

*На правах рукописи*



ДЖАПАРОВА ДИНАРА АМАНГЕЛЬДИЕВНА

**НЕЙРОСЕТЕВОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ  
В ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ  
ПОТРЕБИТЕЛЕЙ**

Специальность 05.20.02 – Электротехнологии и электрооборудование  
в сельском хозяйстве

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Мичуринск-наукоград РФ, 2020

Работа выполнена на кафедре «Электроэнергетика» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ТГТУ»)

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
**Калинин Вячеслав Федорович**

**Официальные оппоненты:** **Зацепина Виолетта Иосифовна**, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», кафедра «Электрооборудование», доцент;  
**Виноградов Александр Владимирович**, кандидат технических наук, доцент, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», лаборатория электро- и энергосбережения и электробезопасности, ведущий научный сотрудник.

**Ведущая организация:** федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина»

Защита состоится 24 апреля 2020 года в 10-00 часов на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.179.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет», ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», по адресу: 393760, Тамбовская область, г. Мичуринск, ул. Интернациональная, д. 101, корпус 1, зал заседаний диссертационных советов, тел./факс (47545) 9-44-12, e-mail: dissov@mgau.ru.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ и на сайте [www.mgau.ru](http://www.mgau.ru), с авторефератом – на сайте Высшей аттестационной комиссии Министерства науки и высшего образования Российской Федерации [www.vak.ed.gov.ru](http://www.vak.ed.gov.ru).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, с указанием индекса, почтового адреса, телефона, электронной почты и сайта организации, фамилии, имени, отчества лица, подготовившего отзыв, просим направлять ученому секретарю диссертационного совета.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук, доцент



Н.В. Михеев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Обеспечение энергией, создание эффективных систем транспортировки, преобразования и распределения электрической энергии, является необходимым условием развития всех технологических отраслей, в том числе и сельскохозяйственного производства.

С целью повышения эффективности электроснабжения сельскохозяйственных потребителей Правительством РФ разрабатываются меры, среди которых основными являются: модернизация существующих электрических сетей и переход на активно-адаптивные сети (SmartGrid).

Переход на современные сети с использованием технологий SmartGrid позволит повысить качество электрической энергии (КЭ), которой снабжаются современные сельскохозяйственные предприятия, снизить аварии и простои оборудования, повысить энергетическую эффективность в системах транспортировки, преобразования и распределения электроэнергии.

Ключевым элементом технологии «SmartGrid» – является комплексная автоматизация распределительных сетей, то есть оснащение их современным комплексом распределительно-коммутационной аппаратуры, устройствами релейной защиты, телемеханики и автоматизированными системами контроля и учета потребления электрической энергии (АСКУЭ), технологиями оперативного определения мест повреждения, резервирования и т.д. Все это должно отвечать требованиям оптимизации затрат на обслуживание и эксплуатацию с высокой степенью самодиагностики – отвечать требованиям активно-адаптивных электрических сетей. При этом технология «SmartGrid» в сельских распределительных сетях с учетом их особенностей: архитектуры, нагрузки и их режимами, будет обладать своими отличительными свойствами.

Серьезной проблемой в сельских электрических сетях является превышение нормативных значений отклонений напряжений у сельскохозяйственных потребителей. Это связано с износом распределительных электрических сетей 10/0,4 кВ и отсутствием современных технологий мониторинга и управления качеством электрической энергии.

Существующие технологии управления качеством электрической энергии и регулирования напряжения преимущественно работают с устройствами регулирования под нагрузкой. В тоже время, в сельских электрических сетях распространены устройства переключения без возбуждения (ПБВ), которые до сих пор активно внедряются, преимуществом которых является низкая стоимость и надежность в эксплуатации. Поэтому разработка современных технологий регулирования напряжения, позволяющих эффективно работать с устройствами ПБВ является актуальной задачей.

**Степень разработанности темы.** Исследованиям повышения эффективности электроснабжения сельского хозяйства и управления качеством электрической энергии посвящены работы ученых: М.А. Будзко, Д.С. Стребкова, Ю.С. Железко, И.В. Жеженко, Н.В. Савиной, А.С. Гордеева, С.В. Кириллова, А.В. Чувилкина, М.В. Бородина, В.И. Зацепиной, А.В. Виноградова, Chang G.W., De Capua C., Radakovic Z. А.С. Гордеев, С.В.Кириллов, А.В. Чувилкин впервые показали возможность применения нейронных сетей для прогнозирования нагрузок и качества энергии в сельских электрических сетях. Работы указанных авторов внесли большой вклад в теорию надежности электроснабжения сельскохозяйственных потребителей, технологий и методологий повышения качества электрической энергии.

Значительное количество исследований по данной тематике, тем не менее, оставляют открытыми вопросы разработки интеллектуальных технологий, в том чис-

ле с использованием искусственных нейронных сетей, для управления качеством электрической энергии сельскохозяйственных потребителей.

**Цель исследований** – повышение эффективности управления качеством электрической энергии сельскохозяйственных потребителей.

**Задачи исследований:**

- провести оценку известных способов и средств управления качеством электрической энергии и регулирования напряжения в электроснабжении сельскохозяйственных потребителей;
- разработать имитационную модель сельской электрической сети 10/0,4 кВ и выполнить теоретические исследования режимов ее работы;
- разработать конфигурацию нейронной сети для прогнозирования отклонения напряжения в электроснабжении сельскохозяйственных потребителей;
- разработать структуру системы нейросетевого регулирования напряжения для электроснабжения сельскохозяйственных потребителей;
- разработать математическую модель прогнозирования коэффициента искажения синусоидальности от изменения потребляемой активной мощности источников света;
- провести экспериментальные исследования нейросетевого регулирования напряжения в системах электроснабжения сельскохозяйственных потребителей;
- провести технико-экономическое обоснование системы нейросетевого регулирования напряжения в электроснабжении сельских потребителей.

**Объект исследований** - сельские электрические сети, качество электрической энергии, электрооборудование сельскохозяйственных потребителей.

**Предмет исследований** – оборудование и технологии регулирования напряжения в электроснабжении сельскохозяйственных потребителей.

**Научная новизна** результатов исследований представляют:

- разработана конфигурация нейронной сети для прогнозирования параметров электрической энергии, отличающаяся тем, что позволяет прогнозировать отклонение напряжения при резком изменении электрической нагрузки сельскохозяйственных потребителей;
- разработана структура нейросетевого регулирования напряжения в системах электроснабжения сельскохозяйственных потребителей, отличительной особенностью которой является совместное последовательное применение нейросетевых моделей и алгоритмов для ее реализации; на первом этапе формирования – применяется многослойный перцептрон, который осуществляет прогнозирование отклонения напряжения; на втором этапе применяется имитационная модель сельской электрической сети 10/0,4 кВ, которая позволяет вычислить параметры качества электрической энергии в узлах электрической нагрузки и удаленного сельскохозяйственного потребителя;
- разработана математическая модель прогнозирования коэффициента искажения синусоидальности, отличающаяся тем, что учитывает характер изменения коэффициента искажения синусоидальности от потребляемой активной мощности источников света.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Теоретические и экспериментальные исследования позволили наметить пути совершенствования систем управления качеством электрической энергии в электроснабжении сельскохозяйственных потребителей. Результаты теоретических и экспериментальных исследований были использованы в сельскохозяйственном предприятии Колхоз – племенной завод им. Ленина Тамбовского района Тамбовской области для разработки мероприятий по повышению качества электрической энергии и надежности электроснабжения.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований имеют большую практическую значимость для проектных и электросетевых подразделений компании ПАО «Россети», ОАО «Тамбовская сетевая компания», сельскохозяйственных предприятий и учебных заведений в образовательном процессе специальностей по основным образовательным программам бакалавриата: 35.03.06 – «Агроинженерия», профиль – «Электрооборудование и электротехнологии»; магистратуры: 35.04.06 – «Агроинженерия», профиль – «Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве».

**Методы исследования.** Для достижения поставленной цели и выполнения задач теоретические исследования проводились с использованием известных положений теории электрических цепей, элементов теории надёжности, методов математического и компьютерного моделирования, нейросетевого моделирования. Математическое моделирование проводилось в среде программных пакетов MATLAB Simulink. Обработка результатов исследований осуществлялось с использованием программного обеспечения MathCAD, Excel.

**Основные положения и результаты исследований, выносимые на защиту:**

- конфигурация нейронной сети для прогнозирования параметров электрической энергии;
- структура нейросетевого регулирования напряжения в системах электропитания сельскохозяйственных потребителей;
- математическая модель, позволяющая прогнозировать увеличение коэффициента искажения синусоидальности от потребляемой активной мощности источников света.

**Личный вклад автора.** На основе проведенного анализа способов и средств управления КЭ в электроснабжении сельскохозяйственных потребителей автором разработаны модель сельской электрической сети 10/0,4 кВ, математическое обеспечение оптимального управления сбора информации с приборов АСКУЭ, модель НС, позволяющая осуществлять прогнозирование параметров качества электрической энергии сети с учетом скачкообразного изменения потребления электроэнергии, а также математическая модель, позволяющая прогнозировать увеличения коэффициента искажения синусоидальности от потребляемой активной мощности газоразрядных ламп. Проведены экспериментальные исследования качества электрической энергии в системах электропитания сельскохозяйственных потребителей, результаты исследований опубликованы автором и прошли апробацию на конференциях разного уровня.

