

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение**  
**высшего образования**  
**«Тамбовский государственный технический университет»**  
**(ФГБОУ ВО «ТГТУ»)**

На правах рукописи



**ДЖАПАРОВА ДИНАРА АМАНГЕЛЬДИЕВНА**

**НЕЙРОСЕТЕВОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ**  
**В ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ**  
**ПОТРЕБИТЕЛЕЙ**

Специальность 05.20.02 - Электротехнологии и электрооборудование в  
сельском хозяйстве

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук,  
профессор Калинин В.Ф.

Тамбов - 2020

## ОГЛАВЛЕНИЕ

	ВВЕДЕНИЕ.....	4
1	СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ.....	11
1.1	Вопросы энергообеспечения сельскохозяйственных потребителей.....	11
1.2	Особенности электроснабжения сельскохозяйственных потребителей.....	15
1.3	Особенности управления качеством электрической энергии и регулируемого напряжения в электроснабжении сельскохозяйственных потребителей.....	21
1.4	Анализ нейронных сетей для прогнозирования параметров качества электрической энергии.....	31
1.5	Постановка задачи диссертационной работы.....	39
2	ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ.....	41
2.1	Разработка имитационной модели сельской электрической сети.....	41
2.2	Обоснование конфигурации нейронной сети для прогнозирования отклонения напряжения в сельских электрических сетях.....	53
3	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ СЕЛЬСКИХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ.....	70
3.1	Исследование закономерностей изменения параметров качества электрической энергии сельских потребителей.....	70
3.2	Исследования влияния работы люминесцентных ламп на показатели качества электрической энергии.....	86
4	РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ НЕЙРОСТЕВОВОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ.....	93
4.1	Формирование структуры и алгоритма системы нейростевого регулируемого напряжения.....	93
4.2	Экспериментальные исследования эффективности системы нейросетевого регулируемого напряжения.....	98

5	ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СИСТЕМЫ НЕЙРОСЕТЕВОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ.....	106
5.1	Оценка экономических параметров управления качеством электроэнергии сельскохозяйственных потребителей .....	106
5.2	Определение экономических потерь при снижении напряжения в узле электрической нагрузке.....	110
5.3	Определение затрат на внедрение системы нейросетевого регулирования напряжения.....	113
5.4	Расчет экономического эффекта от внедрения системы нейросетевого регулирования напряжения.....	116
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	118
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	122
	ПРИЛОЖЕНИЯ.....	139

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследований.** 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 «умные» 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-коммутиционной 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 качества электрической энергии в сельских электрических сетях – является отклонение напряжения. 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. Жежеленко, 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 числе с использованием искусственных нейронных сетей,

для управления качеством электрической энергии сельскохозяйственных потребителей.

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

**Задачи исследований:**

1. Провести оценку известных способов и средств управления качеством электрической энергии и регулирования напряжения в электроснабжении сельскохозяйственных потребителей;
2. Разработать имитационную модель сельской электрической сети 10/0,4 кВ и выполнить теоретические исследования режимов ее работы;
3. Разработать конфигурацию нейронной сети для прогнозирования отклонения напряжения в электроснабжении сельскохозяйственных потребителей;
4. Разработать структуру системы нейросетевого регулирования напряжения для электроснабжения сельскохозяйственных потребителей;
5. Разработать математическую модель прогнозирования коэффициента искажения синусоидальности от изменения потребляемой активной мощности источников света;
6. Провести экспериментальные исследования нейросетевого регулирования напряжения в системах электроснабжения сельскохозяйственных потребителей;
7. 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 работы:**

1. Разработана конфигурация нейронной сети для прогнозирования параметров электрической энергии, отличающаяся тем, что позволяет прогнозировать отклонение напряжения при резком изменении электрической нагрузки сельскохозяйственных потребителей;

2. 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;

3. 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.** 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:**

1. Конфигурация нейронной сети для прогнозирования параметров электрической энергии;
2. Структура нейросетевого регулирования напряжения в системах электроснабжения сельскохозяйственных потребителей;
3. 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 электроснабжения сельскохозяйственных потребителей, результаты исследований опубликованы автором и прошли апробацию на конференциях разного уровня.

**Реализация результатов исследований.** Результаты исследований используется в учебном процессе по подготовке бакалавров и магистров направления «Электроэнергетика и электротехника» и аспирантов направления «Электро- и теплотехника» в ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет». Результаты исследований приняты к внедрению в 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. Импортозамещающие 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.

# 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

## 1.1. Вопросы энергообеспечения сельскохозяйственных потребителей

Обеспечение электрической энергией, создание систем передачи, распределения и применения электрической энергии, является необходимым условием развития всех технологических отраслей, в том числе и сельскохозяйственного производства. [1-30]

С момента реализации в 1920 году Государственного плана электрификации России (ГОЭЛРО) было построено 30 электростанций суммарной мощностью 1,75 млн. кВт, что позволило Советскому Союзу выйти на третье место по производству электроэнергии. Это послужило импульсом для развития промышленности и сельскохозяйственного производства. Особенностью построения системы электроснабжения заключалось в развитии централизованного электроснабжения и крупных электростанций, однако, в это время происходит и строительство не больших электростанций мощностью 40 кВт, использующих дизельное топливо. Необходимость в этом заключалась в том, чтобы обеспечить электрической энергией совхозы и колхозы, находящиеся в отдаленных от крупных центров территориях. Это было экономически не целесообразная, но временная мера.

В настоящее время сельское хозяйство получает электрическую энергию от энергетических систем. Однако со временем построенные линии электропередач требуют модернизации и реконструкции. Текущее состояние электрификации сельского хозяйства характеризуется значительным износом. По данным авторов МСХА им. Тимирязева в советский период средний износ подстанций составлял 43,5 %, а в настоящее время 122,7%. [7] По мнению

большинства исследователей наиболее слабым звеном являются распределительные электрические сети 10/0,4 кВ.

За годы реформ в 90-е годы отмечен значительный износ материально-технической базы сельского хозяйства. Уменьшилось производство тракторной техники более чем в 16 раз и более чем в 12 раз зерноуборочных комбайнов. К 2005 году общая стоимость основных фондов достигла минимальной отметки в 775 млрд. руб. Однако, уже начиная с 2006 года эта цифра начала возрастать и увеличилась в 1,84 раза. [31]

Особенностью развития сельского хозяйства в настоящее время является его интенсивный рост. Производство скота и птицы демонстрирует интенсивный темп развития около 4.2% процентов в год, а производство яиц 1.6%. Это связано с большой модернизацией отрасли за счет государственной поддержки субсидирования сельхоз товаропроизводителей: свиноводство, овощеводство, тепличное хозяйство, семеноводство и т.д.

Это связано с реализацией в 2008 году национального проекта «Развитие АПК» и пристальным вниманием государства к продовольственной безопасности страны и обеспечения качества и стабильности жизни граждан Российской Федерации.

По результатам проведения Госпрограммы к 2020 году должно произойти повышение удельного веса российских продовольственных товаров в общих ресурсах продовольственных товаров: зерна — до 99,7%, свекловичного сахара — до 93,2%, растительного масла — до 87,8%, картофеля — до 98,7%, мяса и мясопродуктов — до 91,5%, молока и молокопродуктов — до 90,2%. Общее увеличение продукции сельского хозяйства всех категорий в 2020 году по отношению к 2012 году должно составить 24,8%. Уровень рентабельности сельхозпредприятий должен повыситься на 10–15%. Доведение соотношения уровней заработной платы в сельском хозяйстве и в среднем по экономике страны — до 55%. Увеличение

производства картофеля — до 6 млн тонн, овощей открытого грунта — до 5,2 млн тонн, овощей защищенного грунта — до 1,4 млн. тонн. [32]

Основной целью развития сельскохозяйственной отрасли, является замещение импортной мясной и молочной продукции за счет развития животноводства, увеличение производства мяса и молока. Это возможно за счет повышения рентабельности животноводства уже действующих комплексов, их технической модернизации, а также за счет развития фермерского хозяйства.

Развитие крупных животноводческих комплексов позволило достичь отметки суммарного производства в 2018 году на территории России всех видов мяса по данным АБ-Центр в 10 714,3 тыс. тонн в убойном весе, что на 3,2% (на 329,9 тыс. тонн) больше, чем в 2017 году (рис. 1.1). [33]

Подобный темп развития отрасли позволил стать драйвером для производства продуктов питания. Согласно АБ-Центр производство мясных полуфабрикатов увеличилось на 6%.

Однако в животноводстве, как и в других отраслях, существуют свои проблемы. Животноводство является энергозатратным производством – это связано с обеспечением хороших условий содержания животных, а также в обеспечении их качественными кормами. Корм, его хранение, вносят существенную долю расходов сельскохозяйственных предприятий, в т. ч. на электроэнергию. Известно, что независимо от вида животных основной составляющей корма является растительная пища, которая должна свежей и высушенной. Как правило, предприятие само участвует в подготовке кормов, планирует его запасы. Все это требует существенных затрат на топливно-энергетические ресурсы.

В этой связи сельское хозяйство столкнулось с зависимостью цен на топливно-энергетические ресурсы от мировых цен, их дефицитом. Помимо высоких цен, имеются проблемы в надежном и качественном обеспечении электрической энергией отдельных территорий и хозяйств.

Наиболее энергоемкими производствами в сельском хозяйстве, особенно в молочном направлении, являются животноводческие комплексы, для которых характерно значительное потребление электрической энергии. [3,9]

Технологическое оборудование, выполняющее производственные процессы – является наиболее энергоемким элементов в технологической цепочке в животноводстве. По данным [34] ежегодное потребление электрической энергии в животноводстве находится на уровне 50 млрд. кВт·ч, что составляет около 40% от общего потребления электрической энергии в сельском хозяйстве. При этом росте производства продуктов животноводства на 1% требует дополнительных затрат расходы топлива и электрической энергии на 2-4%. В целом, на сельскохозяйственную отрасль приходится около 17% от общего энергопотребления. Потребность в сельскохозяйственной продукции растет, что по прогнозам через 10-15 лет вызовет удвоение энергопотребления.

Анализ технологий производства продукции животноводства [35-37] позволяет квалифицировать энергетические затраты природных ресурсов в технологической последовательности их приложения. Биоэнергетический анализ процесса производства молока на молочном комплексе привязанного содержания на 1200 голов показал, что 47,33 % совокупной энергии приходится на корма и 49,48% на тепловую и электрическую энергию (таблице 1.1).

Таблица 1.1 – Совокупный расход овеществленной энергии при производстве молока (комплекс на 1200 гол.) [35]

Статьи затрат совокупного расхода энергии	Затраты энергии, ГДж/год	В процентах итога, %
Производственные здания, сооружения машины и оборудование	3,81	3,18
Тепловая и электрическая энергия	59,16	49,48
Корма	56,60	47,33
Всего	119,57	100,0

С целью повышения эффективности энергетики сельского хозяйства Правительством РФ разрабатываются меры по повышению энергетической эффективности в агропромышленном комплексе (АПК).

Можно выделить следующие направления повышения энергетической эффективности в АПК [30, 40, 63, 64]:

- 1) развитие систем комбинированной выработки электрической и тепловой энергии (когенерация и тригенерация энергии)
- 2) развитие распределенных и альтернативных источников энергии
- 3) повышение энергетической эффективности технологических цепочек для производства продукции животноводства и растениеводства за счет использования современных систем управления и новых материалов;
- 4) применение энергосберегающих циклов утилизации и рециркуляции тепловой энергии (гелиоустановки, тепловые насосы и т. п.);
- 5) модернизация существующих систем электроснабжения, переход их на адаптивные «умные» сети (SmartGrid) с использованием интеллектуальных элементов защиты и распределения электрической энергии.

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

## 1.2. Особенности электроснабжения сельскохозяйственных потребителей

Электрическими сетями сельскохозяйственного назначения принято называть сети, в которых более 50% электрической нагрузки приходится на сельскохозяйственных потребителей: предприятия АПК, жилой и административный сектор на селе.

Особенностью сельских электрических сетей [39-44] является большая протяженность. Протяженность воздушных линий в Российской Федерации составляет 2,7 млн. км, при этом на долю распределительных сетей 6-10 кВ (наиболее распространенных в сельском хозяйстве) приходится около 1,2 млн. км. Доля аварийных отключений на этих линиях максимальна.

Протяженность сельских распределительных сетей уменьшают за счет их формирования разветвленные радиальные сети. Особенностью этих сетей являются высокие токовые нагрузки в начале линий и низкие в конце, при этом значения напряжений в различных точках сети отличаются, что оказывает влияние на качество электрической энергии.

Графики нагрузок сельскохозяйственных предприятий имеют свои особенности: максимумы нагрузок в утренние и вечерние часы с резким снижением в дневное время. Это связано с особенностью процесса доения животных и их кормления. В это же время убирают навоз, моют посуду, обрабатывают животных, при этом используется искусственное освещение производственных помещений.

Известно [45-47], что число часов перерывов на этих линиях составляет 70-100 часов в год. Аварийные отключения на предприятиях АПК, относящихся к первой и второй категории по надежности электроснабжения, вызывает огромные экономические убытки. Электроснабжение питает климатические установки, обеспечивающие микроклимат животных. В случае отключения могут образовываться опасные концентрации вредных газов, что потенциально может вызвать отравление животных и их гибель. Особенно чувствительны к отключениям инкубаторы.

Большое значение в сельских распределительных электрических сетях играют трансформаторные подстанции, ключевым элементом в которых является силовой трансформатор. Около 60% затрат от первоначальной стоимости, в случае аварии, составляют работы по восстановлению нормальной работы трансформаторов. Существенными факторами,



влияющими на надежность работы трансформаторов, являются условия эксплуатации, а именно, температурные режимы работы изоляции. Около 60% отказов связано с нарушением целостности электрической изоляции. [48]

Не малую роль в функционировании надежности трансформаторов оказывают параметры качества электрической энергии (КЭ). Дополнительные потери активной мощности, вызванные протеканием токов нулевой последовательности и токи высших гармоник, приводят к локальным перегревам изоляции трансформаторов. [16, 18, 41, 46, 55, 72]

Неравномерный график нагрузок снижает эффективность работы трансформаторных подстанций, загружая их в утренние и вечернее время, а дневное время трансформаторы работают практически на холостом ходу. Это приводит к излишкам реактивной мощности распределительной электрической сети.

Характерной особенностью сельских распределительных электрических сетей является: распределенность по значительной, в сравнении с производственными объектами территории и преобладание однофазной нагрузки в виде электродвигателей насосов, сварочных трансформаторов, электрических нагревательных котлов и пр. При использовании в сельской местности трансформаторов соединенных по схеме обмоток звезда – звезда с нулём»  $U/U_n-0$ , в трансформаторе образуется большое сопротивление нулевой последовательности, что в итоге приводит к несимметрии фазных напряжений на вторичной обмотке трансформатора, дополнительным потерям короткого замыкания трансформатора.

В последнее время в сельском хозяйстве находит широкое применение полупроводниковая техника [49-52], обладающая нелинейными характеристиками: частотные преобразователи, используемые для регулирования частоты вращения электрических двигателей насосных установок и технологических установок.

Особенностью является то, что полупроводниковая техника, построенная на базе импульсных источников питания, создает импульсы тока, содержащие большое количество гармоник третьего и более высокого порядков и значительные высокочастотные составляющие (Рис. 1.4).

Результатом гармонических составляющих, является возникновение вихревых токов и соответственно – потери, которые при полной нагрузке составляют около 10%. [53]

Исследования [54] проведенные с использованием 30 преобразователей частоты, подключенных к шинам РУНН-0,4 кВ КТП 10/0,4, мощностью 1600 кВА показали, что при использовании сетевых дросселей происходит увеличение нелинейных искажений тока (таблица 1.2)

Таблица 1.2 - Процентное содержание гармоник на стороне 10 и 0,4кВ [54]

Гармоники напряжения (10 кВ)	%	Гармоники тока (10 кВ)	%	Гармоники напряжения (0,4 кВ)	%	Гармоники тока (0,4 кВ)	%
5	1,3181	5	25,1048	5	6,3985	5	25,1048
7	0,5587	7	7,6033	7	2,7122	7	7,6033
11	0,5612	11	4,8616	11	2,7247	11	4,8616
13	0,4489	13	3,2905	13	2,1793	13	3,2905
17	0,2705	17	1,5166	17	1,3135	17	1,5166
19	0,2755	19	1,3817	19	1,3375	19	1,3817
23	0,2155	23	0,8931	23	1,0465	23	0,8931
25	0,1844	25	0,7028	25	0,8951	25	0,7028
29	0,187	29	0,6147	29	0,9081	29	0,6147
31	0,172	31	0,5289	31	0,8353	31	0,5289
35	0,1367	35	0,3723	35	0,6638	35	0,3723
37	0,1375	37	0,3543	37	0,6678	37	0,3543
41	0,1218	41	0,2831	41	0,5913	41	0,2831
43	0,1112	43	0,2466	43	0,5401	43	0,2466
47	0,1119	47	0,2268	47	0,543	47	0,2268
49	0,1066	49	0,2075	49	0,5179	49	0,2075
THDv	1,7643	THDi	27,0068	THDv	8,5651	THDi	27,0068

Автором исследований [56] (Таблица 1.3) проведен сравнительный анализ негативного влияние от несинусоидальности и несимметрии на работу трансформатора и сделан вывод о том, что негативное влияние от несинусоидальности проявляется в большей степени, чем от несимметрии.

Таблица 1.3 – Результаты расчета функции надежности  $R(t)$  трансформатора типа ТМ630/10 при наличии несимметрии и несинусоидальности [56]

Параметры несинусоидальности напряжения, %							Коэффициент несинусоидальности $K_{НС}$ , %
$\nu$	5	7	11	13	17	19	
$m_{U_{\nu}}$	4	3	2,5	2	1,5	1	6,2
$\sigma_{U_{\nu}}$	0,2	0,15	0,125	0,1	0,075	0,05	
Параметры несимметрии напряжений, %							
$m_{\varepsilon_2}$	2	2,5	2,75	3	3,25	3,5	
$\sigma_{\varepsilon_2}$	0,2	0,25	0,275	0,3	0,325	0,35	
Значения функции надёжности при этих параметрах несинусоидальности и несимметрии напряжений							
$R(t)$	0,938	0,834	0,724	0,559	0,347	0,145	

Большинство технологических процессов в сельском хозяйстве связано использованием электрических двигателей, установленная мощность которых составляет около 80% от суммарной нагрузки потребителей сельскохозяйственного назначения. Электродвигатель, являясь конечным звеном многих технологических процессов, оказывает существенное влияние на качество выпускаемой продукции, а вынужденная остановка и простои вызывают экономические потери. Наибольшее количество электродвигателей применяется на механизированных участках животноводческих ферм и комплексов, в технологиях первичной обработки зерна. Основная доля электродвигателей – это асинхронные двигатели с фазным ротором мощностью до 6 кВт.

