возможностями

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**Основные результаты исследований заключаются в следующем:**

1. Анализ научной литературы показал, что в современных промышленных и бытовых сетях возникают высшие гармоники и интергармоники связанные с нелинейными нагрузками, которые в предыдущих сетях практически отсутствовали или занимали малую долю от общей нагрузки. При этом экономические ущербы от гармонических и интергармонических составляющих нагрузок значительны.
2. Анализ научной литературы также показал, что в них не затрагиваются вопросы разработки способа устанавливающая взаимосвязь между видом вольтамперной

характеристики нелинейных элементов электрической сети, с составом генерируемых ими спектра высших гармоник включая интергармоники.

3. Отмечено, что одним из перспективных методов решения выше отмеченных задач является использование компьютерных методов моделирования с использованием программных сред: LabVIEW, MATLAB (Simulink / SimPowerSystems).

4. На базе программного комплекса Matlab/Simulink/SimPowerSystems разработана структурная схема в среде Simulink и имитационная модель (ИМ) исследуемой промышленной сети в среде SimPowerSystems. ИМ позволяет воспроизвести работу электротехнических устройств во временной области, а также выполнять различные виды их анализа по определению добавочных потерь электроэнергии в исследуемой сети от гармонических и интергармонических составляющих в нагрузочном токе.

5. Разработанные компьютерные модели нелинейных элементов (НЭ) позволило исследовать, влияние вида характеристик НЭ на спектральный состав сгенерированных ими высших гармоник включая и интергармоники.

6. Предложено аналитическое описание несинусоидального тока в составе интергармоник. Результат аналитического описания показал, что, на амплитуду одной интергармоники накладываются синусоидальные колебания усреднённой частотой модулированной амплитудой смещения, что дает значительное увеличение общей амплитуды. Этим результатом можно обосновать одно из возможных причин увеличение потерь в проводнике за счет возникновения дополнительных потерь мощности.

7. На базе графической среды программирования LabVIEW, разработан инструментарий для моделирования мгновенных значений тока нагрузки с высшими гармониками и интергармониками с возможностью статистической их обработки и оценки потерь электроэнергии в токопроводящих элементах промышленной сети. Результаты численного эксперимента и их графическое представление, а также статистическая обработка полученных результатов позволили, установить еще одну из возможных причин возникновения дополнительных потерь мощности от интергармонических составляющих в сигнале (ток, напряжение) обусловленную нелинейной нагрузкой.

8. Результаты численного эксперимента показали, что когда на каноническую гармонику накладываются, ряд интергармоник одной из причин увеличение потерь мощности, за счет добавочных потерь связан с появлением постоянной составляющей в составе сигнала (ток, напряжение). Численный эксперимент проводился на примере сигнала состоящих из следующих частот (50, 92, 167, 270, 273, 276, 279, 282, 285, 288, 291) [Гц] с соответствующими амплитудными значениями (220, 40, 40, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20, 20) [В]. Как известно, когда несинусоидальность обусловлена только гармониками, кратные 50 Гц, постоянная составляющая отсутствует, разумеется, при отсутствии постоянной составляющей в исходном несинусоидальном сигнале.

9. Численный эксперимент также показал, что сумма основной гармоники и

интергармоник ведет себя как случайный процесс, тогда как каждая из слагаемых временных функций детерминированы. Интересным является тот факт, что при отсутствии некоторых интергармоник (276 Гц выше приведенном примере) процесс преобразуется в устойчивую функцию со случайно изменяющейся амплитудой в сторону возрастания времени и представляющей одну из реализаций случайного процесса.

10. Сопоставление результатов эксперимента из научных публикаций с результатом моделирования разработанного ВП показало их удовлетворительное (качественное) совпадение, что подтверждает работоспособность ВП.

11. Разработан ВП для автоматизации расчета реального коэффициента активных потерь во внешней сети промпредприятия, с учетом, что в составе нагрузочного тока возможны интергармоники.