**Реализация результатов исследований.** Результаты исследований используются в учебном процессе по подготовке бакалавров и магистров направления «Электроэнергетика и электротехника» и аспирантов направления «Электро- и теплотехника». Результаты исследований приняты к внедрению на сельскохозяйственном предприятии Колхоз – племенной завод им. Ленина и ПАО «МРСК Центра» – «Тамбовэнерго».

**Степень достоверности результатов работы.** Достоверность полученных результатов обусловлена соответствием используемых общепринятых и частных методик поставленным задачам с учётом особенностей изучаемых объектов, испытанием в лабораторных и полевых условиях, воспроизводимостью результатов и применением методов статистического и регрессионного анализа данных.

**Апробация работы.** Основные положения научной работы доложены, обсуждены и одобрены на международных научных и научно-практических конференциях: Энергосбережение и эффективность в технических системах III Международной научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. Тамбовский государственный технический университет (25-27 апреля 2016 г., г. Тамбов);

Вторая всероссийская студенческая научная конференция ЭНЕРГЕТИКА. ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ. Посвященная Дню энергетика. (21-22 декабря 2016 г., г. Тамбов); IV Международной научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. Тамбовский государственный технический университет (10-12 июля 2017 г., г. Тамбов); II Всероссийский форум по экономической безопасности «Стратегии противодействия угрозам экономической безопасности России» (05-06 июня 2019 г., Тамбов); I Всероссийская конференция с международным участием. Импортзамещающие технологии и оборудование для глубокой комплексной переработки сельскохозяйственного сырья. (24-25 мая 2019, г Тамбов); I Международная научно-практическая конференция, посвященная проблемам управления, математического моделирования, автоматизации и энергосбережения SUMMA2019. (20-21 ноября 2019, г. Липецк).

**Публикации результатов работы.** По теме диссертационной работы опубликовано 14 статей, в том числе 4 статьи в журналах рекомендованных ВАК и 2 статьи в журнале, индексируемом в системе Scopus. Общий объем публикаций 3,89 печ. л., из которых 2,7 печ. л. принадлежит лично соискателю.

**Соответствие паспорту специальности.** Диссертационные исследования соответствуют паспорту специальности 05.20.02 – Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве, в частности п.10 «Обоснование, исследование и разработка средств и методов повышения надежности и экономичности работы электрооборудования в сельскохозяйственном производстве», п.11 «Исследование и обоснование параметров технического состояния элементов электрооборудования в сельском хозяйстве, средств их диагностики и методов прогнозирования долговечности, безотказности и ремонтпригодности этих объектов» и п.13 «Разработка методологических основ создания надежного и экономичного энерго- и электроснабжения сельскохозяйственных потребителей, разработка новых технических средств»..

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа содержит введение, пять глав, основные выводы и результаты исследований, библиографический список и приложение. Общий объем диссертационной работы 161 страница, в том числе 51 рисунок, 12 таблиц, список использованной литературы из 142 наименований и приложение из 22 страницы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность исследования, ставятся цели и задачи исследования, раскрывается его научная новизна и практическая ценность, излагаются основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** «Состояние вопроса управления качеством электрической энергии в электроснабжении сельскохозяйственных потребителей» рассмотрены вопросы особенностей электроснабжения сельскохозяйственных потребителей, обзор технологий управления качеством электрической энергии и регулирования напряжения.

В настоящее время осуществляется переход к активно-адаптивным электрическим сетям, особенностью которых является непрерывный мониторинг параметров электрической энергии, в том числе, качества электрической энергии, как одного из основных индикаторов стабильности и надежности функционирования систем электроснабжения. Установлено, что технологии Smart Grid позволяют не только проводить регистрацию параметров качества электрической энергии и их статистическую обработку, но и осуществлять управление режимами работы электрических сетей. Однако, технологии

SmartGrid в сельских электрических сетях с учетом их особенностей: архитектуры, нагрузки, режимов работы, будут обладать своими отличительными свойствами.

Анализ авторов работ, посвященных исследованиям качества электрической энергии в сельском хозяйстве: А. В. Виноградова, М. В. Бородина, А.С. Гордеева, И. В. Голикова, Е. В. Крюкова показывает, что отклонение напряжения в сельских электрических сетях является наиболее острой проблемой. Физический износ электрических сетей и трансформаторов составляет порядка 60-80%. Поэтому наиболее часто медленные отклонения напряжения находятся за границей 5% и превышают норму в 1,3 раза.

Для поддержания нормативного уровня напряжения используют различные системы регулирования. В сельских электрических сетях наибольшее применение получили технологии переключения числа витков без возбуждения (ПБВ) и регулирование под нагрузкой (РПН). Для управления устройствами РПН используют технологии активно-адаптивного управления, нечетких множеств и нейронных сетей.

Необходимо отметить, что значительная часть трансформаторов в сельских электрических сетях 10/0,4 кВ работают с ПБВ. Это связано с более низкой стоимостью подобных трансформаторов в сравнении с трансформаторами с РПН. В тоже время, в сельских электрических сетях набирают популярность сухие трансформаторы с ПБВ. Однако исследования, посвященные систем управления качеством электрической энергии с использованием ПБВ практически отсутствуют.

Для эффективной работы систем управления качеством электрической энергии с ПБВ необходима интеллектуальная система, обладающая свойствами самообучения и прогнозирования параметров качества электрической энергии, обеспечивающая поддержание нормируемого уровня напряжения у самого удаленного потребителя.

Работы авторов, посвященные прогнозированию параметров электрической энергии: В. И. Зацепиной, А. С. Гордеева, А. В. Чувилкина, В.А. Дулесова, Г.П. Шумилова показали, что наилучшими результатами прогнозирования обладают нейронные сети. Особенностью этих сетей является возможность точного прогнозирования при не полных и искаженных данных, они устойчивы к помехам, обладают высоким быстродействием.

Однако, исследования по использованию нейронных сетей для задач прогнозирования параметров качества электрической энергии с целью регулирования напряжения в электроснабжении сельскохозяйственных потребителей не проводились.

**Во второй главе** «Теоретические исследования моделирования и прогнозирования показателей качества электрической энергии» проведены исследования имитационной модели сельской электрической сети и обоснование конфигурации нейронной сети для прогнозирования отклонения напряжения в сельских электрических сетях.

В настоящее время для моделирования распределительных электрических сетей с нагрузкой различного характера все активнее применяют компьютерные технологии и математическое программное обеспечение, а также технологии «Цифровых двойников». Особенностью является то, что цифровые двойники могут быть встроены в систему управления качеством электрической энергии.

Для разработки цифрового двойника в виде имитационной модели сельской электрической сети использована компьютерная программа MATLAB с пакетом программных вычислений в области электроэнергетики SimPowerSystems. Программа позволяет осуществлять моделирование распределительных электрических сетей с нагрузкой различного характера.

Несимметрия фазных токов и напряжений является характерной для сельских распределительных электрических сетей вследствие преобладания однофазной

нагрузки, что оказывает влияние на отклонение напряжения у сельскохозяйственных потребителей.

Выражения для фазных токов будут иметь следующий вид:

$$\underline{I}_A = \underline{U}_A \underline{Y}_{HA}, \quad \underline{I}_B = \underline{U}_B \underline{Y}_{HB}, \quad \underline{I}_C = \underline{U}_C \underline{Y}_{HC} \quad (1)$$

где  $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$  – фазные напряжения;

$\underline{Y}_{HA}, \underline{Y}_{HB}, \underline{Y}_{HC}$  – проводимости фазных проводов.

Тогда коэффициент потерь мощности  $K_p$  можно представить как отношение:

$$K_p = \frac{\Delta P_n}{\Delta P_1} = 1 + K_{2i}^2 + K_{0i}^2 \frac{R_0}{R_1} \quad (2)$$

где  $K_{2i} = \frac{I_2}{I_1}$  – коэффициент обратной последовательности токов;

$K_{0i} = \frac{I_0}{I_1}$  – коэффициент нулевой последовательности токов;

$P_n$  – потери мощности при несимметричной нагрузке.

$P_1$  – потери мощности, обусловленные токами прямой последовательности

$I_0, I_1, I_2$  – токи нулевой, прямой и обратной последовательности на том же участке сети.

$R_1, R_0$  – активные сопротивления прямой и нулевой последовательности для участка сети;

Для определения значений фазных потерь напряжения составим систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \delta_A &= \frac{\Delta U_A}{\Delta U_1} = 1 + K_{2i} + K_{0i} K_Z; \\ \delta_B &= \frac{\Delta U_B}{\Delta U_1} = \underline{a}^2 + \underline{a} K_{2i} + K_{0i} K_Z; \\ \delta_C &= \frac{\Delta U_C}{\Delta U_1} = \underline{a} + \underline{a}^2 K_{2i} + K_{0i} K_Z, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $\Delta U_A, \Delta U_B, \Delta U_C$  – комплексы фазных потерь напряжения на участке сети;

$\Delta U_1$  – комплекс фазной потери напряжения прямой последовательности на участке сети;

$K_{2i}, K_{0i}$  – комплексные коэффициенты обратной и нулевой последовательности токов:

$$K_{2i} = \frac{I_2}{I_1}, K_{0i} = \frac{I_0}{I_1};$$

$I_1, I_2, I_0$  – комплексы токов прямой, обратной и нулевой последовательностей;

$\underline{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}}$  – комплексный множитель поворота вектора на  $120^\circ$ .