Условия работы электродвигателей в сельском хозяйстве нельзя назвать легкими – запыленность, высокая влажность, резкие перепады температуры в условиях повторно-кратковременных режимов работы, низкое качество подводимого напряжения приводят к поломкам и выходам из строя. Наиболее уязвимая часть электродвигателей – обмотка статора [57-59], на долю которой приходится от 60 до 80% повреждений. Это связано с частым перегревом обмотки, ее быстрым старением и разрушением.

Отметим что, одним из факторов, влияющих на нагрев обмотки – низкое качество электрической энергии: отклонение напряжения, несимметрия и несинусоидальность напряжения. [14, 16, 55, 56]

В случае отклонения напряжения, вращающий момент асинхронного двигателя пропорционален квадрату напряжения на его выводах. Снижение напряжения приводит к изменению скорости вращения ротора двигателя. Скорость снижается, а в некоторых случаях двигатель может перейти в режим «опрокидывания», если момент сопротивления будет превышать вращающий момент двигателя. [7, 11, 59]

Пониженное напряжение приводит к перегреву изоляции обмоток двигателя. При снижении напряжения на зажимах двигателя на 1%, реактивная мощность намагничивания уменьшается на 2-3%, при этом потребляемая мощность не меняется, что вызывает увеличение тока. Согласно исследованиям [59, 61] при снижении напряжения на 10%, ток двигателя возрастает на 10% от номинальной величины.

Увеличение напряжения также негативно сказывается на надежности работы электродвигателя. Характеристики АД и допустимые значения отклонения напряжения приведены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 - Характеристика АД и допустимые значения отклонений напряжения [61]

Характеристики АД	Отклонения напряжения, %	
	-10 % ном	+10 % ном
1. Пусковой и максимальный вращающий момент	-19	+21
2. Скольжение	+23	-17
3. КПД:		
– при номинальной нагрузке	-2	+1
– 75 % от номинальной нагрузки	-2	+1
– 50 % от номинальной нагрузки	-(1-2)	(1-2)
4. Ток ротора	+14	-11
5. Ток статора	+10	-7

Согласно данным (таблица 1.4) увеличение напряжения на 10% увеличивает ток статорной обмотки на 10А, а ток в обмотках ротора на 14%, что резко снижает срок службы электродвигателей и надежность их работы. [57 - 60]

Таким образом, для повышения надежности электроснабжения сельскохозяйственных производств необходимо разрабатывать мероприятия и технологии, позволяющие поддерживать нормативный уровень напряжения.

### 1.3. Особенности управления качеством электрической энергии и регулирования напряжения в электроснабжении сельскохозяйственных потребителей

В настоящее время происходит активная модернизация сельских распределительных электрических сетей. Происходит замена изношенных воздушных линий на линии с самонесущими изолированными проводниками (СИП), в новых трансформаторных подстанциях устанавливаются более совершенные системы резервирования и защиты, устройства телемеханики. Однако, на современном этапе развития технологий этого недостаточно. Необходим переход на систему электроснабжения, которая может сама себя диагностировать и оперативно принимать решения об соответствующих отключениях и переключениях на резервные линии. То есть, назрела необходимость перехода к активно-адаптивным системам, в которых происходит непрерывный мониторинг параметров электрической энергии, в том числе, качества электрической энергии, как одного из основных индикаторов стабильности и надежности функционирования систем электроснабжения [14,16]. Пока еще недостаточно развиты технологии раннего предупреждения и прогнозирования аварийных ситуаций. Поэтому внедрение «Умных технологий» - технологий SmartGrid в сельских

распределительных электрических является актуальной научно-технической задачей. [62-70]

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 минимальных затрат на обслуживание и эксплуатации и высокой степени самодиагностики – отвечать требованиям активно-адаптивных электрических сетей.

Нужно заметить, что технология SmartGrid в сельских распределительных сетях с учетом их особенностей: архитектуры, нагрузки и их режимами, будет обладать своими отличительными свойствами. Например, в распределительных сетях 10(6)/0.4кВ при внедрении устройств автоматизации важно выстроить их оптимальное сочетание с коммутационной аппаратурой, в том числе с пунктами автоматического секционирования, которые делят линию на несколько участков, и пунктами автоматического включения резервного питания (сетевое АВР). В крупных энергосистемах установка подобных средств автоматики определяется самой схемой линии.

Важным элементом SmartGrid, являются системы мониторинга параметров качества электрической энергии. Современные технологии мониторинга КЭ позволяют не только проводить регистрацию параметров КЭ и их статистическую обработку [71-75], но и осуществлять управление режимами работы электрических сетей с учетом изменения параметров КЭ.

Необходимо учитывать, что принятие решений в области качества электрической энергии [76-93] должно опираться на экономически обоснованные критерии. То есть, целесообразно рассмотреть систему мониторинга и управления качеством электрической энергии в сельских

распределительных электрических сетях с учетом рыночных условий функционирования электроэнергетического комплекса. Для решения этой задачи необходимо исследовать всю цепочку управления с системой обратной связи от сбора информации о параметрах электрической энергии, до принятия решений по управляющим воздействиям. Условно, эту цепочку можно разделить на несколько модулей [71-73]:

1. Система сбора информации о параметрах электрической энергии;
2. Система обработки информации и прогнозирования;
3. Система управления исполнительными элементами устройств, обеспечивающих поддержание нормативных параметров качества электрической энергии;

Если принятие решений в области переключений достаточно исследована, то система сбора информации и система обработки и прогнозирования требует разработки необходимых моделей, методов и обоснованных критерий.

Система управления качеством электрической энергии должна обеспечивать надежное функционирование технологических комплексов в животноводстве и растениеводстве при минимальных затратах на ее улучшение. При этом технологию управления КЭ нужно рассматривать как комплексную задачу, состоящую из непрерывной цепочки взаимосвязанных управленческих функций.

В настоящее время отклонение напряжения в сельских электрических сетях является острой проблемой. Физический износ электрических сетей и трансформаторов составляет порядка 60-80%. Поэтому наиболее часто медленные отклонения напряжения превышают 5% (рисунок 1.1). [140]

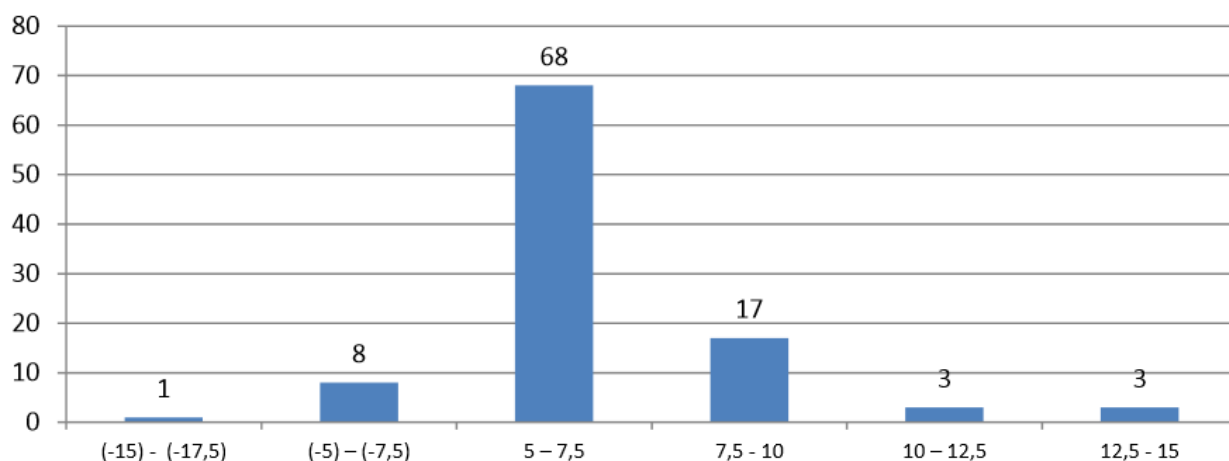


Рисунок 1.1 - Частота появления случаев установившегося отклонения напряжения

Автором работы [141] проведены исследования отклонения в сельских электрических сетях, результаты приведены в таблице 1.3

Таблица 1.3. Результаты измерений и анализа отклонения напряжения [141]

Показатель	Измеренные значения			Норма
	AB	BC	CA	
Городские электрические сети, РУ-6 кВ				
$\delta U_{(+)} , \%$	7,54	11,50	12,90	10
Сельские электрические сети, РУ-6 кВ				
$\delta U_{(+)} , \%$	12,52	13,22	13,14	10
$\delta U_{(-)} , \%$	10,51	4,33	3,97	10
Промышленное предприятие, РУ-6 кВ				
$\delta U_{(+)} , \%$	12,57	13,83	13,25	10
$\delta U_{(-)} , \%$	10,47	3,85	3,99	10

Таким образом, установлено, что уровень напряжения в сельских электрических сетях превышает норму в 1,3 раза [141]

Для поддержания нормативного уровня напряжения используют различные системы регулирования. В сельских электрических сетях наибольшее применение получили технологии переключения числа витков без возбуждения (ПВВ) и регулирование под нагрузкой (РПН). [21]

Большую часть трансформаторов в сельских электрических сетях работают с ПВВ. Это связано с более низкой стоимостью подобных



трансформаторов в сравнении с трансформаторами с РПН. Необходимо отметить, что в последнее время набирают популярность в сельских электрических сетях сухие трансформаторы с ПБВ. Однако исследования, посвященные разработкам систем управления качеством электрической энергии с использованием ПБВ практически отсутствуют.

Преимуществом РПН является возможность реализации регулирования напряжения в электрической сети без отключения трансформатора, то есть под нагрузкой. Регулирование с РПН осуществляется по заданному графику или в автоматическом режиме с помощью устройств автоматического регулирования напряжения АРНТ. Однако, при переменном графике нагрузки, вызывающем колебания напряжения, происходит частое включение блока АРНТ и соответственно РПН. Так как контакты РПН находятся под нагрузкой, то частые коммутации приводят к выходу из строя РПН. В этом случае управление РПН переводят на дистанционный или ручной режим.

В некоторых случаях, когда в электрической сети наблюдается большой уровень реактивной мощности дополнительно включают батареи статических конденсаторов (БСК). БСК позволяют компенсировать реактивную мощность и повысить уровень напряжения. В этом случае БСК работают в дополнение к РПН.

Авторами исследований [140-143] доказано, что для обеспечения точности поддержания уровня напряжения в пределах от -5 до 5% в сельских электрических сетях требуется организация систем автоматического управления устройствами РПН и БСК. Выявлено, что регулирование режима работы БСК необходимо осуществлять в согласовании с управлением РПН трансформаторов, так как переключение отпайки РПН приводит к изменению режима работы БСК. Поэтому управление этим процессом должно проводиться синхронно из единого информационного центра.

Для обеспечения требуемого качества регулирования напряжения применяют различные технологии с использованием активно-адаптивного управления, нечетких множеств и нейронных сетей.

В работе [140] автором разработан алгоритм, при котором устройство автоматического регулирования напряжения распознает величину и направление отклонения напряжения, осуществляет сравнение этих значений с заданными и на основе сравнения формировать управляющий сигнал и подавать его на исполнительное устройство.

Разработанный способ [140] предполагает установку датчиков напряжения (ДН) или приборов учета с функцией контроля напряжения (ПУ), у в точках передачи электроэнергии потребителям, а также в точке, в которой будет производится регулирование напряжения, например, на трансформаторной подстанции 10/0,4 кВ. В случае, если рассматривается регулирование напряжения в собственных сетях потребителя, то место установки датчиков напряжения выбирается индивидуально в каждом конкретном случае исходя из необходимости поддержания номинального напряжения на зажимах электроприемников. Датчики фиксируют отклонение напряжения и его уровень и передают по каналу связи данные в устройство управления, где с учетом задержки времени принимается решение о подаче команды на регулирование на исполнительное устройство, которое приводит в действие технические средства, которые непосредственно обеспечивают регулирование напряжения. В случае, если время отклонения напряжения меньше времени задержки на регулирование, то в этом случае регулирование не производится. Время задержки на регулирование задается с помощью задающего устройства (рисунок 1.2). [140]

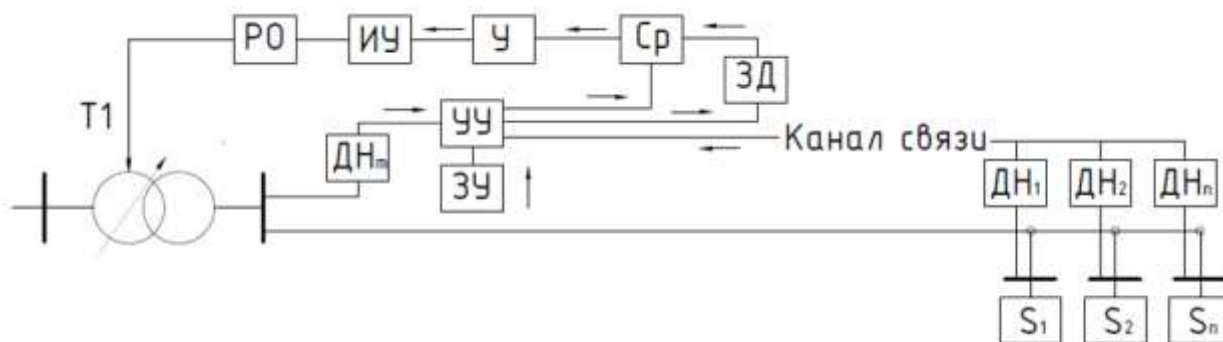


Рисунок 1.2 - Способ автоматического регулирования напряжения на электрической подстанции (или в точке группового регулирования напряжения)

Составными элементами автоматического регулирования напряжения на электрической подстанции (или в точке группового регулирования напряжения), являются:

T1- трансформатор с устройством регулирования под нагрузкой (РПН) или устройство группового регулирования напряжения; Канал связи - устройства связи и передачи данных; РО – рабочий орган; ИУ – исполняющее устройство; У – усилитель; Ср – модуль принятия решения о регулировании напряжения; ЗД – задержка времени; УУ – устройство управления; ДН<sub>т</sub> – датчик напряжения трансформатора; ДН<sub>1</sub>...ДН<sub>н</sub> – датчики напряжения в точках передачи электроэнергии потребителям (или точки присоединения электроприемников, если регулирование осуществляется в собственных сетях потребителя); ЗУ – задающее устройство; S<sub>1</sub>-S<sub>н</sub> – потребители электрической энергии.

Недостатком данной системы регулирования является отсутствие возможности прогнозирования параметров качества электрической энергии с целью выстраивания графика регулирования и уменьшения количества переключений РПН, а также система не предполагает работы с ПБВ.

В работе [141] проведены исследования по разработке технологии регулирования напряжения и разработан алгоритм функционирования тиристорного вольтодобавочного устройства (ТРВД). Входными данными являются параметры сетевого напряжения. Выходными данными являются импульсы управления тиристорами ТРВД, реализующими различные режимы работы устройства.

Недостатком данного алгоритма является отсутствие возможности контроля и управления напряжением у удаленного потребителя, так как регулирование обеспечивается в узлах электрической нагрузки.

В работе [142] рассматривается регулирование напряжения распределительной электрической сети с контролем режима прилегающего района. Автором приводится обоснование реализации мультиагентного регулирования напряжения в сети с использованием компьютерных алгоритмов косвенных измерений и искусственного интеллекта (экспертных систем) в каждом узле активного поведения.

Для обеспечения адаптивности при регулировании напряжения с контролем режима прилегающего района в структуре регулятора предусмотрена экспертная система, состоящая из трех экспертных блоков:

- Подсистемы идентификации класса режима;
- Подсистемы постановки задачи;
- Подсистемы выбора управляющего воздействия при многообразии вариантов.

База правил для экспертной системы сформирована на основе общих представлений о регулировании режима электрических сетей и энергосистем, нормативных документов, опыте моделирования и исследования систем мультиагентного регулирования. [142]

Недостатком предлагаемого решения является отсутствие возможности экспертной системы к самообучению и зависимость от выбора уровня

квалификации в исследуемой области экспертов для формирования базы правил.

Таким образом в условиях функционирования сельских электрических сетей необходима интеллектуальная система способная, в том числе, к работе с ПБВ, как наиболее распространённым устройством регулирования напряжения. Система должна обладать свойством самообучения и прогнозирования параметров качества электрической энергии и обеспечивать поддержание нормируемого уровня напряжения у самого удаленного потребителя.

Исследования по прогнозированию параметров электрической энергии появились в начале 20-го века. Большинство исследований посвящено вопросам прогнозирования электрической нагрузки. В настоящее время прогнозирование потребления электрической энергии в узлах электрической нагрузки осуществляется с учетом погодных и сезонных факторов [97-109].

При выборе подходящих математических моделей прогнозирования руководствуются следующими характеристиками:

- способ моделирования внутренних взаимосвязей между конструктивными компонентами, определяемыми при декомпозиции временных рядов на составляющие;
- способ учета влияния внешних факторов на процесс.
- способ моделирования трендовой, сезонной, недельной составляющих временного ряда;
- способ нелинейного моделирования временного ряда;
- способ моделирования случайной составляющей временного ряда;

Классические методы прогнозирования электрической нагрузки можно разделить на:

- методы статистического прогнозирования;
- методы аналитического прогнозирования;
- методы вероятностного прогнозирования.

На практике наиболее часто используют комбинацию из выше указанных методов.

Среди статистических методов распространение получили регрессионные методы. Эти методы хорошо применяются при моделировании взаимосвязанных факторов: потребления электрической энергии с температурой окружающей среды, дня недели, сезона и пр. Однако у этих методов имеются свои недостатки – это наличие нелинейных связей между взаимосвязанными факторами, что ухудшает точность прогноза.

В тех случаях, когда факторы, влияющие на результаты прогноза, имеют случайный характер, используются методы вероятностного прогнозирования с использованием фильтров Винера-Хопфа (для стационарных процессов) и Калмана (для не стационарных процессов).

Однако, наилучшими результатами прогнозирования обладают интеллектуальные методы. Особенностью этих методов является возможность точного прогнозирования при не полных и искаженных данных, они устойчивы к помехам, обладают высоким быстродействием.

Среди основных интеллектуальных методов можно выделить:

- Экспертные системы;
- Искусственные нейронные сети;
- Клетчатые автоматы.