Разработанные в виде ВП инструментальные средства исследования дополнительных потерь мощности в элементах электрической сети имеют потенциальные возможности дальнейшего развития. Направление их развития зависит от тех возможных потребителей электроэнергии, которые могут ухудшать качество электроэнергии. Эти потребители, как правило, являются источниками высших гармоник или интергармоник.

### Список опубликованных трудов по теме диссертации

1. Бузурманкулова, Ч.М. Основные виды тарифов на электроэнергию [Текст] / Бузурманкулова, Ч.М. – Б.: – Изв. КГТУ им. И. Раззакова № 17 .– Бишкек, 2009.- С. 29-31. Электронный ресурс: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26298731>
2. Бузурманкулова, Ч.М. Возможные пути сглаживания графика электрических нагрузок г. Бишкек [Текст] / Бузурманкулова, Ч.М.. – Б.: Современные тенденции развития науки и технологий № 1-2 .– Белгород, 2016.-С. 8-11 Электронный ресурс: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25431035>
3. Бузурманкулова, Ч.М. Применение сред matlab и labview для демонстрации динамического поведения гидроагрегата нового типа [Текст] / А.Б. Бакасова , Г.Н. Ниязова, Т.К. Сатаркулов, Ч.К. Дюшеева . – Б.: Проблемы автоматизации и управления. Ин-тут авт. И инф-ных тех-гий НАН КР, - 2019. – № 1(36). - С. 30-39 . Электронный ресурс: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39323422>
4. Бузурманкулова, Ч.М. Моделирование несинусоидальных режимов воздушных линий для расчета потерь мощности в них [Текст] / А.Р.Айдарова , Э.Б. Исакеева, Ж.К.Абдыбаева. – Б.: Проблемы автоматизации и управления. Ин-тут авт. И инф-ных тех-гий НАН КР, - 2019. – № 2(37). - С. 117-125. Электронный ресурс: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39323425>
5. Бузурманкулова, Ч.М. Оценка влияния качества электроэнергии на потери мощности в элементах электрической сети на основе компьютерного моделирования [Текст] / А.К.Кадиева, Э.Б.Исакеева, Ч.К. Дюшеева, Ж.К. Абдыбаева– Б.: Проблемы автоматизации и управления. Ин-тут авт. И инф-ных тех-гий НАН КР, - 2019. – № 1(36). - С. 58-64. Электронный ресурс: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42835223>
6. Бузурманкулова, Ч.М. Лабораторная установка для измерения потерь мощности в элементах электросети при стохастическом режиме работы электроприемников

- [Текст] / А.Р.Айдарова, А.Б.Калмурзаев, Н.А. Суянтбекова– Б.: Проблемы автоматизации и управления. Ин-тут авт. И инф-ных тех-гий НАН КР, - 2020. – № 2(39). - С. 33-42. Электронный ресурс: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44592344>
7. Бузурманкулова, Ч.М. Численное интегрирование дифференциального уравнения перегрева жил токопроводов относительно температуры окружающего мира в среде labview [Текст] / Ч.М.Бузурманкулова. – Б.: Проблемы автоматизации и управления. Ин-тут авт. И инф-ных тех-гий НАН КР, - 2021. – № 2(41). - С. 11-17. Электронный ресурс: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46337821>
  8. Бузурманкулова, Ч.М. Методы контроля состояния изоляции высоковольтного кабеля [Текст] / З.А. Узагалиев, Т. Кабаев. – Б.: Научные исследования в Кыргызской республике № 2-2. – Бишкек, 2021.-С. 5-13. Электронный ресурс: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49930405>
  9. Бузурманкулова, Ч.М. Анализ возможности идентификации места обрыва воздушной линии электропередачи, выполненной на основе провода нового типа [Текст] / Г.Ш. Эралиева, Г.Н. Ниязова, Ж.А. Сулайманова – Б.: Проблемы автоматизации и управления. Ин-тут авт. И инф-ных тех-гий НАН КР, - 2022. – № 2(44). - С. 77-84Электронный ресурс: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49227581>
  10. Бузурманкулова, Ч.М. Устройство для контроля состояния силового трансформатора [Текст] / Т.Кабаев, Г.Ш. Эралиева, Ж.К. Абдыбаева– Б.: Проблемы автоматизации и управления. Ин-тут авт. И инф-ных тех-гий НАН КР, - 2022. – № 3(45). - С. 52-58.Электронный ресурс: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50020282>
  11. Бузурманкулова, Ч.М. Компьютерный метод оценки динамического теплового режима проводника распределительных сетей [Текст] / А.Б. Калмурзаев, Ж.К. Абдыбаева, Ж.А. Сулайманова - Б.: Проблемы автоматизации и управления. Ин-тут авт. И инф-ных тех-гий НАН КР, - 2024. – № 1(49). - С. 122-129. Электронный ресурс: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=67210025>