Имитационная модель в MATLAB SimPowerSystems на примере сельской электрической сети 10/0,4 кВ села Покрово-Пригородное Тамбовской области представлена на рисунке 1. При этом каждый участок сети имеет отдельный модуль со своими характеристиками схемы замещения линии электропередач и нагрузки сельскохозяйственных потребителей (рисунок 2).

Имитационные модели сельских электрических сетей позволяют проводить теоретические исследования близкие к практическому эксперименту:

- 1) осуществлять планирование экспериментов;
- 2) реализовать имитационное моделирование;
- 3) анализировать и делать выводы о результатах моделирования.

Можно охарактеризовать особенности подобных теоретических исследований:

1) Использование виртуальных приборов, позволяющих получать данные о текущих параметрах элементов схемы;

2) Представление данных исследований в виде осциллограмм и временных характеристик, что повышает удобство проведения исследований и анализ полученных результатов;



- 3) Высокая детализация параметров электрической схемы, получение параметров, которые в реальных условиях получить затруднительно;
- 4) Исследование быстрых изменений нагрузки и других динамических характеристик, например реакцию двигателя и пр., что в реальных условиях выполнить сложно;
- 5) Проведение исследований при воздействии факторов помех.

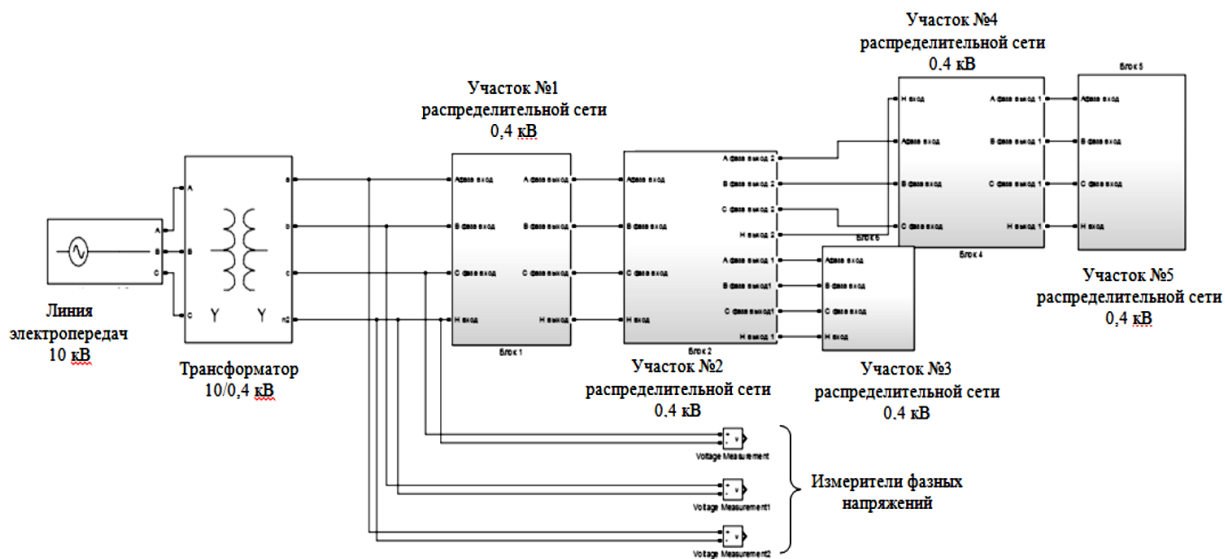


Рисунок 1. Имитационная модель участка сельской электрической сети 10/0,4 кВ (село Покрово-Пригородное, Тамбовская обл.)

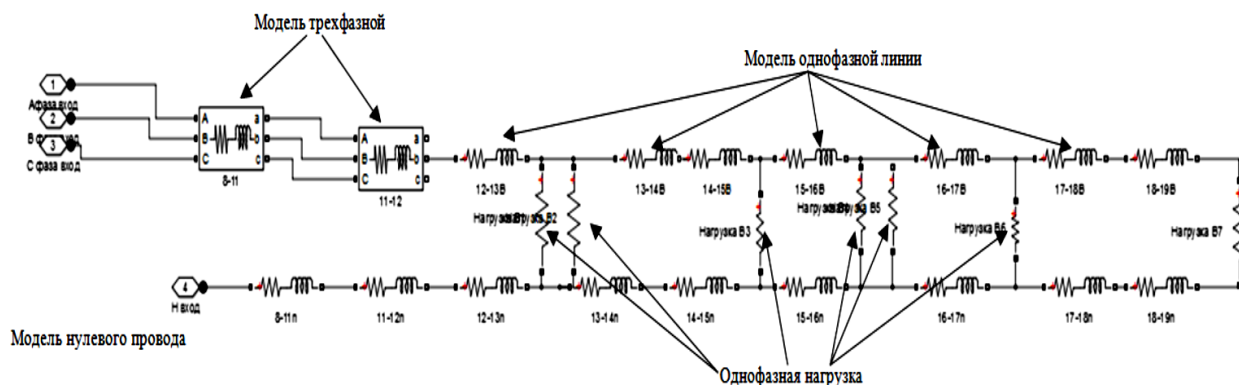


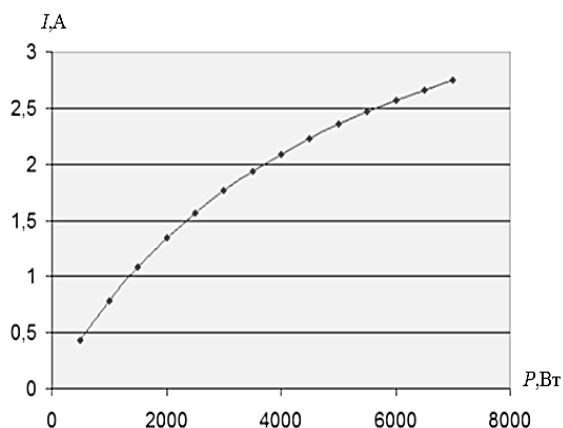
Рисунок 2. Имитационная модель (модуль) участка сельской электрической сети 10/0,4 кВ с однофазной бытовой нагрузкой

В результате полученных данных имитационных исследований сельской распределительной электрической сети 0,4 кВ при изменении мощности однофазной нагрузки от 0,5 до 7 кВт, величина тока в нулевом проводе варьируется от 0,4 до 2,75 А (рисунок 4), коэффициент несимметрии по нулевой последовательности изменяется от 4 до 47% (рисунок 5), отклонение напряжения изменяется в пределах от -3% до 7,5%. Данные имитационных исследований показывают увеличение значений параметров коэффициента несимметрии, отклонения напряжения, а также увеличения тока в нулевом проводе, что доказывает необходимость разработки и внедрения системы управления качеством электрической энергии для повышения надежности электроснабжения сельскохозяйственных потребителей.

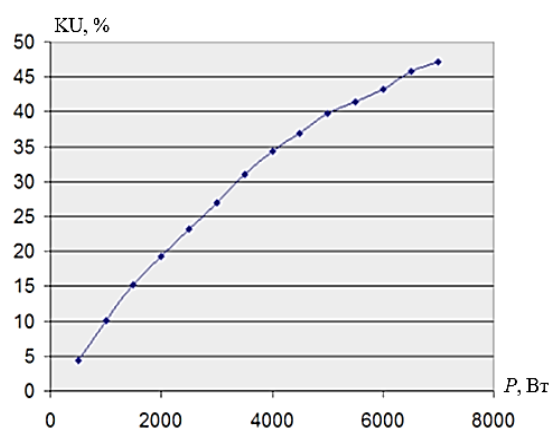
В сельских электрических сетях, обеспечивающих электрической энергией предприятия агропромышленного комплекса, необходимо рассматривать технологию управления качеством электроэнергии (КЭ) как непрерывную цепочку взаимосвязан-

ных управленческих функций. Для решения этой задачи необходимо исследовать всю цепочку управления КЭ в условиях электроснабжения сельскохозяйственных потребителей с системой обратной связи от сбора информации о параметрах электрической энергии, до принятия решений по управляющим воздействиям. Условно, эту цепочку можно разделить на несколько звеньев:

1. Система сбора информации о параметрах электрической энергии;
2. Система обработки информации и прогнозирования
3. Система принятия решений о необходимых отключениях и переключениях.



**Рисунок 4. Характеристика тока в нулевом проводе в зависимости от мощности однофазной нагрузки**



**Рисунок 5. Характеристика коэффициента несимметрии напряжения по нулевой последовательности от изменения мощности однофазной нагрузки**

С целью разработки системы прогнозирования параметров качества электрической энергии были проведены исследования по обоснованию конфигурации нейронной сети. Для работы с нейронными сетями (НС) использован пакет NNTool программы MATLAB 2016. Для проведения исследований наиболее подходящим типом НС был выбран многослойный перцептрон.

В процессе исследования перцептроны с тремя и более слоями показали свою неэффективность (более 70% средней абсолютной ошибки), поэтому для исследования была выбрана НС с двумя слоями – одним скрытым и одним выходным. Размерность входа равна единице, поскольку на вход будут подаваться векторы с размерностью 1.