Выстроенные экспертные модели требуют постоянного обновления вследствие изменяющихся условий и факторов, а это в свою очередь требуется проведения новых экспертных оценок, так как экспертные системы не способны к самообучению. В противоположность этому, искусственные нейронные сети способны к обучению и обобщению накопленных знаний.

Впервые использование искусственных нейронных сетей началось в 90-х годах двадцатого столетия. Их активное использование сдерживалось ограничением вычислительных мощностей. В последнее время работ посвященных применению нейронных сетей увеличилось, так в работах

[97,98] проводились исследования по прогнозированию электропотребления сельскохозяйственного предприятия с использованием нейросетевой модели путем анализа ретроспективных данных, параметров и условий производства.

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

#### 1.4. Анализ нейронных сетей для прогнозирования параметров качества электрической энергии

Проведем анализ существующих моделей нейронных сетей с целью выбора наиболее подходящей конфигурации для прогнозирования параметров качества электрической энергии.

Искусственная нейронная сеть является математической моделью, реализованной аппаратно или программно, основанной на принципе организации нейронных сетей нервных клеток, а именно на работе мозга. [112-115]

На рисунке 1.3 изображена типичная схема искусственного нейрона. Как можно видеть, нейрон имеет вход и выход, а также некоторую логическую схему внутри. Математическая модель искусственного нейрона имеет вид [114]:

$$y = f(x), x = \sum_{i=1}^n w_i x_i + w_o, \quad (1.1)$$

где  $f(x)$  – функция активации нейрона,  $W_i$  – вес входа  $i$ ,  $X_i$  – значение на входе  $i$ ,  $W_o$  – дополнительный вход (вход смещения).

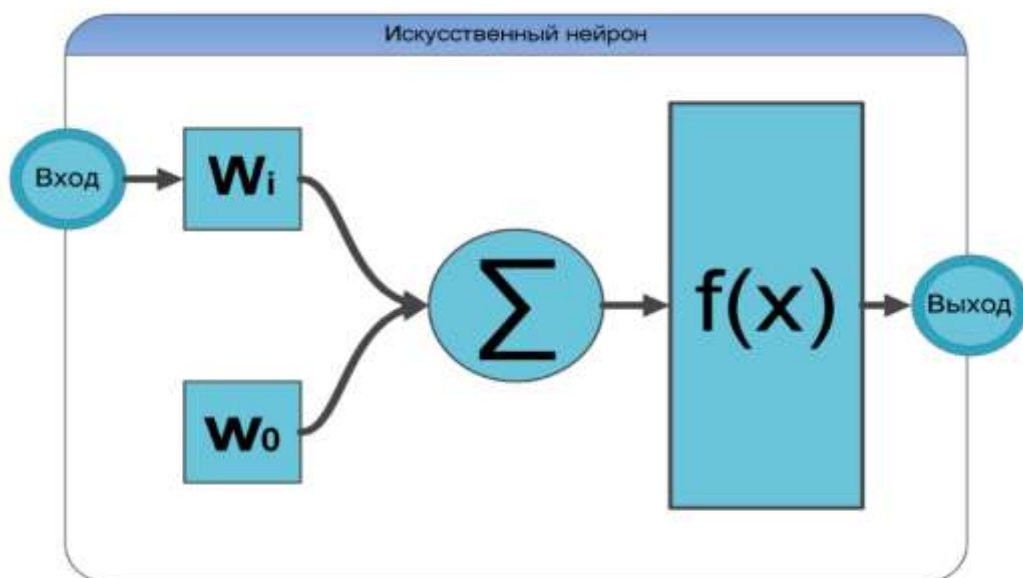


Рисунок 1.3 – Модель искусственного нейрона [112]

Принцип действия нейрона заключается во взвешенном суммировании значений со всех входов и значения смещения. Смещение необходимо для первоначальной инициализации нейрона, так же оно может использоваться для коррекции градиента в функции активации [112].

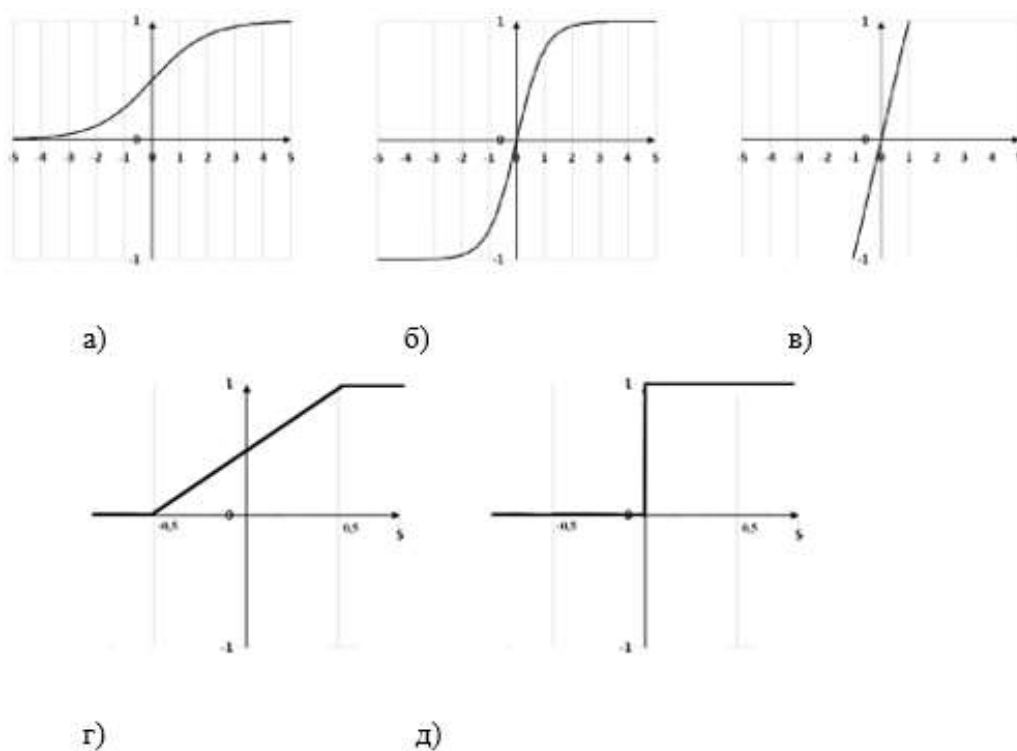
Значение на выходе нейрона определяет функция активации, работающая с полученной ранее суммой. Наиболее важным сегментом нейрона является именно функция активации, от нее зависит конечный результат, способность нейрона к нелинейной работе, инерционность значений и прочее. Стоит отметить, что выход нейрона всегда один, в то время как входов может быть множество, и зависит их число от предыдущего слоя. Допустим, если в первом слое 10 нейронов, то во втором слое все нейроны будут иметь 10 входов у каждого, и у каждого входа будет свой вес.

Продолжая тему внутренней структуры нейрона, стоит уделить внимание функциям активации. Задача функции активации – связать взвешенный сумматор и выход нейрона, причем по определенному закону. Наибольшее распространение получили функции активации изображенные на рисунке 1.5. Как видно из рисунка 1.5, функции активации можно разделить



на линейные и сигмоидальные. Линейные функции как правило имеют жестко определенный выход (кроме `purelin`), что ограничивает их применение для прогнозирования параметров качества. Сигмоидальные функции имеют весомое преимущество перед линейными – они способны усиливать слабые сигналы, но при этом не уходить в насыщение при сильном сигнале, поэтому они больше подходят для прогнозирования нелинейных характеристик качества электрической энергии.

При прогнозировании временных зависимостей нашли применения функции типа `logsig`, `tansig` и `purelin` (рисунок 1.4). Линейная функция с насыщением и ступенчатая передаточная функция находят применение в двоичных (дискретных) нейронных сетях.



а – сигмоидальная передаточная функция (`logsig`), б – гиперболический тангенс (`tansig`), в – линейная передаточная функция (`purelin`), г – линейная передаточная функция с насыщением, д – ступенчатая передаточная функция

Рисунок 1.4 – Основные виды функции активации [113]

Обучение нейронных сетей – одно из главных особенностей и преимуществ нейронных сетей, поскольку благодаря обучению можно научить НС решать нелинейные задачи и те задачи, которые не решаются аналитически. Например, задачи обучения по прогнозированию параметров качества электрической энергии на основе выборки данных за прошлые года.

Внутри модели нейронной сети обучение заключается в определении веса каждого входа каждого нейрона, а также при необходимости приоритет (вес самого нейрона). Обучение происходит в эпохах. Эпоха – проход обучающей выборки от входа нейронной сети до выхода один раз. В ходе обучения нейронная сеть способна выявлять сложные зависимости между входными и выходными данными (как главное ее предназначение), а также выполнять обобщение. Другими словами, при успешном обучении на выходе нейронной сети будет результат прогнозирования на основе обобщенной информации.

#### *Типы нейронных сетей*

Нейронные сети можно классифицировать по нескольким параметрам. Один из распространенных параметров – обучение с учителем или без. Обучение без учителя подразумевает отсутствие контрольной выборки в процессе обучения нейронной сети. С одной стороны, это недостаток, поскольку точность может оказаться ниже, чем у способа обучения с учителем, будет требоваться больше времени для нейронных сетей, работающих не одну эпоху. С другой стороны, не нужно создавать контрольную выборку (возможен вариант, когда ее просто нет), а также такой тип обучения более устойчив к резким изменениям входных параметров, такими параметрами в нашей задаче регулирования напряжения могут быть, например: потребляемая мощность, отклонение напряжения. Другой параметр – число слоев. Третьим параметром классификации будет вид передаточных функций, а четвертый – направление распространения сигнала.

### Нейронная сеть Хопфилда

Если классифицировать эту сеть (рисунок 1.5), то это НС с обучением без учителя, с одним скрытым слоем, с линейной функцией активации (с насыщением), с обоюдным направлением распространения.

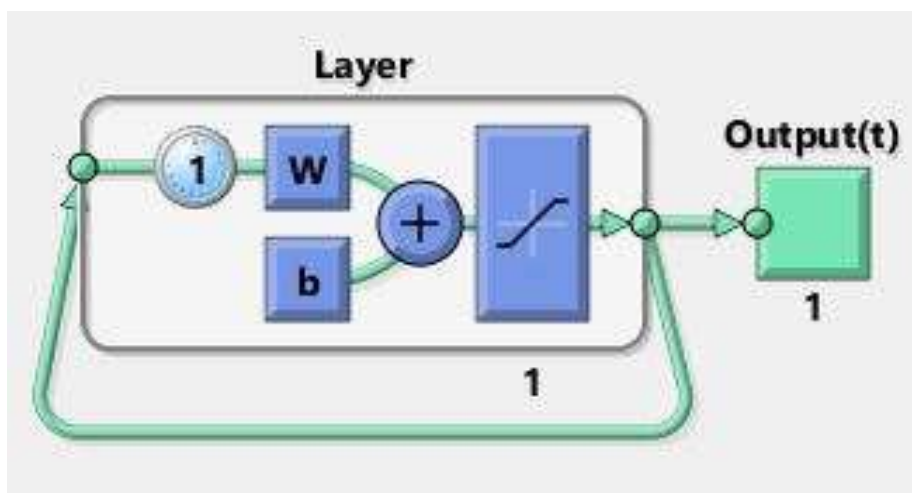


Рисунок 1.5 – Нейронная сеть Хопфилда [114]

Нейронная сеть Хопфилда – НС с матрицей связи. Сама НС охвачена обратной связью. Суть подобной связи заключается в наличии внутри нейронов единственного слоя (данный тип НС строго однослойный) системы эталонных образов, за каждую итерацию прохода данных через слой любая искаженная выборка данных будет приведена к одному из установленных образов сети. Так же эти образы называют положениями равновесия, работа обратной связи будет продолжаться до полного приведения выборки к идеальному образу (к положению равновесия), в отличие от многих других нейронных сетей, которые работают по конечному числу эпох [38,39].

Такая НС подходит для решения задач распознавания образов, может работать как фильтр или как автоассоциативная память..

## Однослойный перцептрон

Однослойный перцептрон (рисунок 1.6), является НС с обучением без учителя, с одним скрытым слоем, с линейной функцией активацией (ступенчатая), с прямым распространением сигнала.

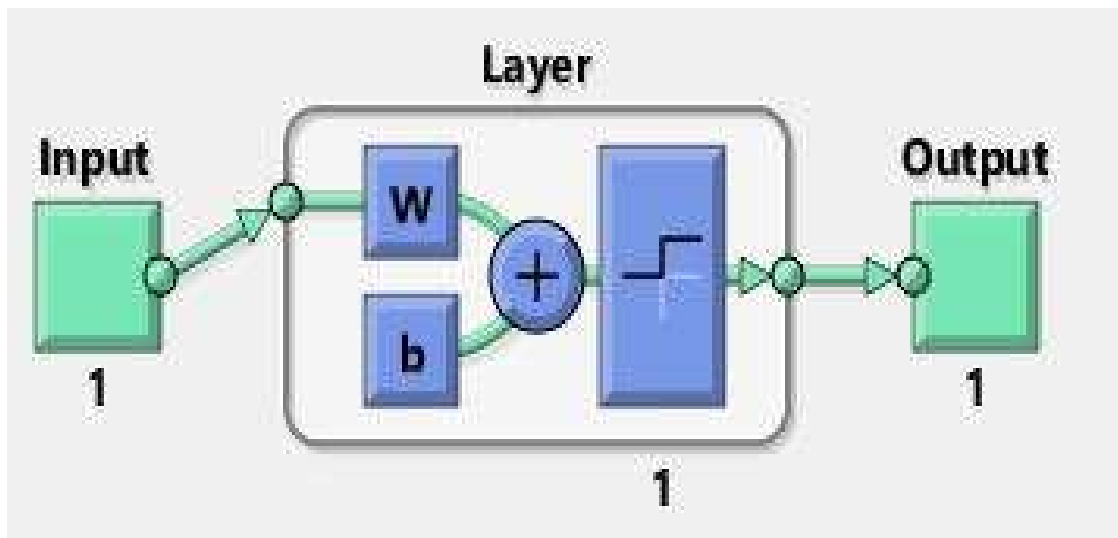


Рисунок 1.6 – Реализация однослойного перцептрона в среде MATLAB [112]

Перцептрон является одним из первых типов нейросетей, а также был реализован в первом в мире нейрокомпьютере “Марк 1”. Перцептрон состоит из трёх типов элементов (рисунок 1.7):

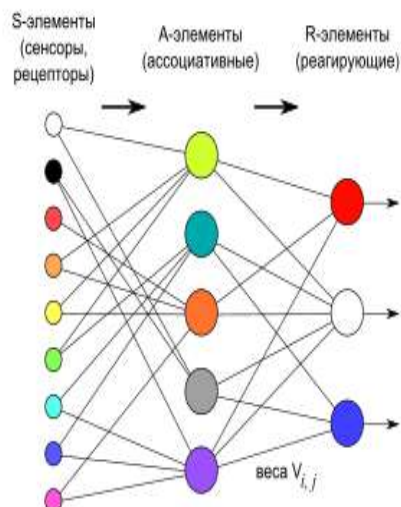


Рисунок 1.7 — Принцип работы перцептрона [114]

Поступающие от датчиков сигналы (рис. 1.7) передаются ассоциативным элементам, а затем реагирующим элементам. Таким образом, перцептроны позволяют создать набор ассоциаций между входными стимулами и необходимой реакцией на выходе [38,39].

Реализация однослойного перцептрона в среде MATLAB достаточно узконаправленна и в основном используется для распознавания образов, ступенчатая функция активации говорит о невозможности работы с аналоговыми сигналами. Поэтому данный тип нейронных сетей для прогнозирования ПКЭ не подходит.

### *Самоорганизующиеся карты Кохонена*

Самоорганизующиеся карты Кохонена – НС с обучением без учителя, с одним скрытым слоем, с нетипичной функцией активации (двухмерные геометрические фигуры), с прямым распространением сигнала.

Нейронная сеть Кохонена, а именно ее подвид в виде самоорганизующихся карт Кохонена – уникальный тип нейронной сети. Такая нейронная сеть работает на «карте», на которой представлены узлы системы. Каждый узел описывается двумя векторами – вектором веса и вектором координат. Визуально «карта» отображается в виде ячеек прямоугольной или шестиугольной формы, обычно в виде последней, поскольку расстояния между смежными ячейками одинаковы, что повышает точность визуализации [38,39].

Самоорганизующиеся карты Кохонена имеют большое число применений, но чаще всего используются для проецирования многомерных пространств в двумерное, моделирования, упорядочивания, поиска закономерностей в массивах данных.

*Сети с прямым распространением сигнала и обратным распространением ошибки (feed forward back propagation)*

Другое название таких сетей – многослойный перцептрон. На рисунке 1.8 представлена модель двуслойного перцептрона с  $m$  числом нейронов в единственном скрытом слое и  $n$  числом нейронов в выходном слое.

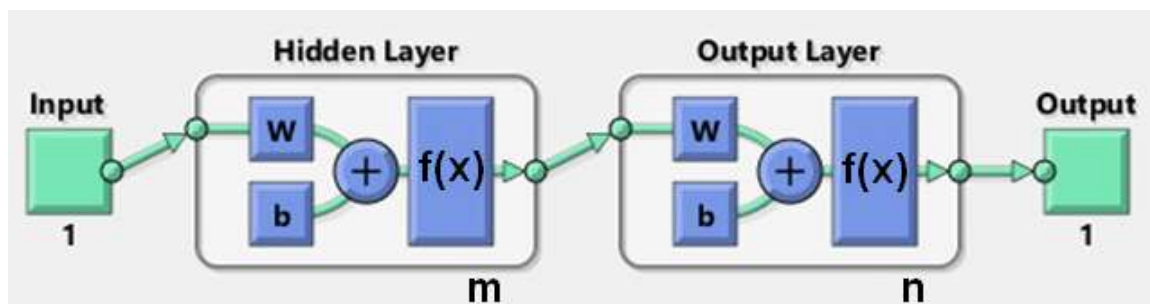


Рисунок 1.8 – Реализация многослойного перцептрона в среде MATLAB

Размерность входа и выхода равняется размерности используемой матрицы для обучения, в данном случае данные представлены в виде вектора, поэтому размерность входа и выхода равна единице. Пакет MATLABNNTool позволяет выбрать для данной модели функции активации в каждом слое, число нейронов в слоях, некоторые параметры обучения.

Отличия от представленного ранее однослойного перцептрона заключается в том, что, во-первых, отличный от однослойного перцептрона алгоритм работы позволяет игнорировать ограничения последнего, а во-вторых, имеется возможность настройки количества нейронов в скрытом слое и выбор функций активации обоих слоев системы. Число нейронов выходного слоя выбирается автоматически, как и размерность выхода системы. Многослойный перцептрон обладает универсальностью его применения. Благодаря тонкой настройке, имеется возможность разработать нейронную сеть для задач прогнозирования временных функций параметров качества

электрической энергии с резкоизменяющимися параметрами и дающий высокую точность прогнозирования.