## Бузурманкулова Чолпон Мейманалыевнанын

**05.14.02 – электрчордондор жана электрэнергетикалык тутумдар адистиги боюнча техника илимдеринин талапкери окумуштуулук даражасына изденүүгө арналган “Электр энергиянын сапатынын өндүрүш тармактарынын элементтериндеги жоготууларына тийгизген таасирин компьютердик моделдөөнүн жардамы менен изилдөө” диссертациясынын**

### РЕЗЮМЕСИ

**Негизги сөздөр:** электр энергиянын сапаты; кубаттуулуктун жана электр энергиянын жоготуулары; өнөр-жай тармагынын элементтери; математикалык жана компьютердик моделдер; сызыктуу эмес элементтер; интергармоникалар; ИИАТ элементтери; ток датчиги; LabView; Simulink; SimPowerSystems.

**Изилдөөнүн объектиси болуп** өнөр-жай тармактарынын өткөргүч элементтери (зымдар, кабельдер, туташтыргычтар) болуп саналат.

**Изилдөөнүн предмети болуп** керектөөчүлөрдү кокустан которуштурууда алардын ишинин динамикалык режиминде изилдөө объектилеринин процесстеринин (жылуулук, электр) моделдери эсептелет.

**Иштин максаты** болуп, динамикалык режимде иштеген өнөр-жай тармактарынын элементтериндеги объектилерди жана процесстерди, компьютердик моделдөө методологиясын иштеп чыгуу, алардагы кошумча жүк жоготууларына баа берүү.

**Изилдөөнүн ыкмалары жана каражаттары.** *Иште колдонулду:* электр чынжырларынын теориясынын ыкмалары SimPowerSystems китепканасынын жана Matlab системасыда, Simulink кеңейтүүлөрүнүн пакети жана LabVIEW чөйрөсүндө компьютердик моделдөөнүн негизделген сандык тажрыйба ыкмалары; алынган маалыматтарды кайра иштетүү менен тажрыйбалык изилдөөлөрдүн методологиясы.

#### **Алынган натыйжалардын илимий жаңычылдыгы:**

1. LabVIEWдин негизинде көп функционалдуу виртуалдык аспап иштелип чыккан, ал өнөр-жай тармактарынын өткөрүүчү элементтериндеги кубаттуулуктун жана электр энергиянын жоголуусундагы ар кандай факторлордун таасирин изилдөөгө арналган жана изилденүүчү тармактын элементтеринин электр жүктөмдөрүн эсептөө мүмкүнчүлүгүнө ээ. 2. Электротехникалык жабдуулардын убакыт жаатындагы ишин кайра чыгарууга, ошондой эле аларды анализдөөнүн ар кандай түрлөрүн аткарууга мүмкүндүк берүүчү Simulink чөйрөсүндө структуралык түзүлүш жана SimPowerSystems, чөйрөсүндөгү изилденүүчү тармактын имитациялык модели иштелип чыккан. Мындан тышкары, структуралык моделдөө жана SimPowerSystems ыкмаларын айкалыштыруу менен, татаал электр системаларын моделдөөгө мүмкүндүк берет.