Ошибка определялась с помощью MAPE – средней абсолютной ошибки прогноза, этот алгоритм наиболее подходит для сравнения результатов прогноза, полученных из одного массива данных. Формула имеет вид:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Y_t - \hat{Y}_t|}{Y_t}, \quad (4)$$

где  $Y_t$  – данные из контрольной выборки,  $\hat{Y}_t$  – данные, полученные в результате прогнозирования.

В качестве выборки данных использовался массив показаний КЭ в течение года, измеряемые в узлах электрической нагрузки сельской электрической сети 10/0,4 кВ Тамбовской области. Измерения проводились согласно требованиям ГОСТ 32145 - 2013.

Задачей проведенных исследований являлось обоснование конфигурации слоев и типов функций активации, обеспечивающих наименьшую ошибку прогноза отклонения напряжения.

Для исследований были применены функции активации:

1. Сигмоидальная передаточная функция (logsig) или сигмоид.

2. Гиперболический тангенс (tansig).

3. Purelin – разновидность линейных функций, чаще всего используется в качестве функции активации в входных или выходных нейронах.

В качестве исходной модели выбрана НС с обратным распространением ошибки, как система с наиболее широким применением, количество слоев – 2, причем в первом слое (скрытом) – 10 нейронов, а во втором (выходном) – 2 нейрона.

Моделирование НС с конфигурацией logsig – purelin (рисунок 6) дало наиболее точные результаты прогнозирования из исследованных конфигураций НС.

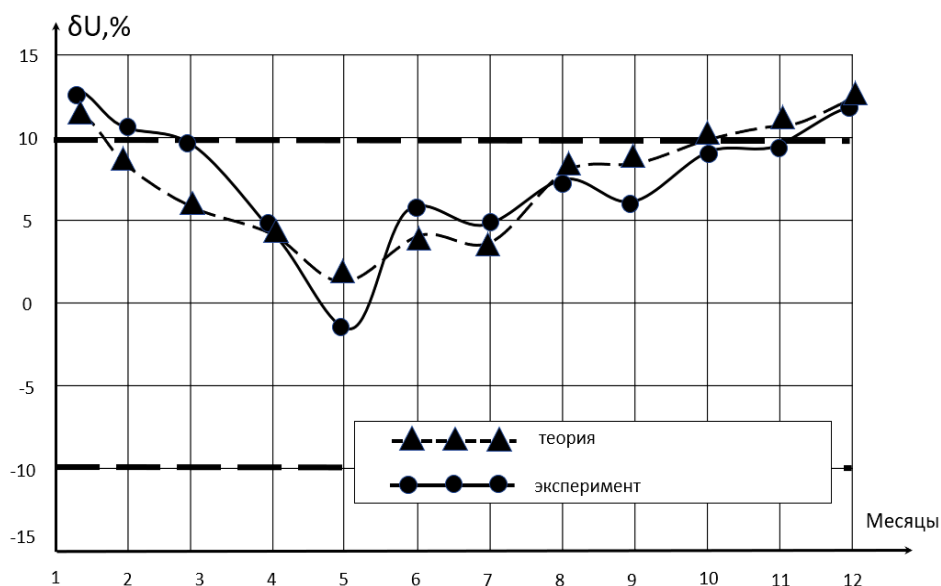


Рисунок 6. Результаты исследований НС с функциями активации типа logsig в скрытом слое и purelin в выходном

НС показала готовность к прогнозированию отклонения напряжения при резком изменении электрической нагрузки сельскохозяйственных потребителей в 5 месяце. Средняя абсолютная ошибка прогноза составила 12%, что является наиболее точным результатом прогнозирования из исследованных в работе конфигураций НС.

Следующим шагом настройки НС являлся выбор способа загрузки данных в нейронную сеть, его формата, поскольку от этого зависит число нейронов в выходном слое и получаемый результат на выходе. Данные НС представлялись в виде: помесечных в течение одного года, по дневных в течение одного месяца и почасовых в течение 12 месяцев. Первые два способа реализуются в виде векторов, а последний способ в виде матрицы, что обусловлено особенностями представления данных в системе MatLAB.

Было выдвинуто предположение, что точность предсказания с использованием НС зависит от степени девиации данных, используемых для обучения, чем меньше девиация значений, тем больше точность.

В результате проведенных исследований было установлено, что матричное представление исходных данных с размерностью [12;12] по часового прогнозирования дало наибольшую точность – средняя абсолютная ошибка прогноза составила 8,5%. Это связано с формой представления данных, а также с увеличенным массивом выборки для обучения нейронной сети.

Для повышения точности прогнозирования были проведены исследования по настройке параметров обучения. Все параметры можно разделить на два вида – пара-

метры остановки обучения и параметры алгоритма обучения. Параметры остановки задают величины, при достижении которых обучение прекращается. К ним относятся *epoch* – количество эпох обучения, *time* – время обучения, *min\_grad* – минимальный градиент ошибки и *max\_fails* – максимальное число проверок перед остановкой.

В исследованиях рассмотрены два параметра настроек – количество эпох и минимальный градиент ошибки. Для исследования были использованы данные почасового потребления электроэнергии с матрицей размерностью [12;12]. Результаты исследований зависимости ошибки прогноза от количества эпох (итераций обучения) приведены на рисунке 7.

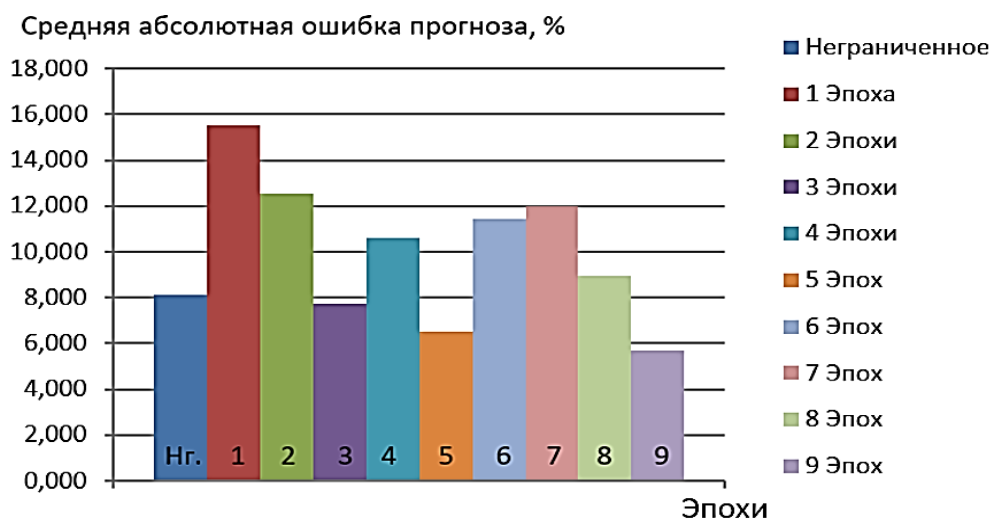


Рисунок 7. Зависимость средней абсолютной ошибки прогноза от количества эпох обучения

Согласно полученным данным наименьшую ошибку прогноза получается при 5 эпохах (6,7%) и 9 эпохах обучения (5,3%). Дальнейшее увеличение итераций обучения свыше 9 эпох не дало повышение точности прогноза. Поэтому оптимальным принято 5 эпох обучения, позволяющие с меньшим временем добиваться минимальной ошибки.

Следующий параметр, влияющий на точность прогнозирования - минимальный градиент ошибки (*min\_grad*). Параметр *min\_grad* варьировался от  $1e-1$  до  $1e-9$ . Согласно полученным данным, минимальным значением степени минимального градиента ошибки является *min\_grad*  $1e-7$ , который показал среднюю абсолютную ошибку прогноза равную 4,8%.

Таким образом, входе проведенных имитационных исследований по прогнозированию отклонения напряжения были обоснованы следующие характеристики искусственной нейронной сети, показывающую наименьшую из исследованных вариантов среднюю абсолютную ошибку прогноза равную 4,8 %:

1. Конфигурация искусственной нейронной сети - многослойный перцептрон с функциями активации типа *logsig* в скрытом слое и *purelin* в выходном;
2. Матричное представление исходных данных с размерностью [12;12];
3. Количество итераций (эпох) обучения: 5;
4. Значение степени минимального градиента ошибки *min\_grad*:  $1e-7$ .

**В третьей главе** «Экспериментальные исследования показателей качества электрической энергии сельских потребителей» представлены результаты экспериментальных исследований проверки адекватности разработанной имитационной модели сельской электрической сети с. Покрово-Пригородное, а также закономерностей изменения параметров качества электрической энергии (КЭ) сельских потребителей:

производственной нагрузки Колхоз – Племенной Завод им. Ленина и бытовой нагрузки жилой сектор село Покрово-Пригородное.

Для проведения экспериментальных исследований использовались приборы марки Ресурс-UF2М, являющиеся мобильной версией Ресурс-UF2 с широкой областью применения. При этом использовались токоизмерительные клещей КТ-52-5-100-1000 с пределом относительной погрешности:  $\pm 0,3\%$  для измерения параметров тока в пределах от 2 мА до 1200 А и потребляемой мощности электроприемников без разрыва цепи. Также прибор комплектуется необходимым программным обеспечением для обработки статистических данных.

Согласно проведенным исследованиям на сельскохозяйственном предприятии «Колхоз – Племенной Завод им. Ленина» были установлены следующие закономерности:

1. Графики отклонения фазных напряжений и графики отклонения межфазных напряжений показывают сильное влияние нагрузки на отклонение напряжения. Так, в утреннее время максимальное отклонение напряжения составило  $-8,5\%$ , а в ночное  $9,8\%$ .