Анализ авторов [112-116] проведенных исследований по использованию рекуррентных сетей показал их большую эффективность в аппроксимации значений прогнозируемых величин. Так, рекуррентная модель сети Элмана, позволяет решать задачу построения прогнозных моделей с учётом воздействия на модель прогнозирования внешних дестабилизирующих факторов. Как пример, в качестве передаточной функции в скрытом слое выступает сигмоидальная функция, а в выходном слое – линейная. Данная модель сети использует линии задержки с отводами для хранения предыдущих значений. Фиксированные обратные связи сохраняют предыдущие значения скрытого слоя в контекстных блоках (до того, как скрытый слой поменяет значение в процессе обучения). Таким способом сеть сохраняет своё состояние, что может использоваться в предсказании последовательностей, выходя за пределы мощности многослойного перцептрона.

Для прогнозирования параметров отклонения напряжения необходимо учитывать особенности электроснабжения сельскохозяйственных потребителей, а именно, графики электрических нагрузок и их влияние на отклонение напряжения. Поэтому разработка структуры нейросетевого регулирования напряжения требует проведения дополнительных исследований.

### 1.5. Постановка задачи диссертационной работы

В настоящее время остро стоит вопрос внедрения цифровых технологий Smart Grid в электротехнический комплекс. Цифровые технологии позволят повысить качество электрической энергии и надежность обеспечения электрической энергией сельскохозяйственных потребителей.

Все большую популярность получают технологии с применением искусственных нейронных сетей, способных к накоплению знаний и самообучению. Однако, режимы работы сельскохозяйственных потребителей и особенности архитектуры сельских электрических сетей требуют проведения дополнительных исследований при разработке и внедрении подобных систем.

Учитывая вышеизложенное, в диссертационной работе поставлены следующие задачи исследований:

1. Разработать имитационную модель сельской электрической сети 10/0,4 кВ и выполнить теоретические исследования режимов ее работы;
2. Разработать конфигурацию нейронной сети для прогнозирования отклонения напряжения в электроснабжении сельскохозяйственных потребителей;
3. Разработать структуру системы нейросетевого регулирования напряжения для электроснабжения сельскохозяйственных потребителей;
4. Разработать математическую модель прогнозирования коэффициента искажения синусоидальности от изменения потребляемой активной мощности источников света;
5. Провести экспериментальные исследования нейросетевого регулирования напряжения в системах электроснабжения сельскохозяйственных потребителей;
6. Провести технико-экономическое обоснование системы нейросетевого регулирования напряжения в электроснабжении сельских потребителей.



## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

### 2.1. Разработка имитационной модели сельской электрической сети

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» позволяющие проводить сложные расчеты и осуществлять имитационное моделирование.

Под термином «Цифровой двойник» понимают реальное отображение всех компонентов в жизненном цикле объекта с использованием физических данных, виртуальных данных и данных взаимодействия между ними [143]. 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.

Применение в SimPowerSystems блоков-схем электрических моделей распределительных сетей, трансформаторов и нагрузки, позволяет проводить сложные вычисления дифференциальных уравнений и в динамике рассматривать происходящие процессы.

Для реализации вычислений с вероятностным характером нагрузки возможно использовать дополнительные пакеты программ MATLAB, которые позволяют проводить расчеты по прогнозированию с использованием новейших алгоритмов и методов нейронных сетей.

Имитационные модели сельских электрических сетей позволяют проводить теоретические исследования близкие к практическому эксперименту [71, 110, 111]:

- 1) осуществлять планирование экспериментов;
- 2) реализовать эксперимента;
- 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.

Особенностью сельских электрических сетей является большая протяженность и рассредоточенность нагрузки различного характера: бытовая однофазная нагрузка, а также производственные нагрузки не больших фермерских хозяйств и крупных агропромышленных комплексов.

Несимметрия фазных токов и напряжений является характерной для сельских распределительных электрических сетей (РЭС) вследствие преобладания однофазной нагрузки, что оказывает влияние на отклонение напряжения у сельскохозяйственных потребителей.

Использование в расчетах метода симметричных составляющих позволяет наиболее точно вычислять потери мощности и энергии при несимметричных режимах работы РЭС.

На рисунке 2.1 изображена линия с равномерно распределенными по фазам однофазными сельскохозяйственными потребителями различной мощности. При этом однофазные приемники соединены по схеме «звезда». [110,111]

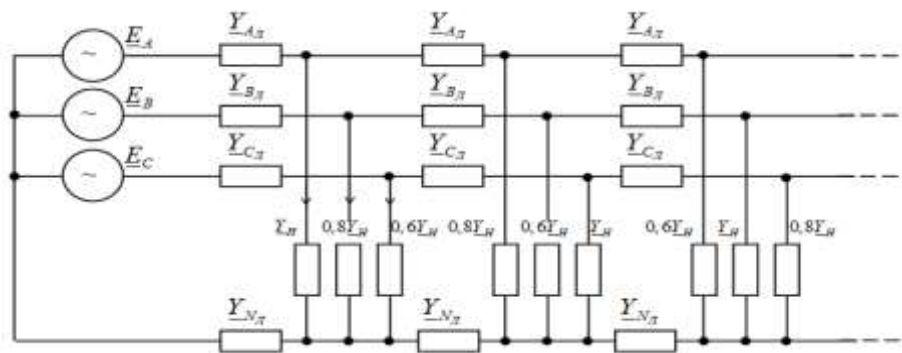


Рисунок 2.1 – Линия с равномерно распределенными по фазам однофазными сельскохозяйственными потребителями различной мощности

Особенностью метода симметричных составляющих является то, что несимметричный трёхфазный приемник можно заменить трехфазным приемником и двумя разными по мощности однофазными потребителями. Такая схема эквивалентна, если соблюдается равенство тактов и напряжений на входных зажимах электроприемников [110].

На основании вышеизложенного выражения для фазных токов будут иметь следующий вид [110]:

$$\underline{I}_A = \underline{U}_A \underline{Y}_{HA}, \quad \underline{I}_B = \underline{U}_B \underline{Y}_{HB}, \quad \underline{I}_C = \underline{U}_C \underline{Y}_{HC} \quad (2.1)$$

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:

$$K_p = \frac{\Delta P_n}{\Delta P_1} = 1 + K_{2i}^2 + K_{0i}^2 \frac{R_0}{R_1} \quad (2.2)$$

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:

$$\left. \begin{aligned} \underline{\delta}_A &= \frac{\Delta U_A}{\Delta U_1} = 1 + \underline{K}_{2i} + \underline{K}_{0i} \underline{K}_Z; \\ \underline{\delta}_B &= \frac{\Delta U_B}{\Delta U_1} = \underline{a}^2 + \underline{a} \underline{K}_{2i} + \underline{K}_{0i} \underline{K}_Z; \\ \underline{\delta}_C &= \frac{\Delta U_C}{\Delta U_1} = \underline{a} + \underline{a}^2 \underline{K}_{2i} + \underline{K}_{0i} \underline{K}_Z, \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

где  $\underline{\Delta U}_A, \underline{\Delta U}_B, \underline{\Delta U}_C$  – комплексы фазных потерь напряжения на участке сети;

$\underline{\Delta U}_1$  – комплекс фазной потери напряжения прямой последовательности на участке сети;

$\underline{K}_{2i}, \underline{K}_{0i}$  – комплексные коэффициенты обратной и нулевой последовательности токов:  $\underline{K}_{2i} = \frac{I_2}{I_1}; \underline{K}_{0i} = \frac{I_0}{I_1}$ ;

$\underline{I}_1, \underline{I}_2, \underline{I}_0$  – комплексы токов прямой, обратной и нулевой последовательностей;

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

Однако, метод симметричных составляющих имеет недостаток в точности вычислений при усложнении схемы распределительной сети и появлении большого количества однофазной нагрузки, создающей значительную несимметрию.

Имитационная модель в MATLAB SimPowerSystems на примере сельской электрической сети 10/0,4 кВ села Покрово-Пригородное Тамбовской области представлена на рисунке 2.3.

При этом каждый участок сети имеет отдельный модуль со своими характеристиками схемы замещения линии электропередач и нагрузки сельскохозяйственных потребителей (рисунок 2.4 и 2.5).

Для составления виртуальной модели трансформатора в MATLAB SimPowerSystems использованы характеристики трансформатора (Приложение Д).

Выполним расчет схемы замещения трансформатора, параметры обмоток трансформатора.

*Для режима холостого хода:*

Тогда, полное сопротивление намагничивания цепи:

$$Z_0 = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3} \cdot I_0} = \frac{3000}{\sqrt{3} \cdot 0,34} = 5102,04(Ом)$$

В этом случае активное сопротивление будет иметь следующее значение:

$$R_0 = \frac{P_0}{3 \cdot I_0^2} = \frac{220}{3 \cdot 0,34^2} = 636,31(Ом)$$

В итоге индуктивное сопротивление:

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} = \sqrt{5102,04^2 - 636,31^2} = 5062,21(Ом)$$

$$Z_m = Z_0 - Z_1 = 5102,04 \cdot e^{j82,84} - 4,64e^{j72,08} = 5097,48e^{j82,85}$$

$$E_1 = I_0 \cdot Z_m = 0,34e^{j7,16} \cdot 5097,48e^{j82,85} = 1730,50e^{j90,0}$$

$$U_1 = -E_1 + I_0 \cdot Z_1 = 1730,50e^{j90,0} + 0,34e^{j7,16} \cdot 4,64e^{j72,08}$$

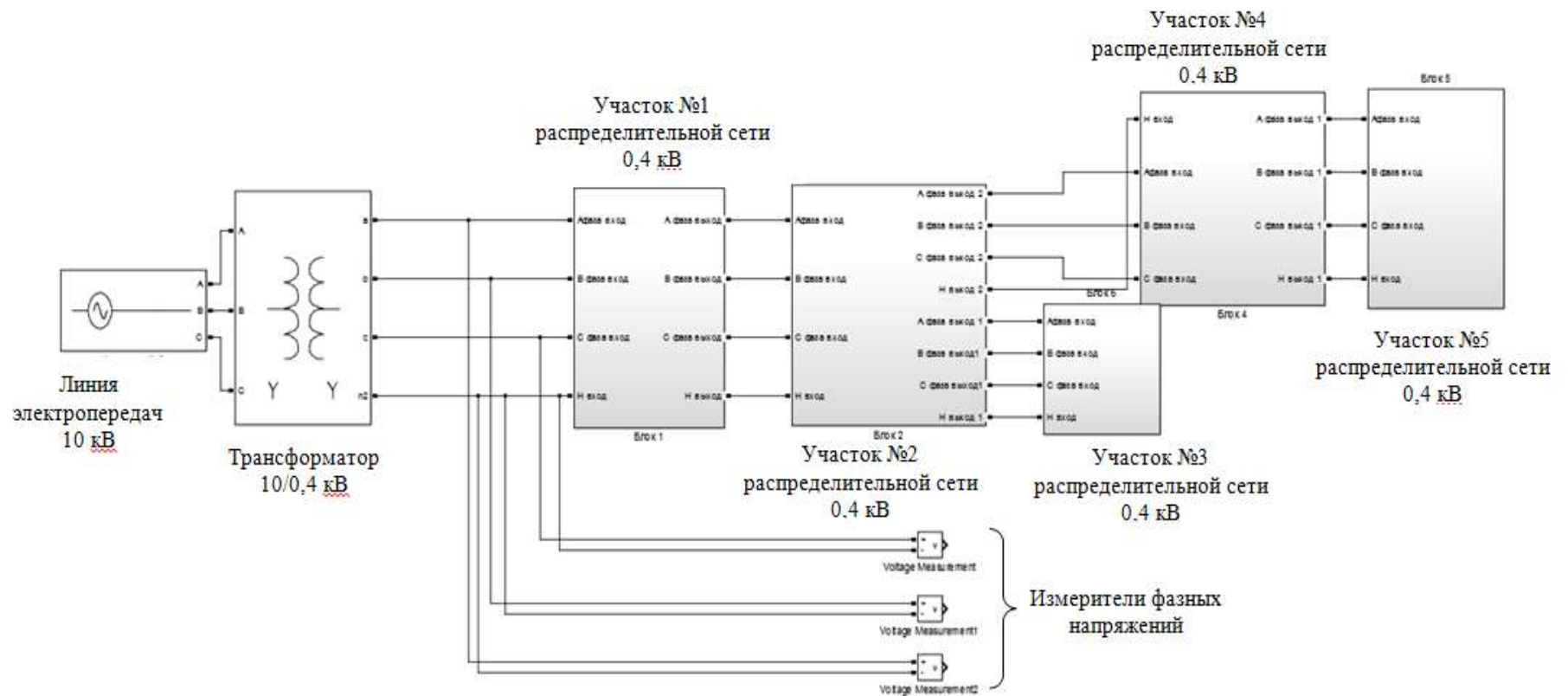


Рисунок 2.3 – Имитационная модель участка сельской электрической сети 10/0,4 кВ (село Покрово-Пригородное, Тамбовская обл.)

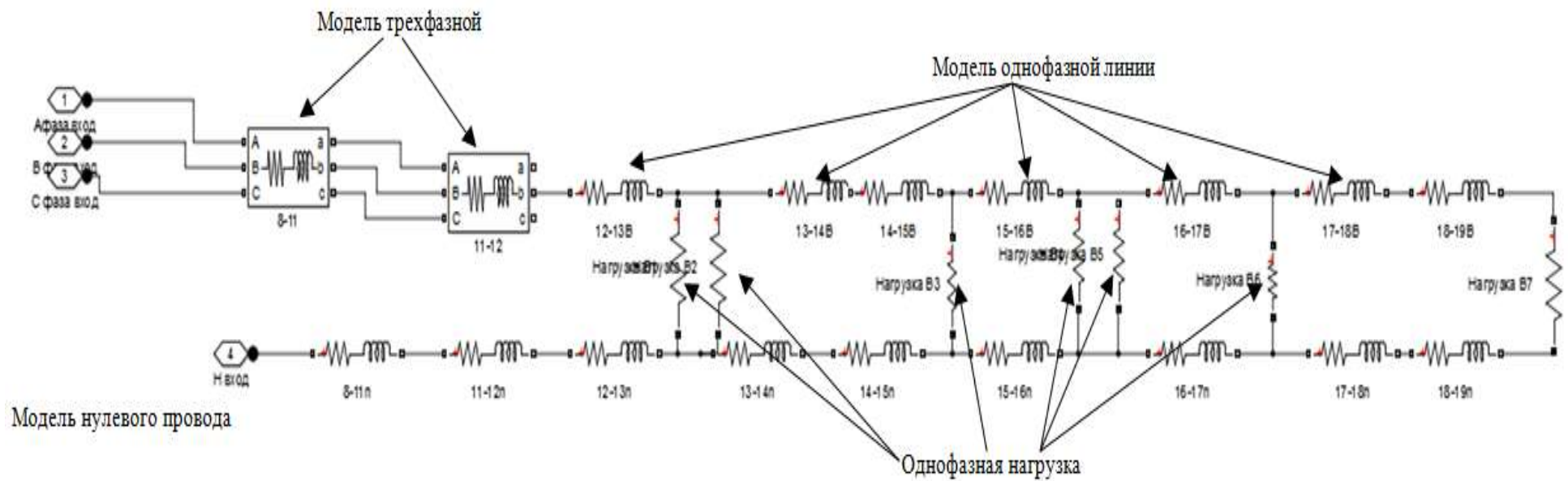


Рисунок 2.4 – Имитационная модель (модуль) участка сельской электрической сети 10/0,4 кВ с однофазной бытовой нагрузкой

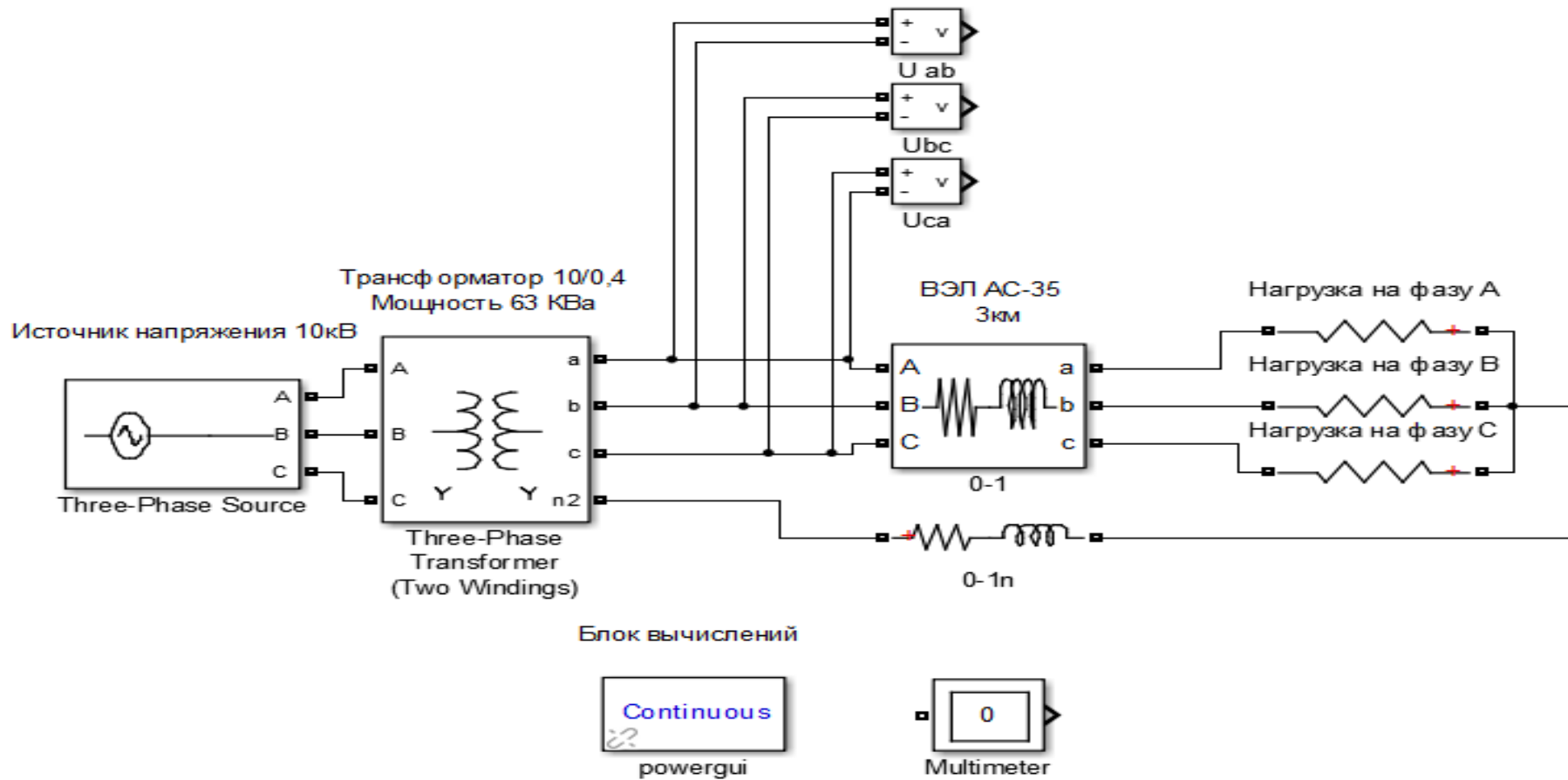


Рисунок 2.5 – Имитационная модель (модуль) сельской электрической сети 0,4 кВ с несимметричной нагрузкой



Для режима короткого замыкания:

Найдем фазное напряжение короткого замыкания:

$$U_{K\phi} = U_{\phi 1} \cdot U_{к,\%} = 1,73 \cdot 0,065 \cdot 10^3 = 112,58(B)$$

Тогда, полное сопротивление короткого замыкания, где  $I_{1к} = I_{ном}$ :

$$Z_K = \frac{U_{K\phi}}{I_{1к}} = \frac{112,58}{12,12} = 9,29(Ом)$$

Соответственное активное сопротивление короткого замыкания будет иметь следующее значение:

$$R_K = r_1 + r_2' = \frac{P_K}{3 \cdot I_K^2} = \frac{1260}{3 \cdot 12,12^2} = 2,86(Ом)$$

Определим сопротивление короткого замыкания:

$$X_K = x_1 + x_2' = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2} = \sqrt{9,29^2 - 2,86^2} = 8,84(Ом) \quad r_1 \approx r_2' = \frac{1}{2} \cdot r_K, \quad x_1 \approx x_2' = \frac{1}{2} \cdot x_K$$

где:

$x_1$  – индуктивное сопротивление первичной обмотки трансформатора,

обусловленное магнитным потоком рассеяния  $\Phi_{1\sigma}$ ;

$x_2'$  – приведенное индуктивное сопротивление вторичной обмотки

трансформатора, обусловленное магнитным потоком рассеяния  $\Phi_{2\sigma}$ .