**Диссертациянын практикалык мааниси.** ИИАТ элементтери менен иштелип чыккан тажрыйбалык торнотмо, электр тармагынын элементинин физикалык моделиндеги электр энергиянын жоготууларын өлчөө ыкмасы, виртуалдык шайман, ошондой эле чубалгынын математикалык модели, мурда эске алуу кыйын болгон кошумча факторлордун өнөр-жай тармактарынын өткөрүүчү элементтеринин физикалык моделдеринде кубаттуулуктун жана энергиянын жоготууга тийгизген таасирин ишенимдүү изилдөөгө мүмкүндүк берет, бул кубаттуу сызыктуу эмес жана симметриялуу эмес жүктөрдү камтыган электр тутумдарынын жоготууларын баалоодо колдонулуусу кажет.

**Иштин жыйынтыгынын ишке ашуусу.** Диссертациялык иштин жыйынтыктары И.Раззаков атындагы КМТУнун "Электроэнергетика" кафедрасында изилдөө иштерин жүргүзүү үчүн, өнөр-жай тармактарынын өткөрүүчү элементтериндеги техникалык жоготууларынын чондугун, эсепке алуу кыйын болгон ар кандай факторлордун таасирин талдоодо колдонулат.

**Колдонуу чөйрөсү:** Маалыматтык технологиялардын жетишкендиктерин колдонуу менен өнөр-жай тармактарын долбоорлоо.

## РЕЗЮМЕ

диссертации Бузурманкуловой Чолпон Мейманалыевны на тему: «Исследование влияния качества электрической энергии на потери в элементах промышленных сетей с использованием компьютерного моделирования», на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – электростанции и электроэнергетические системы

**Ключевые слова:** качество электроэнергии; потери мощности и энергии; элементы промышленной сети; математическая и компьютерная модели; нелинейный элемент; интергармоники; LabView; Simulink; SimPowerSystems.

**Объектом исследования** являются токопроводящие элементы (провода, кабели, шинопроводы) промышленных сетей, содержащих ЭП с нелинейной ВАХ.

**Предметом исследования** является влияние токов высших гармоник и интергармоник на потери электроэнергии в объекте исследования.

**Цель исследования.** Разработка инструментария для моделирования и исследования, тока нелинейной нагрузки с гармоническими и интергармоническими составляющими, с целью оценки добавочных потерь электроэнергии в токопроводящих элементах промышленной сети.

**Методы и средства исследований.** В работе использованы: методы теории электрических цепей; методы численного эксперимента на основе компьютерного моделирования в среде LabVIEW и системы Matlab с пакетом расширений Simulink и библиотекой SimPowerSystems.

**Научная новизна полученных результатов состоит в том, что:** На базе программного комплекса Matlab/Simulink/SimPowerSystems и LabVIEW разработана структурная схема в среде Simulink и имитационная модель (ИМ) исследуемой промышленной сети в среде SimPowerSystems. ИМ позволяет воспроизвести работу электротехнических устройств во временной области, а также выполнять различные виды их анализа по определению добавочных потерь электроэнергии в исследуемой сети от гармонических и интергармонических составляющих в нагрузочном токе. Разработанные компьютерные модели нелинейных элементов (НЭ) позволило исследовать, влияние вида характеристик НЭ на спектральный состав сгенерированных ими высших гармоник включая и интергармоники. Предложено аналитическое описание несинусоидального тока в составе интергармоник. Результат аналитического описания показал, что, на амплитуду одной интергармоники накладываются синусоидальные колебания усреднённой частотой модулированной амплитудой смещения, что дает значительное увеличение общей амплитуды. Этим результатом можно обосновать одно из возможных причин увеличение потерь в проводнике за счет возникновения дополнительных потерь мощности. На базе графической среды программирования LabVIEW, ориентированной на решение задач из области АСНИ, разработан инструментарий в виде ВП для моделирования мгновенных значений тока нагрузки с высшими гармониками и интергармониками с возможностью статистической их обработки и оценки потерь электроэнергии в токопроводящих элементах промышленной сети. Результаты численного эксперимента и их графическое представление, а также статистическая обработка полученных результатов позволили, установить еще одну из возможных причин возникновения дополнительных потерь мощности от интергармонических составляющих в сигнале (ток, напряжение) обусловленную нелинейной нагрузкой.