2. Графики коэффициентов несимметрии по нулевой и обратной последовательности находятся в пределах нормы (не более 2%), что говорит о хорошем распределении однофазной нагрузки по фазам в колхозе и преобладании трехфазной нагрузки.

3. Графики коэффициентов искажения синусоидальности фазных напряжений находятся в пределах нормы (не более 2,5%), что говорит о незначительном использовании на предприятии источников искажения синусоидальности: инверторов, источников бесперебойного питания и пр.

4. Графики кратковременной дозы фликера демонстрируют режим работы предприятия: всплески импульсов (до  $2 P_{st}$ ) наблюдаются в утреннее время, когда происходит кормление животных и дойка коров.

С целью проверки адекватности имитационной модели, представленной во второй главе диссертации были проведены экспериментальные исследования, повторяющие теоретические с измерениями отклонения напряжения (рисунок 8).

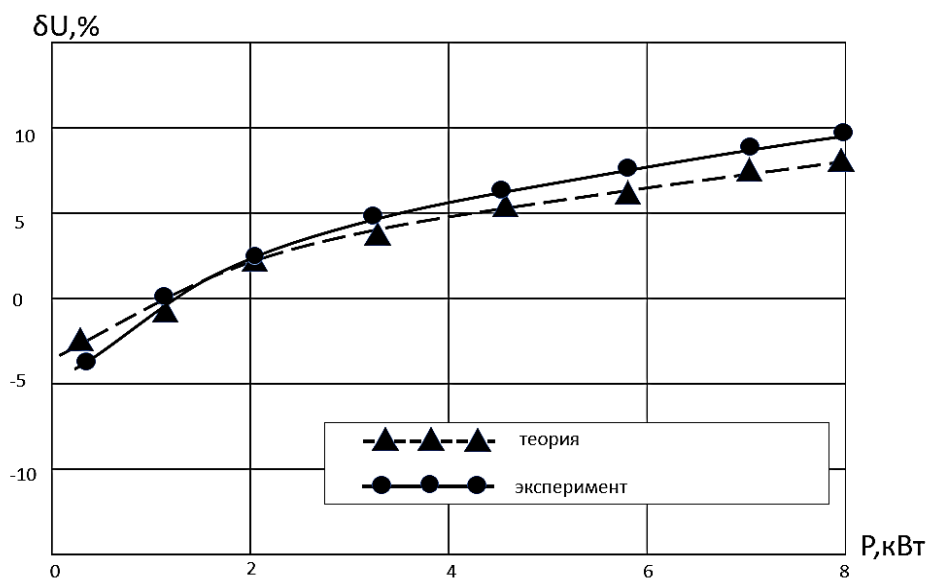


Рисунок 8. Зависимость отклонения напряжения от мощности нагрузки электрической сети

Согласно полученным данным, экспериментальные исследования подтверждают результаты имитационного моделирования. Отклонение теоретических данных от экспериментальных составляет не более 3,5%. Вывод – имитационная модель адекватна.

Экспериментальные исследования проводилось также и в сельском населенном пункте Покрово-Пригородное (бытовая нагрузка). Проведенные исследования с помощью измерителя качества электрической энергии Ресурс UF-2М, в бытовом секторе позволили установить характер изменения коэффициента искажения синусоидальной кривой напряжения  $K_U$ . Увеличение коэффициента искажения синусоидальности фазных напряжений  $K_U$  происходит в вечернее время суток до 6%. Это показывает, что с 18.00 часов жители поселка приходят домой и включают нагрузку нелинейного характера (бытовая техника, телевизоры, компьютеры и пр.). В ночное время коэффициент искажения синусоидальности фазных напряжений уменьшается до 2%, то есть в 3 раза. Полученные данные демонстрируют влияние коммунальной бытовой нагрузки на искажение синусоидальности кривой напряжения на шинах подстанции.

Наиболее распространенными мероприятиями по снижению энергопотребления является замены устаревших ламп накаливания на современные энергосберегающие, такие как компактные люминесцентные (CFL – CompactFluorescentLamps) и светодиодные источники света. Подобные мероприятия позволяют экономить до 80% электроэнергии, используемой на освещение. Однако, встроенные в систему зажигания электронные схемы приводят к изменению формы тока и напряжения и влияют на искажение синусоидальности кривой напряжения.

Для проведения лабораторных исследований влияния компактных люминесцентных ламп на искажение кривой напряжения и тока были выбраны наиболее популярные лампы CFL, используемые в бытовом секторе мощностью 13 Вт, что является эквивалентом лампы накаливания 60-65 Вт.

Схема лабораторной установки представлена на рисунке 9. Для проведения исследований был использован измеритель качества электрической энергии Ресурс - UF2М с токовыми клещами и персональный компьютер для обработки и отображения измеряемой информации.

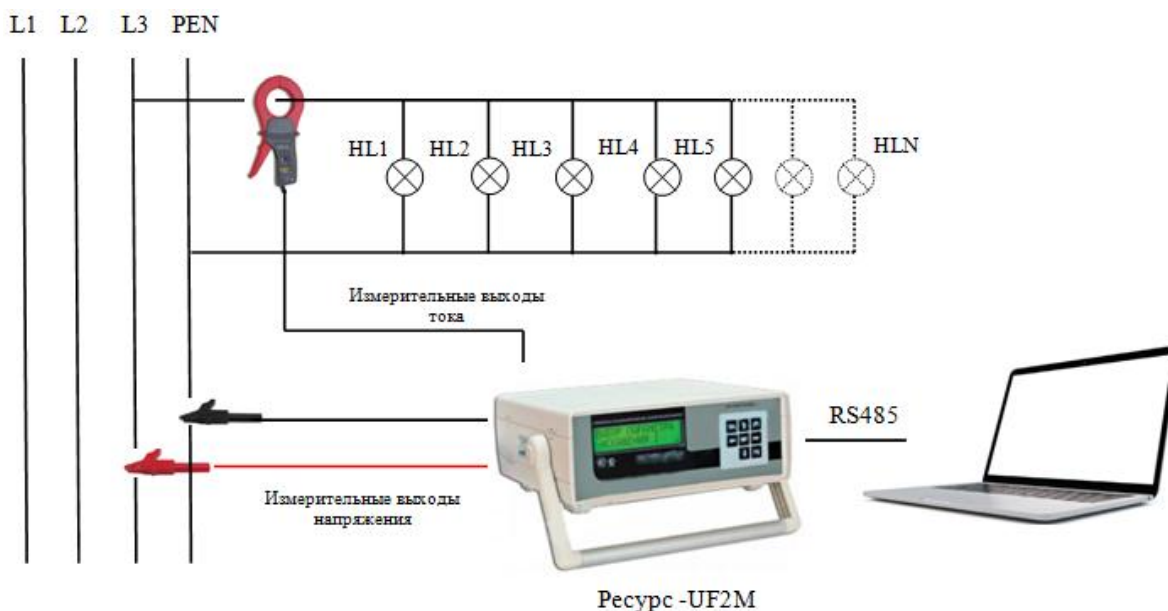


Рисунок 9. Схема лабораторной установки для измерения ПКЭ

В результате проведенных лабораторных исследований были получены спектральные характеристики напряжения и тока при работе люминесцентных ламп (рисунок 10 и 11).

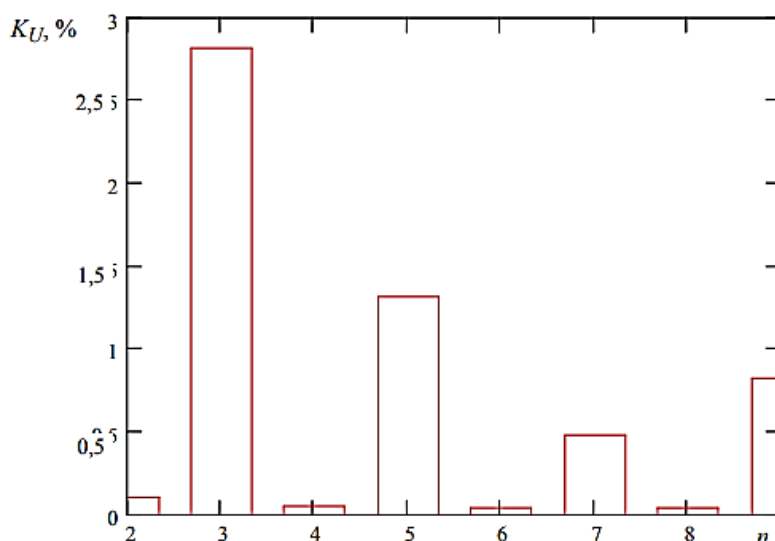


Рисунок 10. Спектральное представление гармонических составляющих напряжения

Применение спектрального анализа для исследования искажения синусоидальности характеристик напряжения и тока, позволили выделить отдельные гармонические составляющие и определить их величину. Для анализа спектрального характера искажения синусоидальности применим ряд Фурье для выражения тока  $i(t)$ :

$$i(t) = I_0 + \sum_{k=0}^n I_{km} \sin(k\omega t + \phi_k), \quad (5)$$

где  $n$  – порядок (номер) последней из учитываемых высших гармоник;  $I_{km} \sin(k\omega t + \phi_k)$  – гармоники или гармонические составляющие  $k$ -го порядка с амплитудой  $I_{km}$  и начальной фазой  $\phi_k$ ,  $I_0$  – постоянная составляющая.