$r_1$  – активное сопротивление первичной обмотки трансформатора;

$r_2'$  – приведенное активное сопротивление вторичной обмотки трансформатора;

$$r_1 \approx r_2' = \frac{2,86}{2} = 1,43(Ом) \quad x_1 \approx x_2' = \frac{8,84}{2} = 4,42(Ом)$$

Рассчитаем коэффициент трансформации:

$$k = \frac{U_{\phi 1}}{U_{\phi 2}} = \frac{1,73}{0,4} = 4,35$$

Для реального трансформатора сопротивление обмоток будут иметь следующие значения:

$$r_2 = \frac{r_2'}{k^2} = \frac{1,43}{4,35^2} = 0,08(Ом) \quad x_2 = \frac{x_2'}{k^2} = \frac{4,42}{4,35^2} = 0,23(Ом)$$

Выполним имитационное моделирование распределительной электрической сети с воздушной линией электропередач (ВЛ) протяженностью 3 км и марки провода АС-35. Активную нагрузку в фазе А будем изменять в пределах от 0,5 до 7 кВт.

Результаты имитационного моделирования представлены в таблице 2.1, и на рисунках 2.6 - 2.8

Таблица 2.1 –Данные результатов имитационного моделирования сельской электрической сети 0,4 кВ с несимметричной нагрузкой

Мощность нагрузки в фазе А, Вт	Токнейтральном проводе, А	Коэффициент несимметрии напряжения по нулевой последовательности, %
500	0,43	4,3
1000	0,78	10,12
1500	1,08	15,165
2000	1,34	19,22
2500	1,57	23,2
3000	1,77	27
3500	1,94	31
4000	2,09	34,3
4500	2,23	36,9
5000	2,36	39,7
5500	2,47	41,4
6000	2,57	43,2
6500	2,66	45,8
7000	2,75	47,2

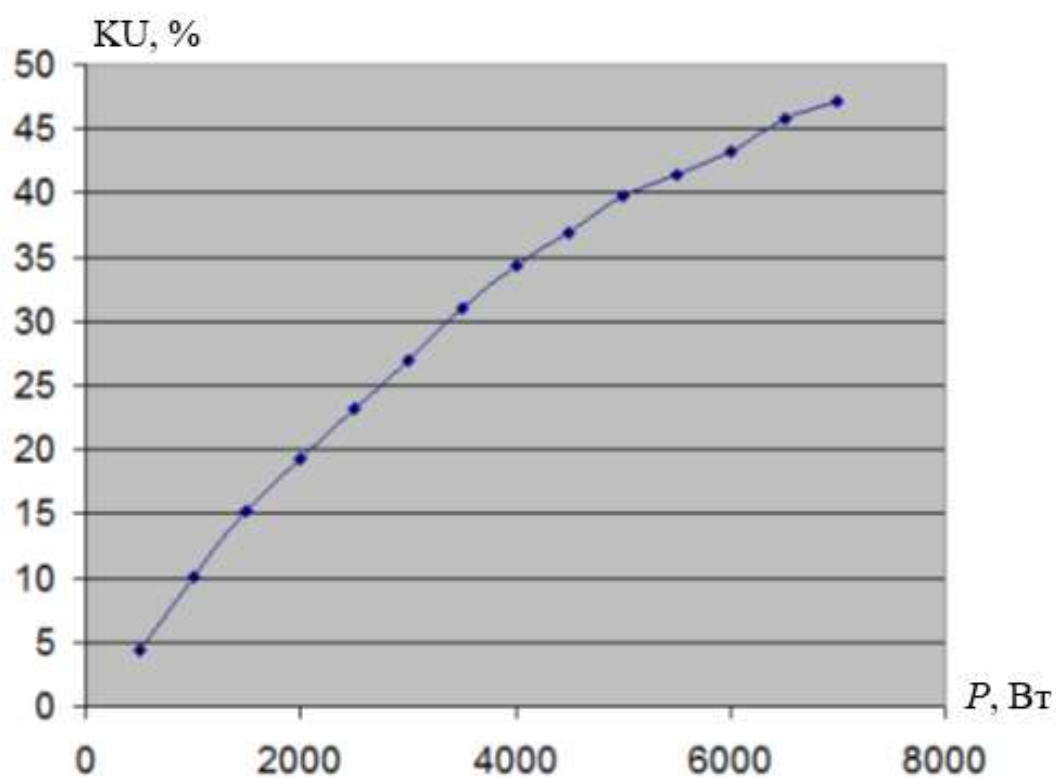


Рисунок 2.6. – Характеристика коэффициента несимметрии напряжения по нулевой последовательности от изменения мощности однофазной нагрузки

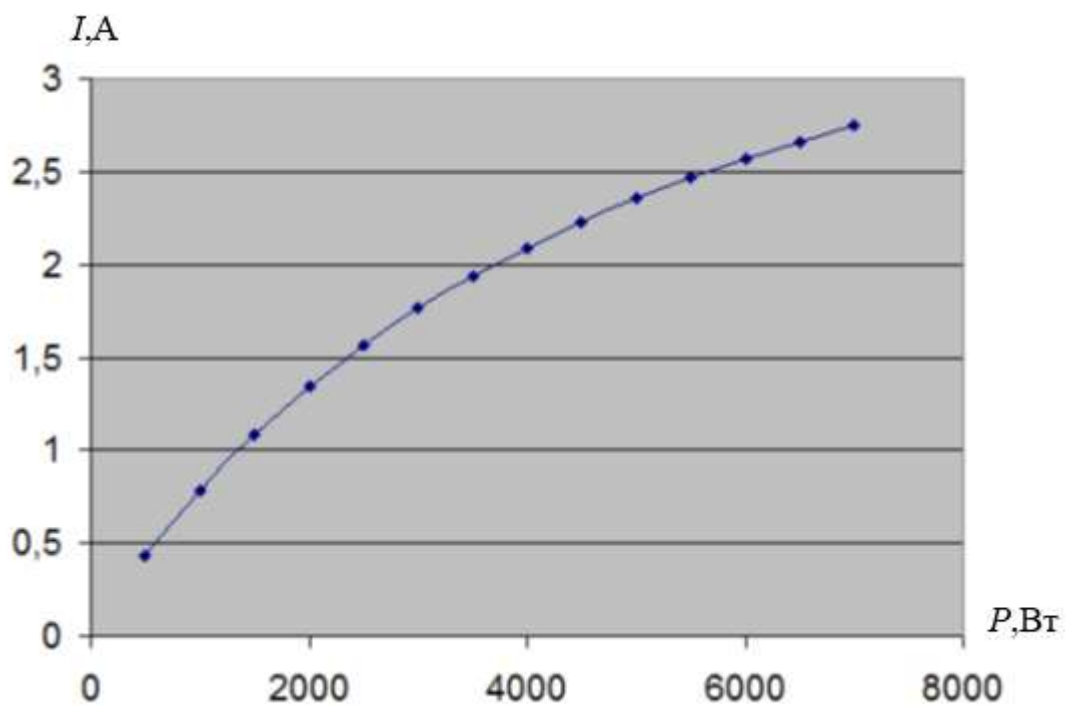


Рисунок 2.7 – Характеристика тока в нулевом проводе в зависимости от мощности однофазной нагрузки

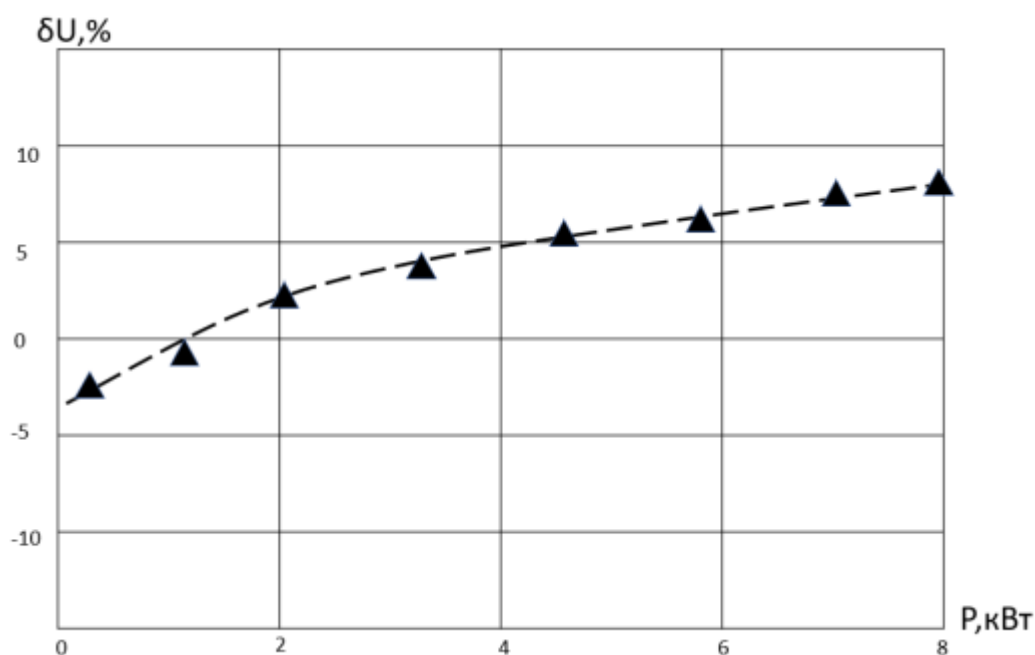


Рисунок 2.8 - Зависимость отклонения напряжения от мощности нагрузки электрической сети

В результате полученных данных (рисунок 2.7) 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, коэффициент несимметрии (рисунок 2.6) по нулевой последовательности изменяется от 4 до 47%, отклонение напряжения (рисунок 2.8) 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.

Полученные данные разработанной имитационной модели сельской электрической сети села Покрово-Пригородное 10/0,4 кВ требуют экспериментального подтверждения, для оценки адекватности модели.

Имитационная модель может быть встроена как «Цифровой двойник» в систему управления качеством электрической энергии с целью повышения точности поддержания параметров электрической сети и соответствия их нормативным требованиям.

## 2.2. Обоснование конфигурации нейронной сети для прогнозирования отклонения напряжения в сельских электрических сетях

В первой главе были рассмотрены существующие методы прогнозирования, такие как математические, стохастические и так далее. В данный момент наиболее перспективными являются методы с использованием искусственных нейронных сетей, поскольку они обладают возможностью обучаться – подстраиваться под изменение зависимостей внутри входных данных. Это обуславливает высокую точность как в краткосрочном, так и в долгосрочном прогнозированиях. Анализ искусственных нейронных сетей [112-116] показал, что самыми перспективными для прогнозирования могут быть сети с прямым распространением сигнала и обратным распространением ошибки (feedforward backpropagation) - многослойный перцептрон.

Для доказательства этого утверждения проведем исследования по прогнозированию показателя качества электрической энергии - отклонения напряжения (медленные изменения напряжения).

Описание алгоритма работы системы с обратным распространением ошибки имеет следующий вид [114]:

1. Инициализация весов нейронов  $\{w_{ij}\}_{ij}$  маленькими случайными значениями,  $\{\Delta w_{ij}\}_{ij} = 0$ ;
2. Повторить NUMBER\_OF\_STEPS раз:  
Для всех  $d$  от 1 до  $m$ :
  1. Подать  $\{x_i^d\}$  на вход сети и подсчитать выходы  $o_i$  каждого узла;
  2. Для всех  $k \in \mathbf{Outputs}$

$$\delta_k = o_k(1 - o_k)(tt_k - o_k);$$

3. Для каждого уровня  $i$ , начиная с предпоследнего:

Для каждого узла  $j$  уровня вычислить

$$\delta_j = o_j(1 - o_j) \sum_{k \in \text{Children}(j)} \delta_k w_{j,k};$$

4. Для каждого ребра сети  $\{i,j\}$ :

$$\Delta w_{ij}(n) = \alpha w_{ij}(n-1) + (1 - \alpha) \eta \delta_j o_u;$$

$$w_{ij}(n) = w_{ij}(n-1) + \Delta w_{ij}(n);$$

Выдать значения  $w_{ij}$ .

В приведенном алгоритме  $\alpha$  – коэффициент инерциальности для сглаживания резких скачков при перемещении по поверхности целевой функции (функции активации).

Существует два режима реализации метода обратного распространения ошибки: стохастического (stochastic) градиентного спуска и пакетного (batch) градиентного спуска. Для пакетного градиентного спуска функция потерь вычисляется для всех образцов, вместе взятых после окончания эпохи, и потом вводятся поправки весовых коэффициентов нейрона в соответствии с методом обратного распространения ошибки. Стохастический метод немедленно после вычисления выхода сети на одном образце вводит поправки в весовые коэффициенты.

Пакетный метод более быстрый и стабильный, но он имеет тенденцию останавливаться и застревать в локальных минимумах. Поэтому для выхода из локальных минимумов нужно использовать особые приёмы, например, алгоритм имитации отжига [115].

Стохастический метод медленнее, но от того, что он не осуществляет точного градиентного спуска, а вносит "шумы", используя недовычисленный градиент, он способен выходить из локальных минимумов и может привести к лучшему результату.

В виде компромисса в среде MATLABNNTool будем применять мини-пакеты, когда поправка искомым весов осуществляется после обработки

нескольких образцов (мини-пакета), то есть, реже чем при стохастическом спуске, но чаще чем при пакетном.

В процессе обучения сети значения весов могут в результате коррекции стать очень большими величинами. Это может привести к тому, что все или большинство нейронов будут функционировать при очень больших значениях OUT, в области, где производная сжимающей функции очень мала. Так как посылаемая обратно в процессе обучения ошибка пропорциональна этой производной, то процесс обучения может практически замереть. В теоретическом отношении эта проблема плохо изучена. Обычно этого избегают уменьшением размера шага  $\eta$ , но это увеличивает время обучения. Различные эвристики использовались для предохранения от паралича или для восстановления после него, но пока что они могут рассматриваться лишь как экспериментальные.

Обратное распространение использует разновидность градиентного спуска, то есть осуществляет спуск вниз по поверхности ошибки, непрерывно подстраивая веса в направлении к минимуму. Поверхность ошибки сложной сети сильно изрезана и состоит из холмов, долин, складок и оврагов в пространстве высокой размерности. Сеть может попасть в локальный минимум (неглубокую долину), когда рядом имеется гораздо более глубокий минимум. В точке локального минимума все направления ведут вверх, и сеть неспособна из него выбраться. Основную трудность при обучении нейронных сетей составляют как раз методы выхода из локальных минимумов: каждый раз выходя из локального минимума снова ищется следующий локальный минимум тем же методом обратного распространения ошибки до тех пор, пока найти из него выход уже не удаётся.

Внимательный разбор доказательства сходимости показывает, что коррекции весов предполагаются бесконечно малыми. Ясно, что это неосуществимо на практике, так как ведёт к бесконечному времени обучения. Размер шага должен браться конечным. Если размер шага фиксирован и очень

мал, то сходимость слишком медленная, если же он фиксирован и слишком велик, то может возникнуть паралич или постоянная неустойчивость. Эффективно увеличивать шаг до тех пор, пока не прекратится улучшение оценки в данном направлении антиградиента и уменьшать, если такого улучшения не происходит. В книге [116] предложена разветвлённая технология оптимизации обучения. Следует также отметить возможность переобучения сети, что является скорее результатом ошибочного проектирования её топологии. При слишком большом количестве нейронов теряется свойство сети обобщать информацию. Весь набор образов, предоставленных к обучению, будет выучен сетью, но любые другие образы, даже очень похожие, могут быть классифицированы неверно.

Стоит отметить, что в процессе исследования единственной проблемой, обнаруженной в этом алгоритме, была в некоторых случаях неправильная инициализация весов нейронов, но она была сразу заметна, и подобные нейронные сети отсекались от исследования.

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

В исследуемой модели число нейронов в слое  $m$  было принято 10, в слое  $n$  число нейронов выбирается пакетом NNTool автоматически и зависит от числа нейронов в предыдущем слое и количестве данных в обучающей выборке.

Теперь, когда выбрано число слоев и число нейронов в слоях можно выбрать функцию активации как элемента, напрямую влияющего на инерционность НС, точность и стабильность, для каждого слоя нейронной



сети. Для прогнозирования используется нейронная сеть в виде многослойного перцептрона, работающего по алгоритму backpropagation.