**Область применения:** Проектирование промышленных сетей с использованием достижений информационных технологий.

## ABSTRACT

**of Buzurmankulova Cholpon Meimanalyevna dissertation on the topic: "Research of the influence of electric energy quality on losses in elements of industrial networks using computer modeling", for the degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 05.14.02 – Power plants and electric power systems**

**Keywords:** power quality; power and energy losses; industrial network elements; mathematical and computer models; nonlinear element; interharmonics; LabVIEW; Simulink; SimPowerSystems.

**The object of the study** is the conductive elements (wires, cables, busbars) of industrial networks containing EP with nonlinear VAC.

**The subject of the study** is the influence of currents of higher harmonics and interharmonics on the loss of electricity in the object of study.

**The purpose of the study.** Development of tools for modeling and studying the current of a nonlinear load with harmonic and interharmonic components, in order to assess additional losses of electricity in conductive elements of an industrial network.

To achieve the research goal in the dissertation work, it is necessary to solve the following tasks: 1. Analysis of the causes of deterioration in the quality of electricity in various modes of operation of the EP; 2. Analysis of modeling methods, software tools that can be used to achieve the set goal; 3. Development of computer models of the industrial network under study in the Simulink/SimPowerSystems environment, designed to study the influence of various factors on additional losses of power and electricity in conductive elements of industrial networks; 4. Computer implementation in the LabVIEW environment of an algorithm for modeling a group graph of electrical loads with specified probabilistic laws of operation of electric receivers;

**Methods and means of research.** The work uses: methods of the theory of electrical circuits; methods of numerical experiment based on computer modeling in the LabVIEW environment and the Matlab system with the Simulink extension package and the SimPowerSystems library.

**The scientific novelty of the results** obtained is that on the basis of the Matlab/Simulink/SimPowerSystems and LabVIEW software package, the following have been developed: 1. A block diagram in the Simulink environment and a simulation model of the industrial network under study in the SimPowerSystems environment, allowing to reproduce the operation of electrical devices in the time domain, as well as perform various types of their analysis to determine additional power losses in the network under study; 2. A multifunctional virtual device based on LabVIEW, designed to study the influence of various factors on power and electricity losses in conductive elements of industrial networks and having the ability to calculate the electrical load of the network element under study. 3. Tools in the form of VP for modeling instantaneous load current values with higher harmonics and interharmonics with the possibility of statistical processing and evaluation of power losses in conductive elements of an industrial network; 4. A virtual device for automating the calculation of the coefficient of active losses in the external network of an industrial enterprise.

**The practical significance of the dissertation.** The developed virtual devices make it possible to substantiate and investigate the influence of additional previously difficult to account for factors on power and energy losses in conductive elements of industrial networks, which should be used in assessing losses during operation of industrial networks containing nonlinear loads. Implementation of the results of the work.

**The results of the dissertation work** are recommended for the analysis of possible additional losses in the service of operation of industrial networks, and are also used for research at the Department of "Electric Power Engineering" of I. Razzakov KSTU, when analyzing the degree of influence of various factors that are difficult to take into account on the magnitude of technical losses in conductive elements of industrial networks. The developed methods of GEN modeling are used in diploma and course design at the above-mentioned department.

**Scope of application:** Design of industrial networks using the achievements of information technology.

Подписано к печати 29.04.2024г. Формат бумаги 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага офс. Печать цифр. Объем 2,25 п.л. Тираж 100 экз.  
Отпечатано в ОсОО ИД «Калем», г.Бишкек, ул. Курчатова, 69  
т. 0706-757610 ☎, 49-19-36, E-mail: kalem14@mail.ru  
[www.kalem.press](http://www.kalem.press)