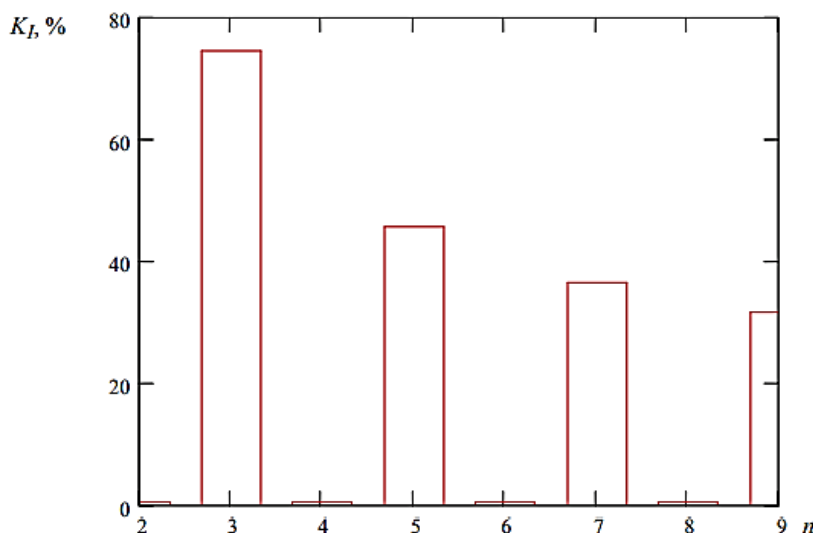


Рисунок 11. Спектральное представление гармонических составляющих тока

На рисунках 9 и 10 показано распределение коэффициента  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения и тока в зависимости от номера гармоники. Согласно полученным данным, в гармонических составляющих напряжения и тока преобладают нечетные гармоники. Особенно искажается кривая тока  $K_I$ , величина 3-й гармоники тока достигает 74% от основной частоты тока. Проведенные в работе лабораторные исследования показывают, что даже незначительное увеличение потребляемой активной мощности газоразрядными лампами вызывает возрастание коэффициента искажения синусоидальной кривой напряжения  $K_U$  (рисунок 12)

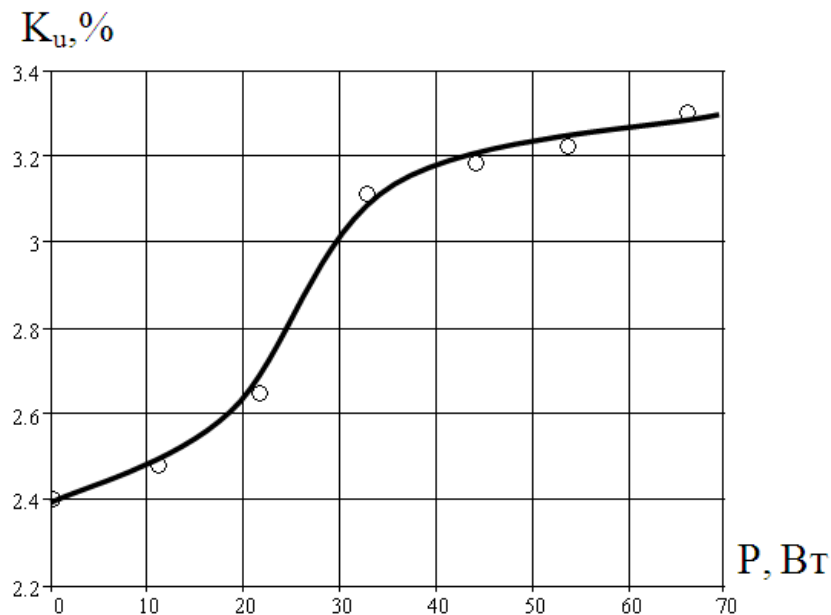


Рисунок 12. Зависимость коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения от потребляемой мощности люминесцентных ламп

С целью прогнозирования увеличения  $K_U$ , была получена математическая модель, отражающая характер изменения  $K_U$  в функции потребляемой активной мощности  $P$ :

$$K_U(P) = \frac{5,78 \cdot 10^4 + 3,42P^{2,91}}{2,4 \cdot 10^4 + P^{2,91}} \quad (11)$$

Полученная модель позволяет эксплуатирующим и проектным организациям проводить анализ о прогнозировании увеличения коэффициента искажения синусоидальной кривой напряжения в питающих сетях с целью обеспечения надежного электроснабжения.

В четвертой главе «Разработка системы нейросетевого регулирования напряжения» сформирована структурная схема (рисунок 13) и блок-схема (рисунок 14) системы нейросетевого регулирования напряжения, а также проведено физическое моделирование сельской электрической сети с целью проверки работы нейросетевого регулирования напряжения для обеспечения необходимого уровня напряжения у наиболее удаленного потребителя.

Особенностью структурной схемы (рисунок 13) регулирования напряжения является наличие выстроенной цепочки взаимосвязанных модулей и наличие обратных связей, позволяющих поддерживать отклонение напряжения в системе электроснабжения сельскохозяйственных потребителей не выше заданного значения.

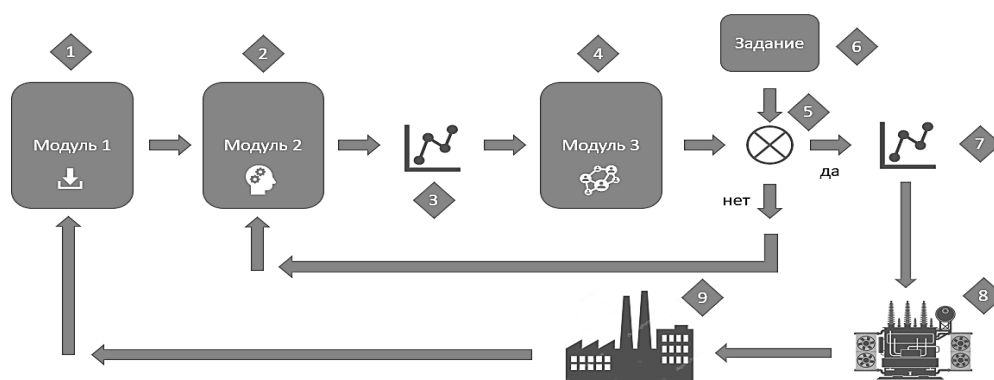


Рисунок 13. Структурная схема системы нейросетевого регулирования напряжения



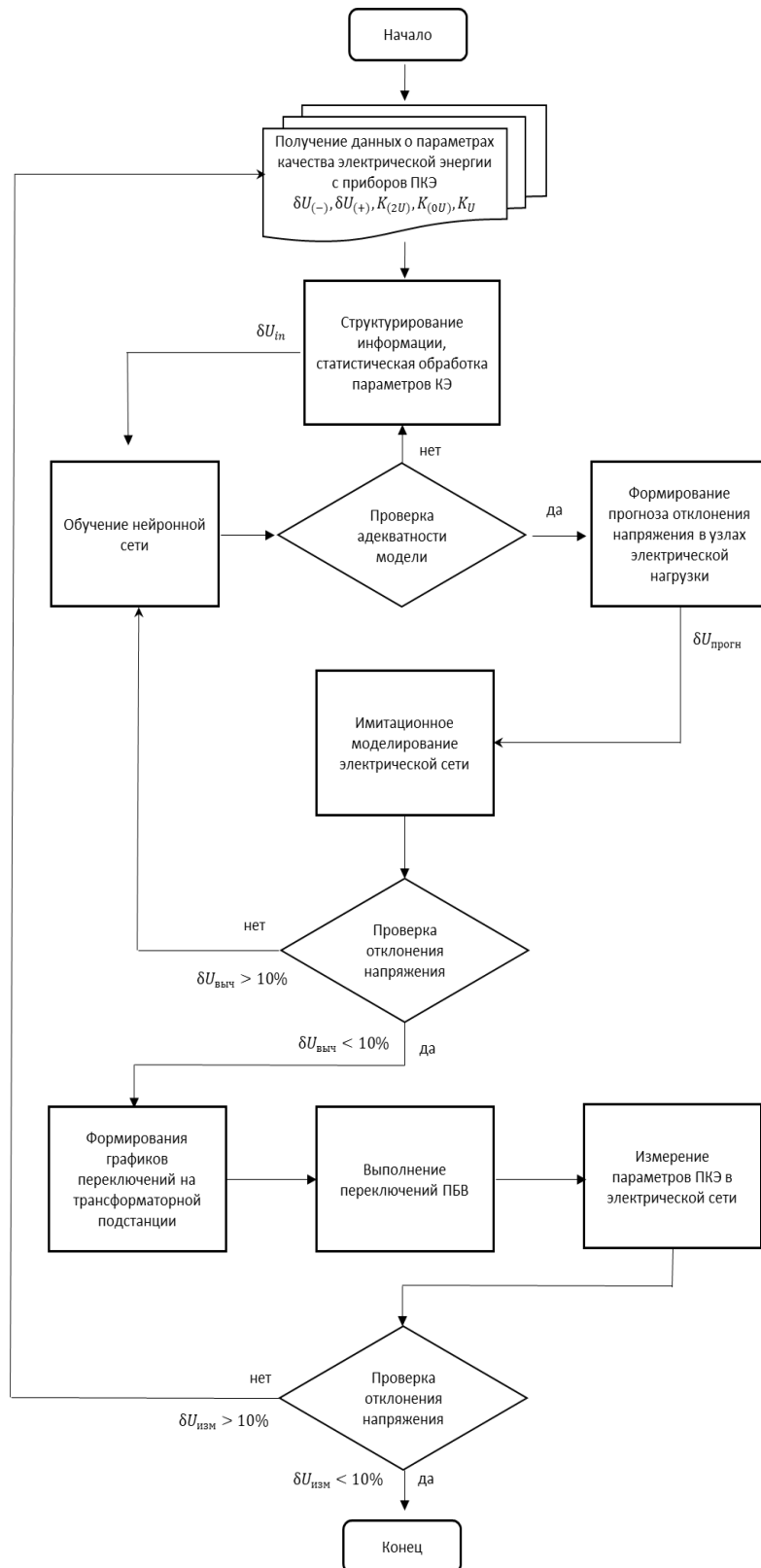


Рисунок 14. Блок-схема системы нейросетевого регулирования напряжения

Структурная схема состоит из трех основных модулей:

1. Первичная информация о параметрах КЭ собирается в «Модуль 1» (1). Модуль представляет собой совокупность оборудования и программного обеспечения, осуществляющего сбор информации о параметрах КЭ у потребителей и на электрических подстанциях уровня напряжения: 10/0,4 кВ.

2. «Модуль 2» (2) состоит из трех функциональных структур:

2.1. Структурирование информации, статистическая обработка параметров КЭ (рисунок 14);

2.2. Обучение нейронной сети и проверка ее адекватности. Входе прогнозирования параметров КЭ происходит формирование графиков отклонений КЭ с прогнозом ежемесячно в течение года;

2.3. Расчет времени проведения регулировки напряжения и величины регулировочной уставки (3).

Прогноз отклонения напряжения в узлах электрической нагрузки в течение года позволяет установить месяц, в котором по прогнозу будет максимальное отклонение напряжения. Таким образом, на прогнозируемый год можно более точно установить периоды максимальных и минимальных нагрузок, а по величине отклонения напряжения рассчитать степень регулирования ПБВ.

3. После вычисления величины уставок переключений ПБВ и времени, согласно прогнозируемому отклонению напряжения, информация поступает в «Модуль 3» (4) – модуль имитационного моделирования электрической сети. Имитационная модель представляет из себя копию реальной электрической сети, выполненную в программе MATLAB SimPowerSystems. В результате проведения имитационного моделирования вычисляются параметры КЭ в узлах электрической нагрузки и у потребителей. Имитационная модель позволяет установить отклонения напряжения на всех участках электрической сети, в том числе у наиболее удаленного потребителя.

После установки величин отклонений напряжений значения сравниваются с заданными в соответствии со стандартом. Элемент сравнения (5) с заданием (6) вычисляют величину отклонения. В случае, если отклонение напряжения превышает 10%, команда о повторе вычислений поступает на «Модуль 2». Итерации вычислений повторяются до тех пор, пока отклонения напряжений на всех участках сети не будут превышать 10%.

На завершающем этапе (7) информация об управлении (величина уставки ПБВ, месяц проведения переключений) поступает в диспетчерскую для формирования графиков переключений на трансформаторной подстанции (8). В результате выполнения переключений на трансформаторе у сельскохозяйственных потребителей (9) устанавливаются необходимые уровни напряжения. Эта информация, регистрируема приборами качества электроэнергии снова сравнивается с допустимой величиной отклонения напряжения и направляется в «Модуль 1» (1) для последующего формирования массива данных для обучения нейросетевого регулятора.

Физическое моделирование системы управления качеством электрической энергии в сельской электрической сети выполнялось в лаборатории кафедры «Электроэнергетика» Тамбовского государственного технического университета. Конструктивное исполнение лабораторной установки представлено на рисунке 15.

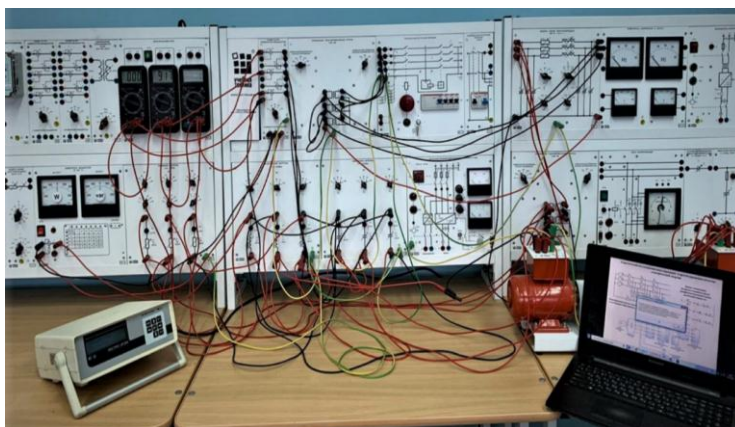


Рисунок 15. Конструктивное исполнение лабораторной установки

Согласно полученным результатам физического моделирования (рисунок 16 и 17), прослеживается зависимость отклонения напряжения от электрической нагрузки, распределенной по месяцам. Были установлены периоды максимальных и минимальных отклонений напряжения и их величина.

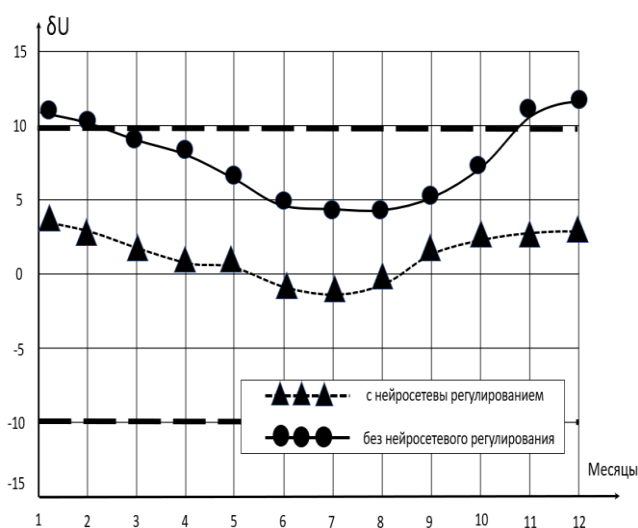


Рисунок 16. Изменение отклонения напряжения на зажимах вторичной обмотки трансформатора

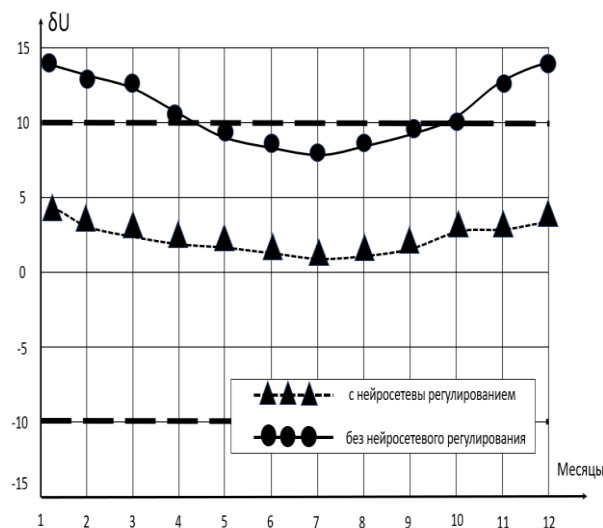


Рисунок 17. Изменение отклонения напряжения на зажимах удаленной нагрузки (осветительная сеть)

На зажимах вторичной обмотки трансформатора в зимние месяцы (12, 1 и 2) отклонение напряжения превышает порог стандарта в 10% и находится в пределах от +11% до +13%. На зажимах удаленной нагрузки отклонение напряжения превышает 10% как в зимние месяцы, так и частично осенние (10, 11) и весенние (3,4). Это связано с удаленностью осветительной нагрузки и падением напряжения по длине линии.

После запуска системы нейросетевого регулирования характеристика отклонения напряжения опускается до отметки ниже +5%. На зажимах трансформатора среднее значение в течение года составляет не более 3%, а на зажимах осветительной нагрузки не более 3,8%.

Таким образом, значения отклонения напряжения с применением нейросетевого регулирования находятся в пределах требования ГОСТ, что подтверждает эффективность его применения.

**В пятой главе** «Технико-экономическое обоснование системы нейросетевого регулирования напряжения в электроснабжении сельскохозяйственных потребителей» рассчитана возможная экономическая эффективность применения разрабатываемой системы.

При выборе и обосновании экономической эффективности необходимо руководствоваться следующими критериями:

1. Затратного критерия (затраты на разработку, внедрение и эксплуатации);
2. Критерия нормируемого показателя качества электрической энергии:

$$N_{\text{дкЭ}} \geq N_{\text{нкЭ}} \quad (12)$$

т.е. действующие параметры КЭ  $N_{\text{дкЭ}}$  в системе электроснабжения не должны быть ниже  $N_{\text{нкЭ}}$  нормируемых в соответствии с ГОСТ.