Ошибка прогнозирования определяется с помощью MAPE – средней абсолютной ошибки прогноза [114]:

$$\text{MAPE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Y_t - \hat{Y}_t|}{Y_t}, \quad (2.4)$$

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

Наиболее важным для работы нейронной сети является выбор такого набора функций активаций в слоях нейронов, чтобы обеспечивалась наибольшая точность при обучении одними и теми же выборками данных. Для исследования использовались следующие функции активации: сигмоидальная передаточная функция (logsig), гиперболический тангенс (tansig), линейная передаточная функция (purelin).

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

Характеристика измерений отклонений напряжения в течение 24 часов представлена на рисунке 2.9.

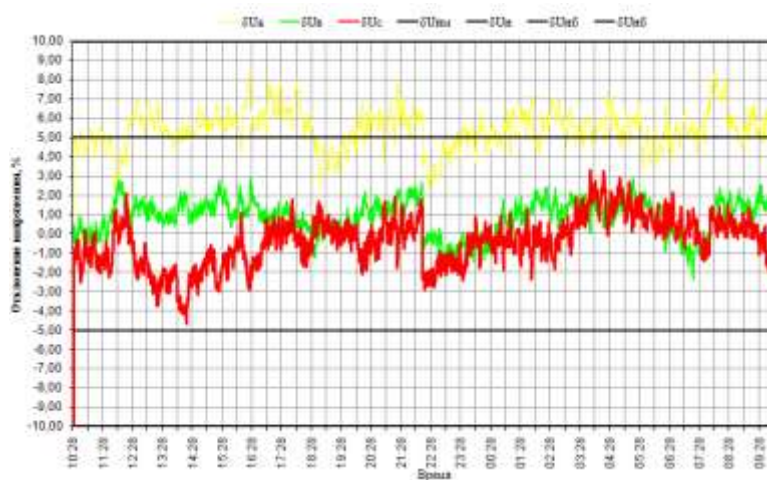


Рисунок 2.9. Изменение отклонения напряжения за период 24 часа

Для исследований были применены функции активации:

1. *Сигмоидальная передаточная функция (logsig)* или сигмоид. Монотонно возрастающая всюду дифференцируемая S-образная нелинейная функция с насыщением. Сигмоид позволяет усиливать слабые сигналы и не насыщаться от сильных сигналов. Примером сигмоидальной функции активации может служить логистическая функция, задаваемая следующим выражением [112]:

$$\text{OUT} = \frac{1}{1 + \exp(-\alpha Y)}, \quad (2.5)$$

где  $\alpha$  – параметр наклона сигмоидальной функции активации. Изменяя этот параметр, можно построить функции с различной крутизной.

2. *Гиперболический тангенс (tansig)*. Разновидность сигмоидальной функции, область значений которой лежит в пределах  $[-1;1]$ . Описывается математическим выражением [112]:

$$\text{th}(Ax) = \frac{\exp(Ax) - \exp(-Ax)}{\exp(Ax) + \exp(-Ax)}, \quad (2.6)$$

Поскольку справедливо выражение

$$\text{th}\left(\frac{t}{2}x\right) = 2\sigma(x) - 1, \quad (2.7)$$

то график гиперболического тангенса отличается от логистической функции лишь масштабом осей. Производная гиперболического тангенса, разумеется, тоже выражается квадратичной функцией значения; свойство противостоять насыщению имеет место точно также.

3. *Purelin* – разновидность линейных функций, чаще всего используется в качестве функции активации в входных или выходных нейронах. Другая разновидность линейной функции активации – линейная передаточная функция с насыщением. Она обладает большим недостатком в виде невозможности дифференцирования на всей числовой оси, что сужает её применение.

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

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

Нейронная сеть (НС) с функциями активации типа  $\tanh$  в скрытом и выходном слоях показала следующие результаты исследований (рисунке 2.10):

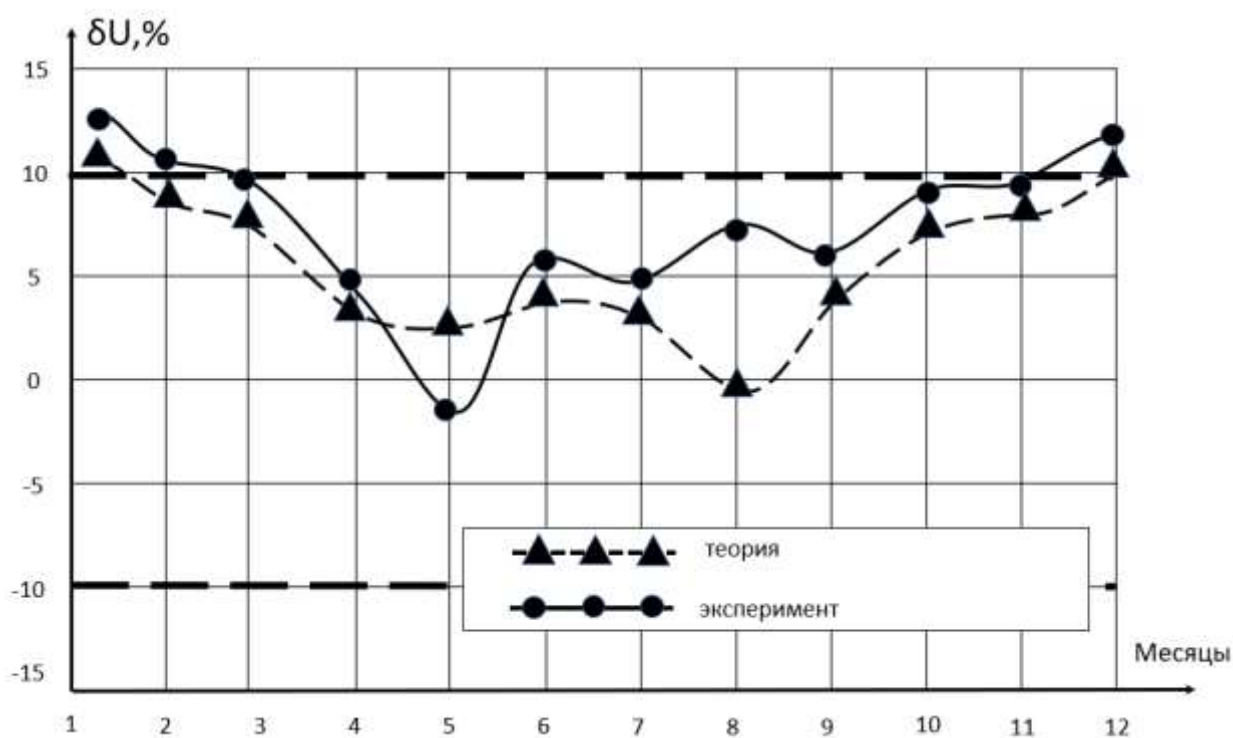


Рисунок 2.10 Результаты исследований НС с функциями активации типа  $\tanh$  в скрытом и выходном слоях

При моделировании электрической нагрузки НС с функцией активации  $\text{tansig}$  в обоих слоях средняя абсолютная ошибка прогноза составила 32%. Как видно на графике, система не смогла предсказать резких отклонений напряжений в 5 и 8 месяцах, выдав некоторое усредненное значение.

Нейронная сеть (НС) с функциями активации типа  $\text{logsig}$  в скрытом слое и  $\text{tansig}$  в выходном слое показала следующие результаты исследований (рисунке 2.11).

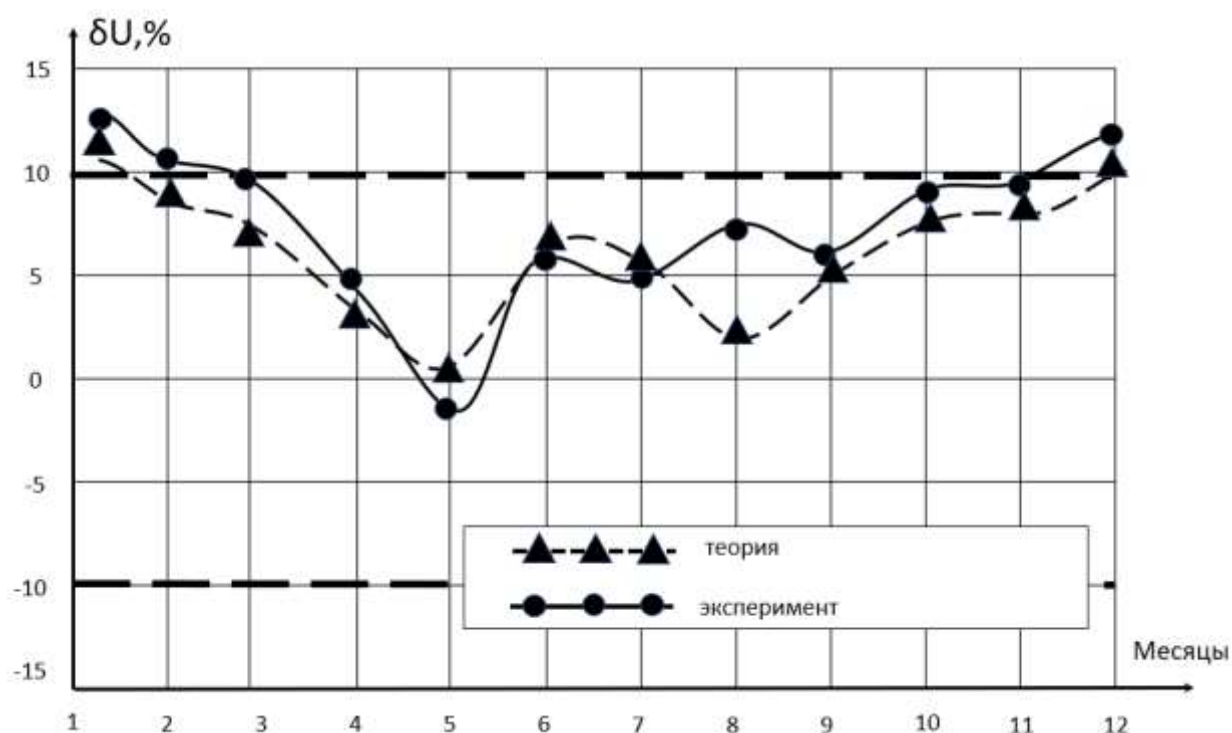


Рисунок 2.11 – Результаты исследований НС с функциями активации типа  $\text{logsig}$  в скрытом слое и функции  $\text{tansig}$  в выходном слое

Моделирование НС с функцией активации  $\text{logsig}$  в скрытом слое и  $\text{tansig}$  в выходном показала среднюю абсолютную ошибку прогноза 27%. Численно результат лучше, но судя по графику, система не смогла правильно установить взаимосвязь между входными и выходными данными, вместо ожидаемого

роста нагрузки в 8 месяце НС предсказало падение, соответственно НС не выставила правильные веса нейронов.

Нейронная сеть (НС) с функциями активации типа  $\text{logsig}$  в скрытом и выходном слоях показала следующие результаты исследований (рисунке 2.12).

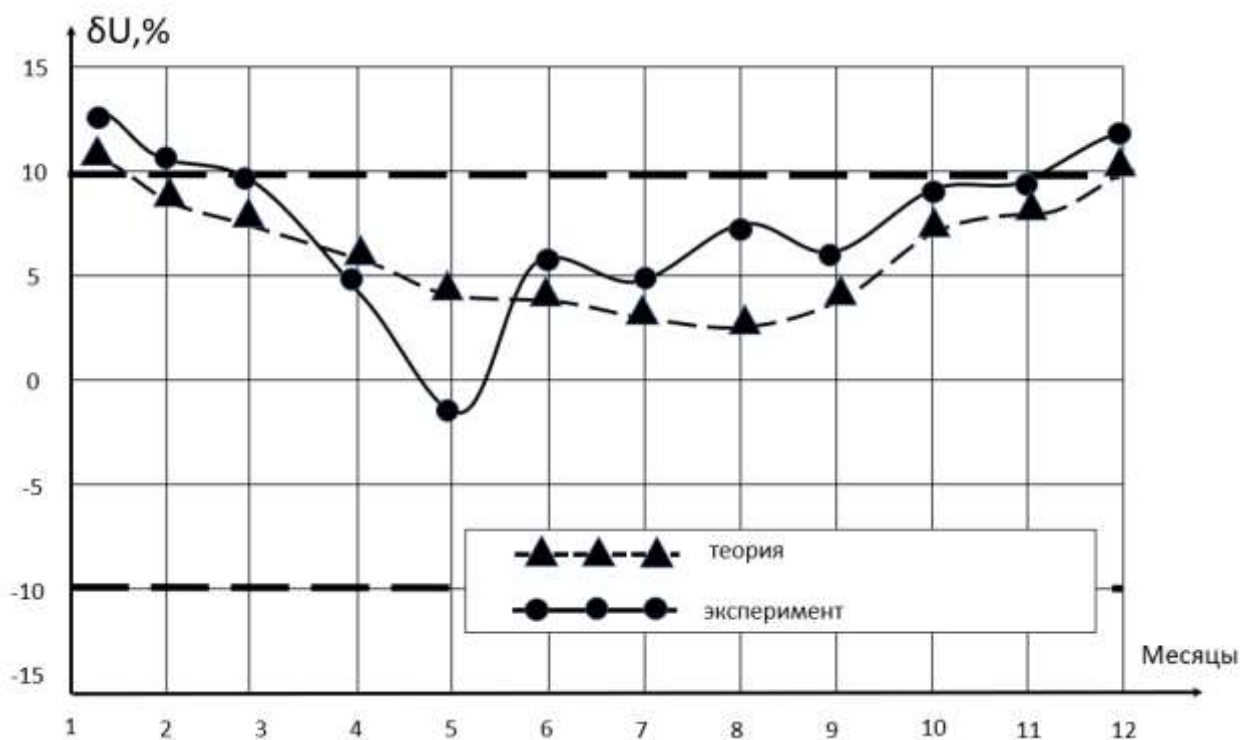


Рисунок 2.12 – Результаты исследований НС с функциями активации типа  $\text{logsig}$  в скрытом и выходном слоях

Моделирование системы с функциями активации  $\text{logsig}$  в обоих слоях показала крайне высокую погрешность прогноза. Средняя абсолютная ошибка прогноза составила 34%. На графике явно видно, что система неправильно настроила веса нейронов, причем процесс создание НС – обучение – моделирование был произведен несколько раз, но во всех случаях система показывала произвольные данные, мало похожие на экспериментальные.

НС с функциями активации типа  $\text{logsig}$  в скрытом слое и  $\text{purelin}$  в выходном показала следующие результаты исследований (рисунке 2.13).

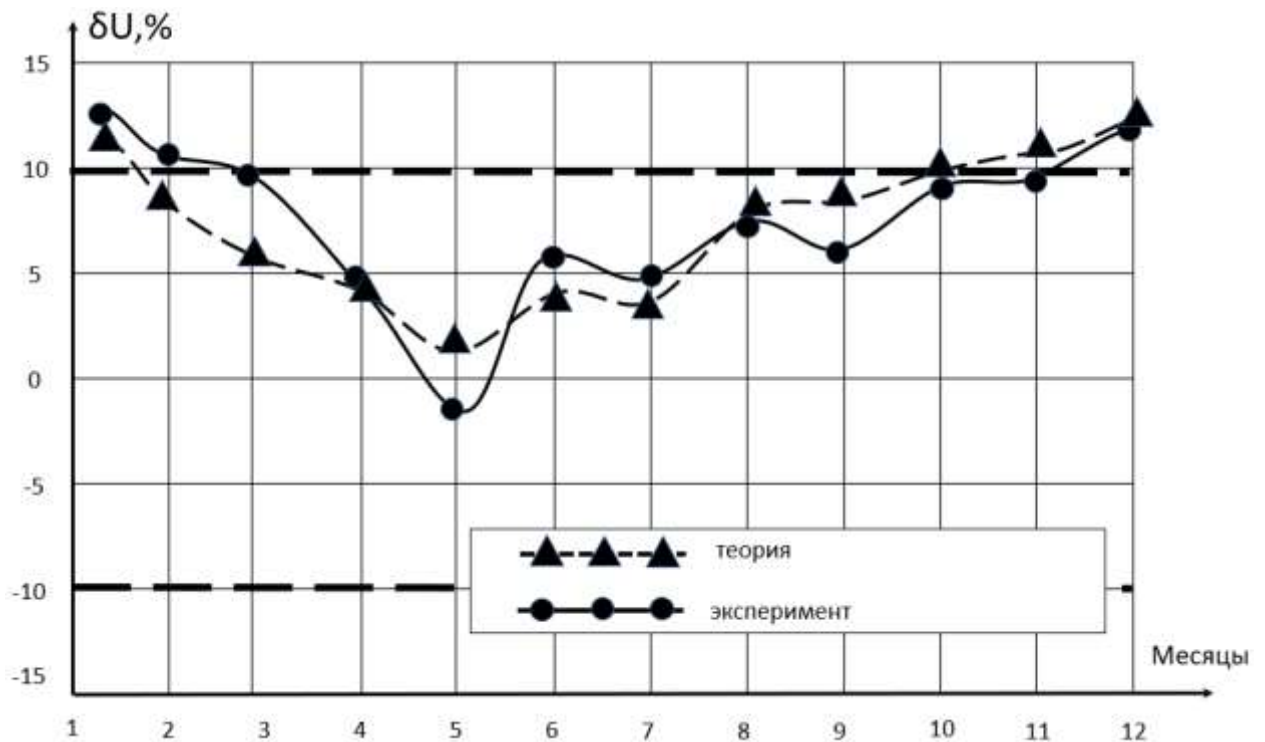


Рисунок 2.13 – Результаты исследований НС с функциями активации типа *logsig* в скрытом слое и *purelin* в выходном

Моделирование НС с конфигурацией *logsig* – *purelin* дало наиболее точные результаты прогнозирования из исследованных конфигураций НС. НС показала готовность к прогнозированию отклонения напряжения при резком изменении электрической нагрузки сельскохозяйственных потребителей. Средняя абсолютная ошибка прогноза составила 12% (рисунок 2.13), что является наиболее точным результатом прогнозирования из исследованных конфигураций НС.

#### *Выбор способа загрузки данных в НС*

Следующим шагом настройки НС является 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. Необходимо отметить, что первые два способа реализуются в виде векторов, а последний способ в виде матрицы. Это обосновано особенностями представления данных в системе MatLAB. В случае с почасовыми данными за счет выбора временного интервала в 2 часа можно получить матрицу 12x12, которая будет успешно принята системой.

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

Для исследования и анализа первых двух способов использовалась НС со структурой (рисунок 2.14) имеющей 10 нейронов с функцией активации *logsig* в скрытом слое и 2 нейрона с линейной функцией активации *purelin* в выходном слое, эффективность которой было доказано выше.

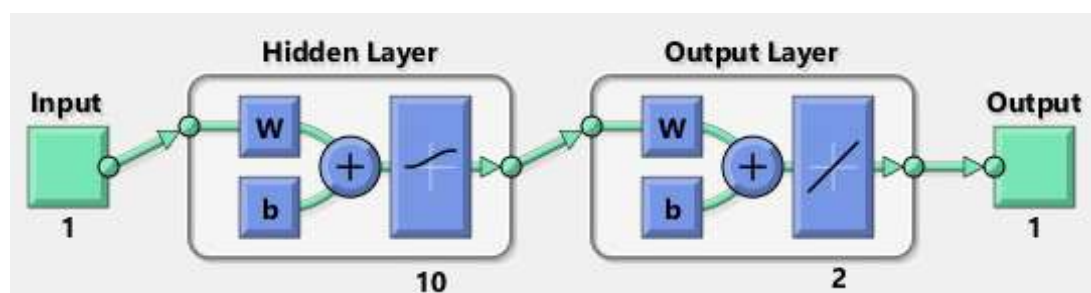


Рисунок 2.14 – НС для работы с векторными данными, имеющая 10 нейронов с функцией активации *logsig* в скрытом слое и 2 нейрона с линейной функцией активации *purelin* в выходном слое

В первом исследуемом способе представления данные за каждый месяц формируют вектор размерностью [1;12], который является элементом для обучения НС. Результаты этого исследования показаны выше на рисунке 2.13.

После исследования помесечных показаний отклонения напряжения проведем исследование по дневному предсказанию. Данные представлены в виде вектора размерностью [1;30] с усредненными данными за 24 часа

(рисунок 2.14). Ошибка прогнозирования при помощи нейронной сети составила 10,5%.

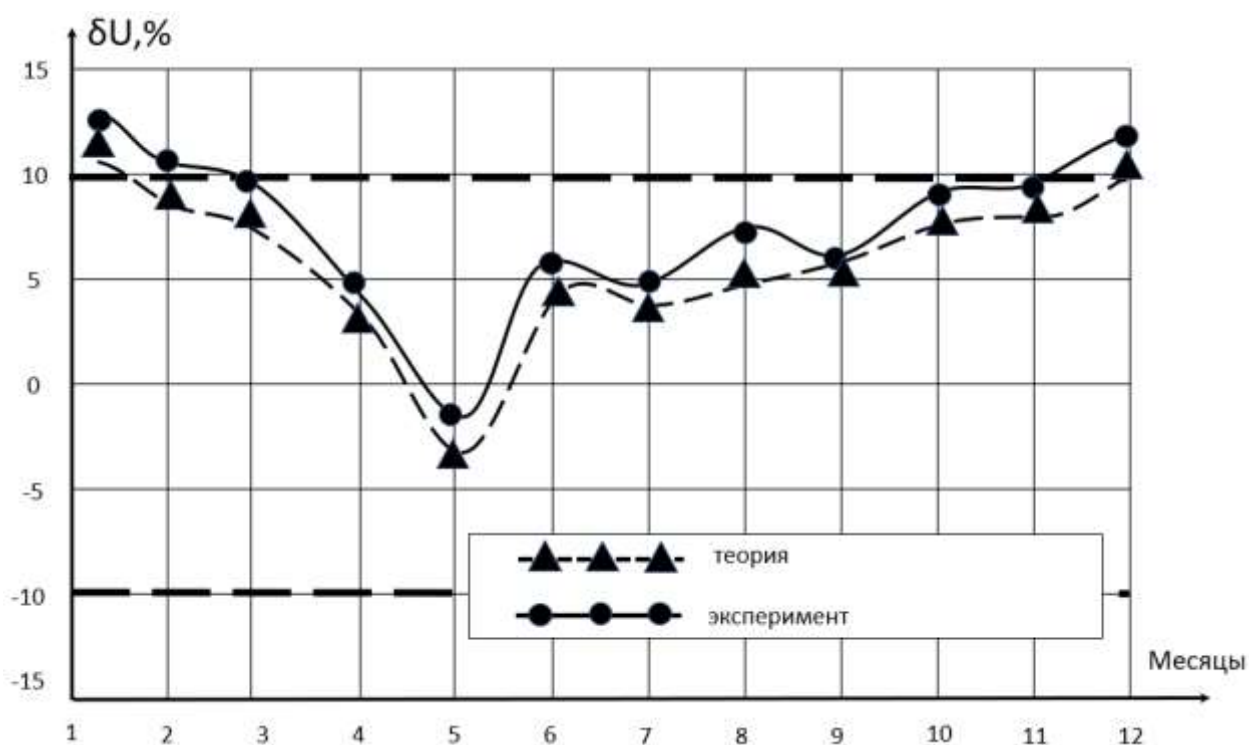


Рисунок 2.14 – Результаты исследований НС с функциями активации типа  $\text{logsig}$  в скрытом слое и  $\text{purelin}$  в выходном с вектором размерностью [1;30]

После исследования двух векторных методов прогнозирования, а именно, месячного и по дневному, был исследован матричный почасовой метод прогнозирования отклонений напряжений. В этом случае НС представлена в виде матрицы размером  $N \times N$ . В случае с почасовым прогнозированием будем иметь матрицу с 12 месяцами года и 12 временными отрезками, что соответствует матрице  $12 \times 12$ .

Для формирования исходных данных потребовалось изменить конфигурацию нейронной сети для работы с матрицами. Это заключалось в увеличении количества нейронов в выходном слое до размерности матрицы, другими словами, в выходном слое было 12 нейронов с линейной функцией активации.



Согласно полученным данным, почасовое прогнозирование отклонения напряжения дало более высокую точность, средняя абсолютная ошибка прогноза составила 8,5% (рисунок 2.15).

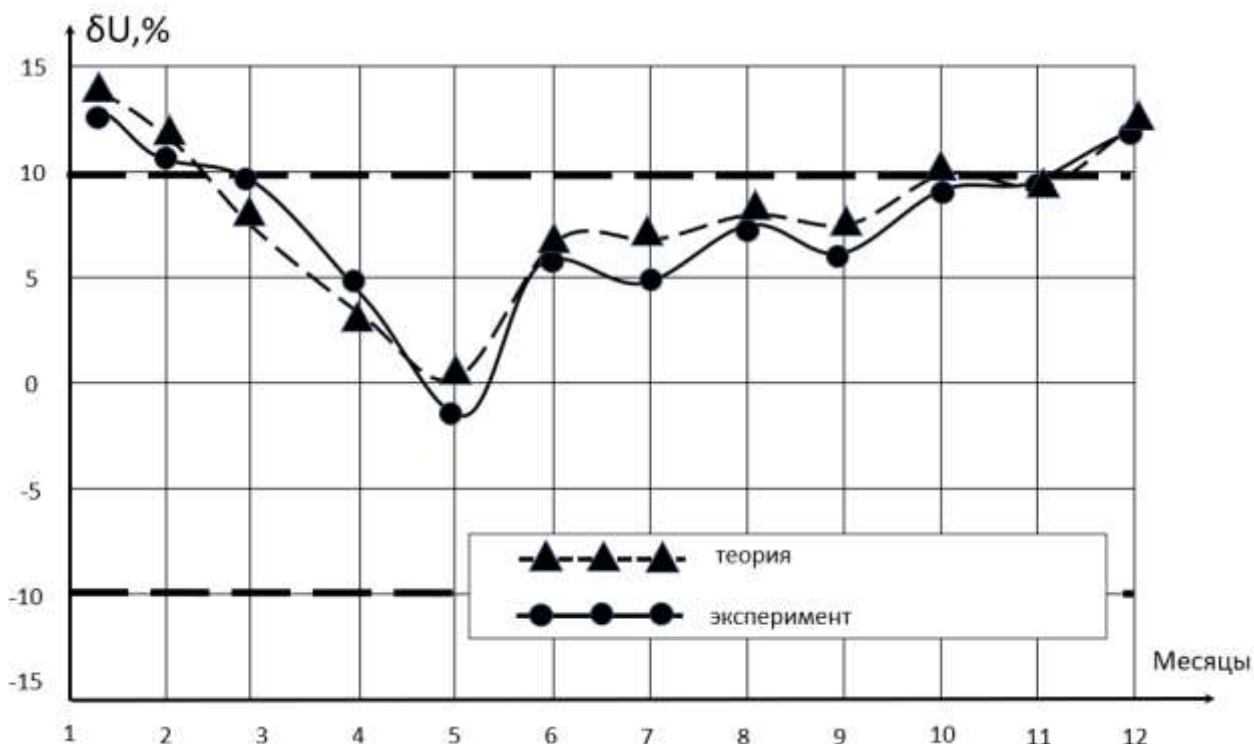


Рисунок 2.15 – Результаты исследований НС с функциями активации типа *logsig* в скрытом слое и *purelin* в выходном с матрицей размерностью [12;12]

Таким образом, матричное представление исходных данных с размерностью [12;12] по часового прогнозирования дало наибольшую точность. Это связано с формой представления данных, а также с увеличенным массивом выборки для обучения нейронной сети.

### *Настройка параметров обучения*

Для повышения точности прогнозирования проведем исследования по настройке параметров обучения. Для исследования были использованы данные почасового потребления электроэнергии с матрицей размерностью [12;12]. Окно настройки обучения пакета *nntool* представлено на рисунок 2.16

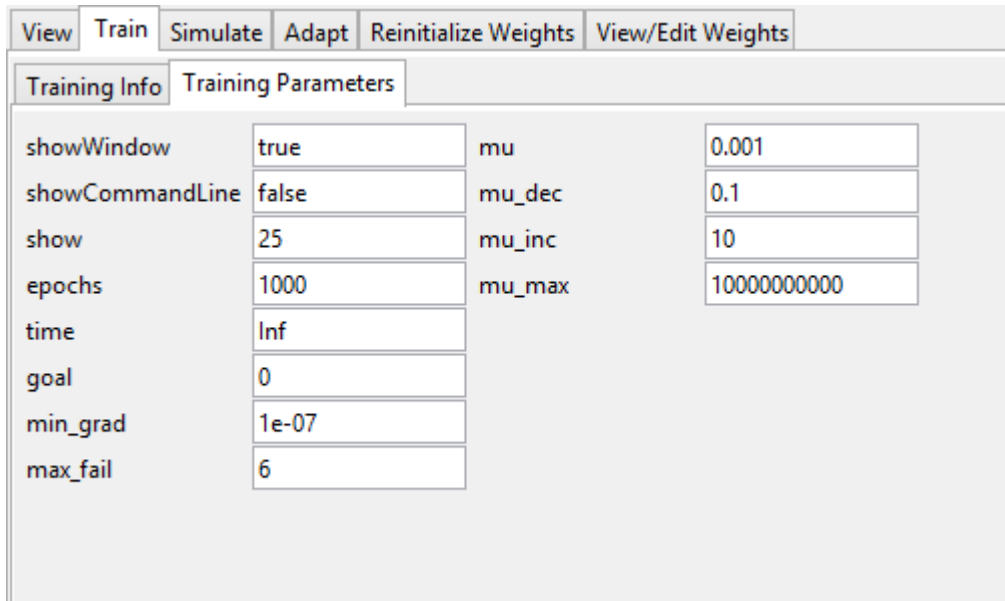


Рисунок 2.16 – Интерфейс параметров обучения НС с установкой по умолчанию

Используемые параметры для настройки обучения:

showWindow – флаг показа окна обучения;

showCommandLine – флаг показа основной командной строки MathLab;

show – шаг между отображаемыми эпохами;

epoch – количество эпох обучения;

time – время обучения;

goal – целевая эффективность;

min\_grad – минимальный градиент ошибки;

max\_fails – положительный скалярный вектор, показывающий максимальное число проверок перед остановкой обучения [3];

mu – значения вектора  $\mu$ ;

mu\_dec, mu\_inc, mu\_max – отклонение вектора  $\mu$  вниз, вверх и его максимальное значение соответственно.

Все параметры можно разделить на два вида – параметры 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. Параметров алгоритма два – `goal` и `mu`. Целевая эффективность `goal` показывает эффективность алгоритма обучения, параметр изменяется очень редко и только для исследований вариантов алгоритмов, но её стоит учитывать, поскольку она является так же и параметром остановки, защищающем НС от переобучения. Касательно `mu`, а точнее вектора  $\mu$  – когда этот скалярный вектор равен нулю обучение производится с помощью метода Ньютона, используя аппроксимацию матрицы Гессе. Если значение вектора  $\mu$  больше нуля – алгоритм обучения работает по принципу плавного уменьшения градиента с малым шагом. Метод Ньютона быстрее и дает большую точность, а также он быстрее способа с плавным уменьшением градиента с малым шагом. Можно сказать, что уменьшение вектора  $\mu$  после каждого удачного шага увеличивает эффективность алгоритма обучения. Поэтому  $\mu$  всегда уменьшается за каждую итерацию алгоритма. Исходя из этого, параметры `mu_dec` и `mu_inc` отвечают за изменение вектора  $\mu$ .

В исследованиях рассмотрены два параметра – количество эпох и минимальный градиент ошибки. Для начала выполним исследование зависимости средней абсолютной ошибки прогноза от числа эпох, число эпох будем жестко ограничивать и при этом заставлять обучение прекращаться по достижению нужного числа эпох. Для наглядности и упрощения полученных результатов ошибкой инициализации нейронов пренебрежем.

Результаты исследований зависимость ошибки прогноза от количества эпох (итераций обучения) приведены на рисунок 2.17



Рисунок 2.17 - 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 приемом 5 эпох обучения, позволяющие с меньшим временем добиваться минимальной ошибки.

Следующий параметр, влияющий на точность прогнозирования - минимальный градиент ошибки (`min_grad`). Проведем исследования варьируя параметр `min_grad` от  $1e-1$  до  $1e-9$  (рисунок 2.18)

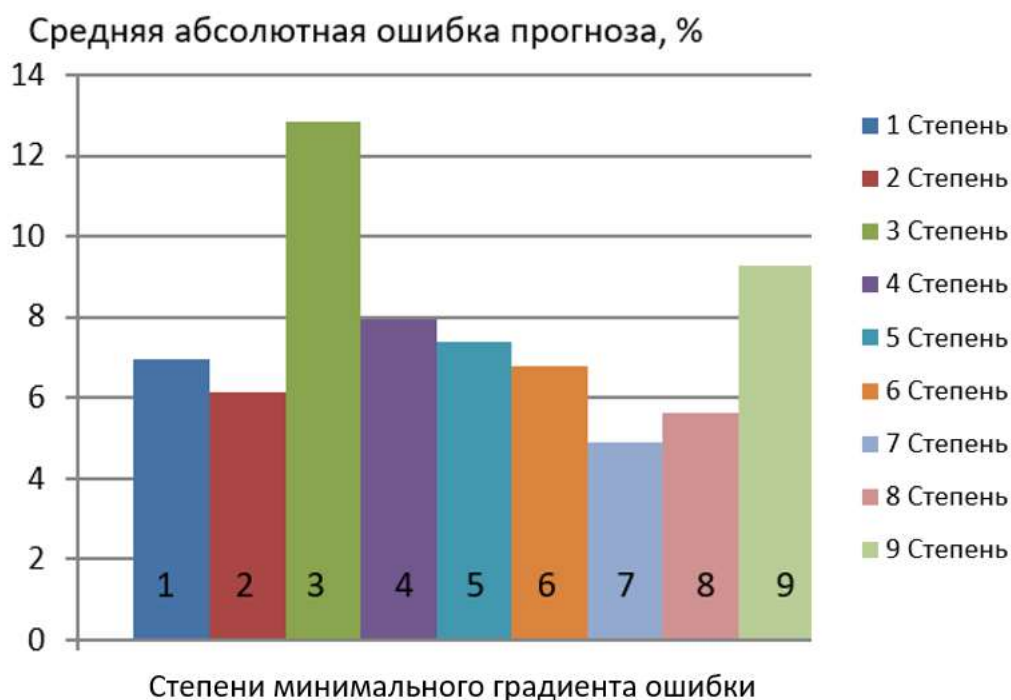


Рисунок 2.18 - Зависимость средней абсолютной ошибки прогноза от степени минимального градиента ошибки

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  $\min\_grad: 1e-7$ .

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ СЕЛЬСКИХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

#### 3.1. Исследование закономерностей изменения параметров качества электрической энергии сельских потребителей

Целью проведения экспериментальных исследований являлось проверка адекватности разработанной имитационной модели сельской электрической сети с. Покрово-Пригородное, а также выявление закономерностей изменения параметров качества электрической энергии (КЭ) сельских потребителей: производственной нагрузки Колхоз - Племенной Завод им. Ленина и бытовой нагрузки жилой сектор село Покрово-Пригородное.

При обследовании распределительных электрических сетей контроль КЭ осуществляется на шинах высшего и низшего напряжения ГПП или ГРП в пунктах раздела балансовой принадлежности, а также на других подстанциях, где имеются источники ухудшения КЭ.

В случаях отклонения показателей КЭ от нормируемых значений, осуществляется периодический или эпизодический контроль (не менее двух раз в год). Контроль КЭ осуществляется сертифицированным парком приборов в характерных эксплуатационных режимах.

Для проведения экспериментальных исследований использовались приборы марки Ресурс-UF2М, являющиеся мобильной версией Ресурс-UF2 с широкой областью применения. При этом имеется возможность использования токоизмерительных клещей для измерения параметров тока и потребляемой мощности электроприемников с высокой точностью без разрыва цепи.

Функциональные параметры Ресурс-UF2 позволяют его применять для осуществления измерений в соответствии с требованиями ГОСТ 32144-2013

(ГОСТ Р 54149-2010), ГОСТ 30804.4.30-2013 (ГОСТ Р 51317.4.30–2008) (класс А):

- оценка и измерение всех показателей качества электрической энергии в соответствии с требованиями стандартов
- определять виновника и его доли в ухудшение качества электрической энергии;
- осуществлять регистрацию параметров электрической энергии в реальном времени
- проводить измерения активной, реактивной и полной мощности;
- прибор может выполнять роль эталонного счетчика класса 0,5 (0,5S) при осуществлении поверки;
- вести учет потоков мощности в энергосистемах, выработки и потребления электроэнергии;
- с помощью прибора возможно осуществлять энергоаудит предприятий АПК и промышленных объектов;

На рисунке 4.1. показаны приборы серии «Ресурс» разработка научно-производственного предприятия "Энерготехника" г. Пенза, для проведения измерений в мобильном и стационарном варианте, а также работать в составе автоматизированных систем

Приборы снабжаются токоизмерительными клещами, позволяющими осуществлять измерения параметров тока в пределах от 2 мА до 1200 А, мощности, углов фазового сдвига.