Согласно проведенным расчетам установлено, что за счет внедрения системы нейросетевого регулирования напряжения в узле электрической нагрузки, питающей сельскохозяйственных потребителей, экономический эффект составляет 457,1 тыс. руб.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований сводятся к следующему:

1. Проведена оценка известных способов и средств управления качеством электрической энергии и регулирования напряжения в электроснабжении сельскохозяйственных потребителей, который показал актуальность разработки системы регулирования напряжения позволяющей оценивать качество электрической энергии с требуемой точностью и периодичностью, а также осуществлять прогнозирование отклонения напряжения. Анализ известных систем регулирования напряжения показал необходимость разработки системы регулирования, которая способна работать с устройствами ПБВ, как наиболее распространенными устройствами регулирования напряжения в сельском хозяйстве. Для прогнозирования параметров качества электрической энергии наиболее подходящими являются искусственные нейронные сети способные к обучению и обобщению накопленных знаний.

2. Разработана имитационная модель сельской электрической сети 10/0,4 кВ с использованием пакета SimPowerSystems в математической программе MATLAB 7.0, позволяющая повысить надежность систем электроснабжения за счет вычисления параметров качества электрической до наступления аварийной ситуации. В результате имитационных исследований режимов ее работы установлено, что при изменении мощности бытовой однофазной нагрузки от 0,5 до 7 кВт сельскохозяйственных потребителей, величина тока в нулевом проводе варьируется от 0,4 до 2,75 А, коэффициент несимметрии по нулевой последовательности изменяется от 4 до 47%, отклонение напряжения находится в пределах от -3% до 7,5%.

3. Разработана и теоретически обоснована конфигурация нейронной сети для прогнозирования отклонения напряжения в электроснабжении сельскохозяйственных потребителей с функциями активации типа *logsig* в скрытом слое и *purelin* в выходном, которая позволяет прогнозировать отклонение напряжения при резком изменении электрической нагрузки сельскохозяйственных потребителей, показывающую наименьшую из исследованных вариантов среднюю абсолютную ошибку прогноза равную 4,8 %.

4. В результате экспериментальных исследований проведена проверка адекватности разработанной имитационной модели сельской электрической сети с. Покрово-Пригородное. Согласно полученным данным, экспериментальные исследования подтверждают результаты имитационного моделирования. Отклонение теоретических данных от экспериментальных составляет не более 3,5%. Выявлены закономерностей изменения параметров качества электрической энергии (КЭ) сельских потребителей. Установлено, увеличение коэффициента искажения синусоидальности фазных напряжений сельской бытовой нагрузки до с 2% до 6%, что характеризует влияние современной коммунальной бытовой нагрузки сельских потребителей на искажение синусоидальности кривой напряжения на шинах подстанции. Характерной особенностью режима электроснабжения сельскохозяйственного предприятия, является сильное влияние нагрузки на отклонение напряжения в ночное и дневное время, связанное с отсутствием системы регулирования напряжения.

5. Проведены лабораторные исследования влияния источников света на увеличение гармонических составляющих напряжения и тока. Согласно полученным данным в гармонических составляющих напряжения и тока преобладают нечетные гармоники. Особенно искажается кривая тока. Величина 3-й гармоники тока достигает 74% от основной частоты тока. Величина 3-й гармоник напряжения не превышает нормально

допустимых значений 5% в сети напряжением 0,38 кВ. На основании полученных данных разработана математическая модель, отражающая характер изменения коэффициента искажения синусоидальности в функции потребляемой активной мощности источников света. Математическая модель позволяет вычислять прогнозные значения увеличения коэффициента искажения синусоидальности электрических сетях.

6. Разработана структура системы нейросетевого регулирования напряжения для электроснабжения сельскохозяйственных потребителей и проведены ее экспериментальные исследования. Отличительной особенностью нейросетевого регулирования напряжения является возможность работы с устройствами ПБВ за счет формирования графиков переключений на трансформаторных подстанциях в результате нейросетевого прогнозирования отклонения напряжения. Установлено, что в результате работы в нейросетевого регулирования напряжения среднее значение отклонения напряжения в течение года составляет не более 3%, а на зажимах удаленной осветительной нагрузки не более 3,8%.

7. Проведено технико-экономическое обоснование системы нейросетевого регулирования напряжения в электроснабжении сельских потребителей. Установлено, что за счет внедрения системы нейросетевого регулирования напряжения в узле электрической нагрузки, питающей сельскохозяйственных потребителей, годовой ущерб потребителям из-за работы с пониженным напряжением снижается с 185 до 14,3 тыс. руб/год, а экономический эффект составит 457,1 тыс. руб.

**Рекомендации производству.** Полученные результаты исследований могут быть использованы при проектировании систем управления качеством электрической энергии в электроснабжении сельскохозяйственных потребителей.

**Перспективы дальнейшей разработки темы.** Совершенствование предлагаемой системы за счет разработки аппарата прогнозирования несинусоидальности и несимметрии напряжений.

## **ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ**

**а) в издании, включенном в систему цитирования (библиографическую базу) Scopus:**

1. Dzharparova, D. A. Electric Load Forecasting in Electrical Power Supply Systems / D. A. Dzharparova V. F. Kalinin, N. M. Zyablov, A. V. Kobelev, S. V. Kochergin, L. Y. Korolyova // International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562. – Vol. 12, Number 24 (2017). – pp. 15278-15286

2. Dzharparova, D. A. Quality management of electric power for agricultural consumers / D. A. Dzharparova, V. F. Kalinin, A. V. Kobelev, S. V. Kochergin, L. Y. Korolyova // 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency. Lipetsk State Technical University. November, 2019. 20-22.

**б) в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:**

3. Кагдин, А. Н. Моделирование распределительных электрических сетей 10/0,4 кВ / А. Н. Кагдин, М. Ю. Авдеева, Д. А. Джапарова // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2014. – № S(52). – С. 59-64.

4. Кагдин, А. Н. Фрактальное моделирование и нейронные электрические сети / А. Н. Кагдин, Д. А. Джапарова, К. И. Терехов // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2014. – № S(52). – С. 65-70.

5. Кобелев, А.В., Моделирование несимметричных сельских распределительных электрических сетей 10/0,4 кВ / А.В. Кобелев, С.В. Кочергин, Д.А. Джапарова, Л.Ю. Королева // Наука в центральной России. – 2017. – № 2 (26). – С. 47-53.

6. Калинин, В. Ф., Анализ методов представления данных искусственной нейронной сети для управления электроэнергетическими системами / В. Ф. Калинин, Н. М. Зяблов, С. В. Кочергин, А. В. Кобелев, Д. А. Джапарова // Вестник Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, №4. – С. 609-616.

**в) статьи в сборниках материалов научных конференций:**

7. Джапарова, Д.А. Вопросы прогнозирования несимметричной электрической нагрузки // Энергосбережение и эффективность в технических системах: материалы III Международной научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ» – 2016. – С. 236-237.

8. Жексембиева, Н.С. Характеристики показателей качества электрической энергии / Н. С. Жексембиева, Д. А. Джапарова // Энергосбережение и эффективность в технических системах: материалы III Международной научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ» – 2016. – С. 237-239.

9. Джапарова, Д. А. Исследование нейросетевых алгоритмов при решении задач прогнозирования электрической нагрузки / Д. А. Джапарова, А. Н. Кагдин // ЭНЕРГЕТИКА. ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ: материалы II Всероссийской студенческой научная конференция посвященной Дню энергетика. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ» – 2016. – С.99-101.

10. Джапарова, Д. А. Исследование режимов работы бытовой электрической нагрузки. Джапарова Д. А., Кагдин А. Н. ЭНЕРГЕТИКА. ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ: материалы II Всероссийской студенческой научная конференция посвященной Дню энергетика. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ» – 2016. – С. 97-99.

11. Зяблов, Н.М. Прогнозирование потребления электрической энергии / Н.М. Зяблов, Д.А. Джапарова, С.В. Кочергин // Энергосбережение и эффективность в технических системах: материалы IV Международной научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ» – 2017. – С. 284-285.

12. Кочергин, С.В. Экономическая эффективность управления качеством электрической энергии в агропромышленном комплексе / С.В. Кочергин, В.Ф. Калинин, Д.А. Джапарова // Стратегии противодействия угрозам экономической безопасности России: материалы II Всероссийского форума по экономической безопасности. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ» – Выпуск II. – 2019. – С. 54-57.

13. Калинин, В.Ф. Интеллектуальные технологии надежного оптимального управления сельскими распределительными электрическими сетями / В.Ф. Калинин, С.В. Кочергин, Д.А. Джапарова // Импортзамещающие технологии для глубокой комплексной переработки сельскохозяйственного сырья: материалы Всероссийской конференции с международным участием. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2019. – С. 509-512.

14. Калинин, В.Ф. Системы управлением качества электрической энергии в условиях функционирования агропромышленного комплекса / В.Ф. Калинин, С.В. Кочергин, Д.А. Джапарова // Импортзамещающие технологии для глубокой комплексной переработки сельскохозяйственного сырья: материалы Всероссийской конференции с международным участием. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2019. – С. 513-517.

Отпечатано в издательско-полиграфическом центре  
ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ  
Подписано в печать 20.02.2020. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>,  
Бумага офсетная № 1. Усл.печ.л. 1,3 Тираж 100 экз. Ризограф  
Заказ № 20460

---

Издательско-полиграфический центр  
Мичуринского государственного аграрного университета  
393760, Тамбовская обл., г. Мичуринск, ул. Интернациональная, 101,  
тел. +7 (47545) 9-44-45