В нашем случае это клещи типа КТ-52-5-100-1000 (Рис. 4.2) с пределом относительной погрешности:  $\pm 0,3\%$ . Также прибор комплектуется набором соединительных проводов, необходимым программным обеспечением и удобным переносным кейсом.



Рисунок 3.1 - Измерители марки «Ресурс»



Рисунок 3.2 – Токоизмерительные клещи типа КТ-52-5-100-1000



При проведении исследований осуществлялась регистрация следующих параметров ПКЭ:

- размах изменения напряжения;
- длительность временного перенапряжения фазного напряжения;
- установившееся отклонение фазного напряжения;
- длительность провала фазного напряжения;
- глубина провала фазного напряжения;
- коэффициент временного перенапряжения фазного напряжения;
- коэффициент искажения синусоидальности кривой фазного

напряжения;

- коэффициент  $n$ -ой гармонической составляющей фазного напряжения;
- отклонение частоты;
- длительная доза фликера,
- кратковременная доза фликера;
- действующее значение фазного напряжения;
- действующее значение фазного напряжения основной частоты;
- значение частоты,

б) параметры тока:

- действующее значение силы тока основной частоты;
- коэффициент искажения синусоидальности кривой тока;
- действующее значение силы тока;
- коэффициент  $n$ -ой гармонической составляющей тока,

в) характеристики углов фазового сдвига:

- угол фазового сдвига между  $n$ -ми гармоническими составляющими тока

и напряжения,

- угол фазового сдвига между током и напряжением основной частоты:

г) параметры потребляемой мощности:

- полная мощность.
- активная мощность;

- реактивная мощность;

Измерения осуществлялись в пределах погрешностей, соответствующих значениям приведенных в таблице 3.1.

Исследования проводились в два этапа:

1. Установка, подключение, запись данных.
2. Обработка записанной информации, анализ и вывод по полученным результатам.

Подключение Ресурс-UF2М к силовой сети осуществлялась по схеме представленной на рис. 3.3

Таблица 3.1 – Метрологические характеристики прибора Ресурс-UF2М

Измеряемый параметр	Диапазон измерений	Пределы допускаемой основной погрешности (абсолютной $\Delta$ ; относительной $\delta$ , %; приведенной $\gamma$ , %)	Примечание	Модификация
1 Среднеквадратическое значение напряжения <sup>1)</sup> $U$ , В	от $0,01 \cdot U_{\text{ном}}$ до $1,5 \cdot U_{\text{ном}}$	$\pm 0,1 (\gamma)$	Пределы допускаемой погрешности $\gamma$ относительно $U_{\text{ном}}$	Ресурс-UF2, Ресурс-UF2С, Ресурс-UF2М, Ресурс-UF2МВ
2 Установившееся отклонение напряжения <sup>2)</sup> $\delta U_{\gamma}$ , %	от - 20 до 20	$\pm 0,2 (\Delta)$	-	
3 Положительное отклонение напряжения $\delta U_{(+)}$ , %	от 0 до 50	$\pm 0,1 (\Delta)$	-	
4 Отрицательное отклонение напряжения $\delta U_{(-)}$ , %	от 0 до 90	$\pm 0,1 (\Delta)$	-	
5 Частота $f$ , Гц	от 42,5 до 57,5	$\pm 0,01 (\Delta)$	-	
6 Отклонение частоты $\Delta f$ , Гц	от - 7,5 до 7,5	$\pm 0,01 (\Delta)$	-	
7 Коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности $K_{2U}$ , %	от 0 до 20	$\pm 0,15 (\Delta)$	-	
8 Коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности $K_{0U}$ , %	от 0 до 20	$\pm 0,15 (\Delta)$	-	

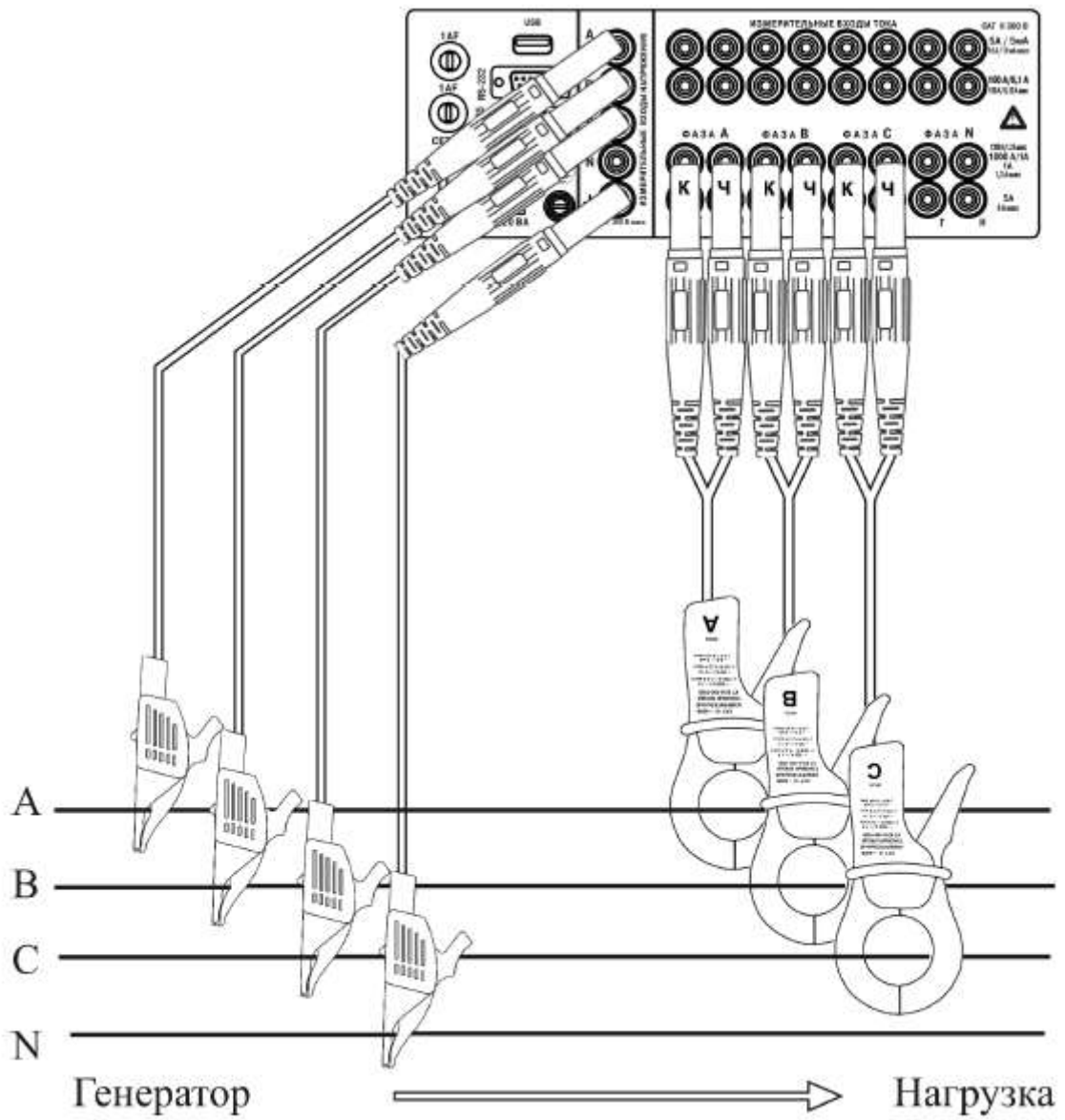


Рисунок 3.3. – Схема подключения Ресурс-UF2М  
к силовой сети

При подготовке измерителя к работе выполнялись следующие действия:

1. Подключение измерительных кабелей прибора к соответствующей клемме на силовом щите, а также токоизмерительные клещи в соответствии с фазировкой подключить к соответствующему проводу. Проверялось правильность подключения к измерителю измеряемых напряжений и токов, а так же напряжения электропитания и защитного заземления.
2. С помощью соединительного интерфейсного кабеля подключались необходимые внешние устройства (компьютер, флеш память, телефонный модем, радиомодем) к разъему интерфейса RS232, расположенному с внешней стороны клеммного отсека. (Подключение внешних устройств допускается производить к работающему измерителю, при этом на внешние устройства в момент подключения не должно быть подано напряжение электропитания.)
3. Подключалась сеть с нагрузкой, после этого осуществлялось тестирование работы измерительного прибора (1-2 мин).
4. Признаком успешного завершения тестов является появление на верхней строчке индикатора надписи ПАРАМЕТРЫ, а на нижней строчке — часов реального времени.
5. Проводилась настройка параметров подключения электрической сети, фазировка и время установки прибора (до 7 суток).

Для проведения исследований выбирались сельскохозяйственные предприятия Тамбовской области. Результаты измерений ПКЭ на сельскохозяйственном предприятии Колхоз - Племенной Завод им. Ленина Тамбовская области, Тамбовского района, село Покрово-Пригородное представлены на рисунках (3.4. – 3.8)

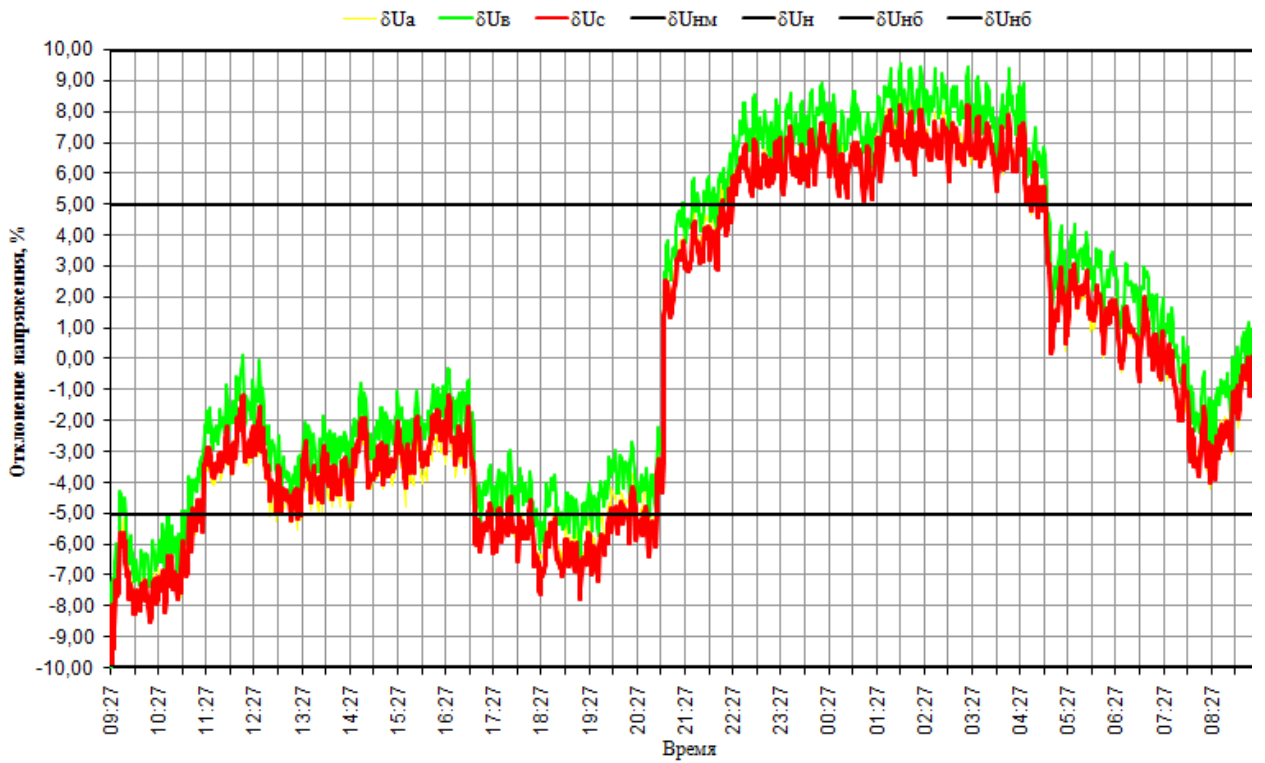


Рисунок 3.4 – Графики отклонения фазных напряжений

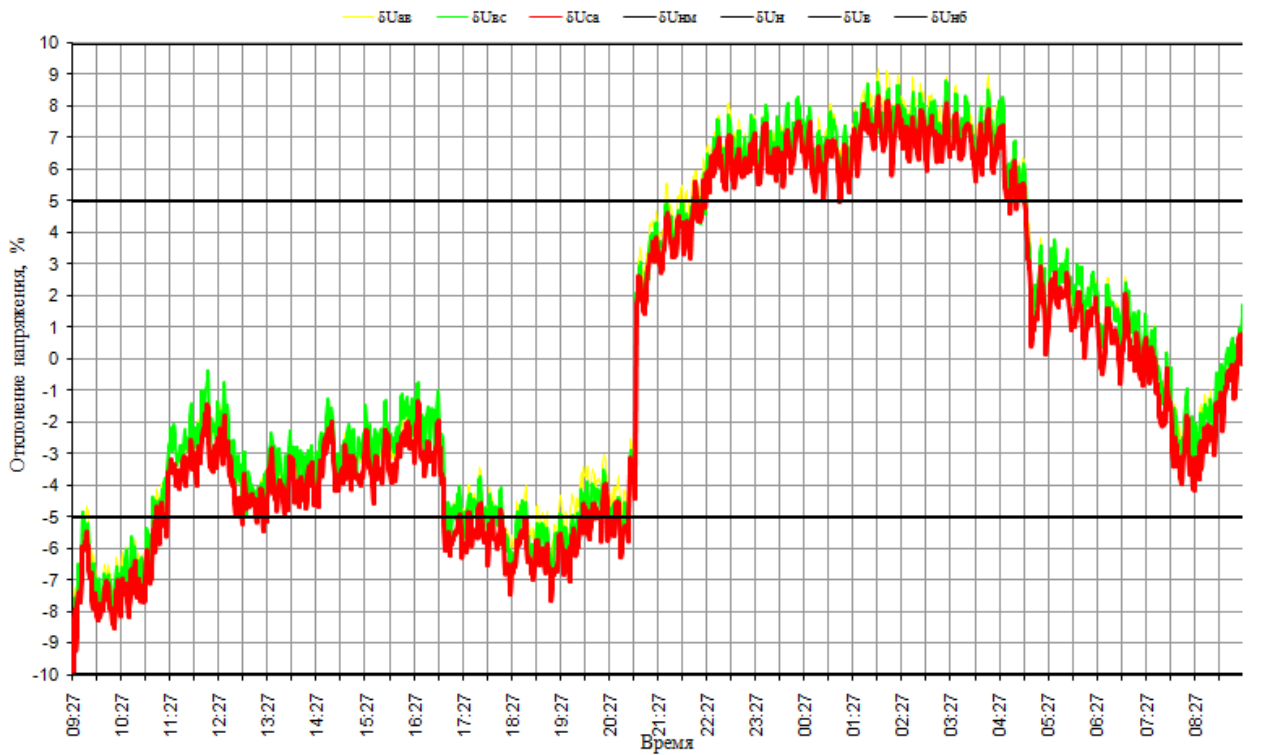


Рисунок 3.5 – Графики отклонения межфазных напряжений

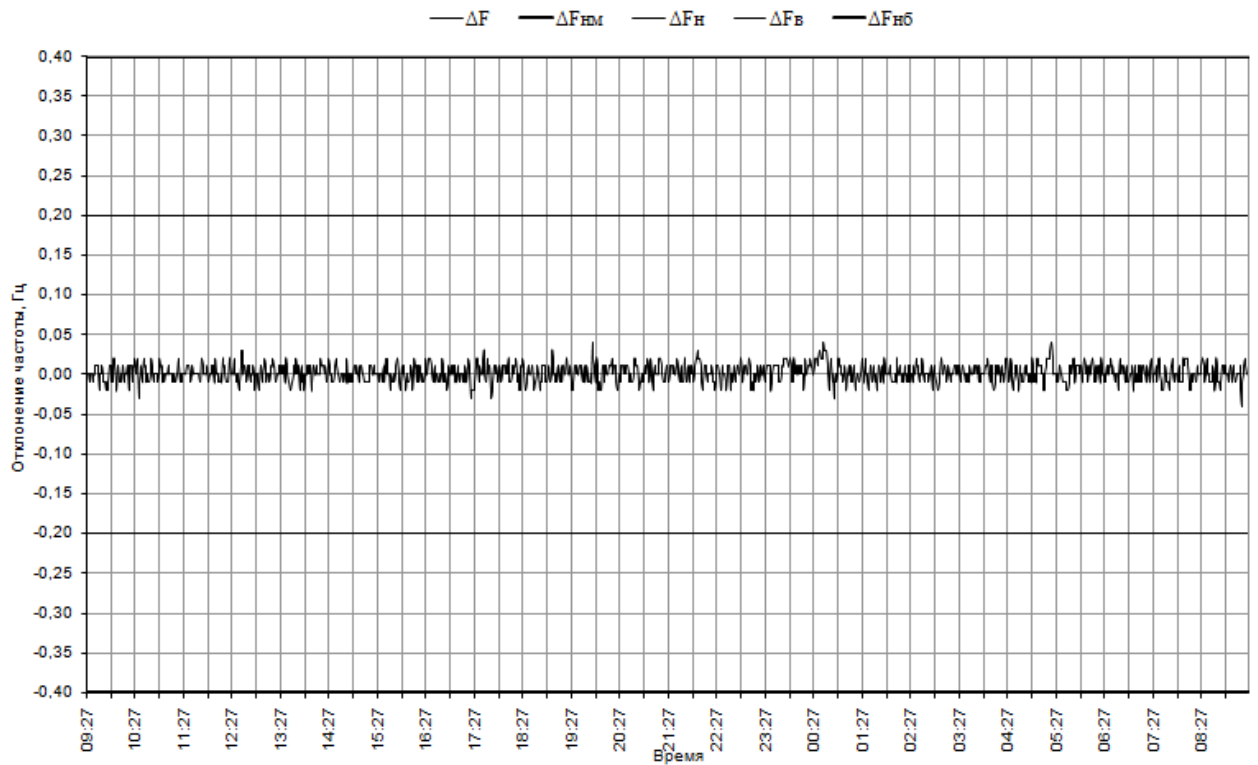


Рисунок 3.6 – Графики отклонения частоты

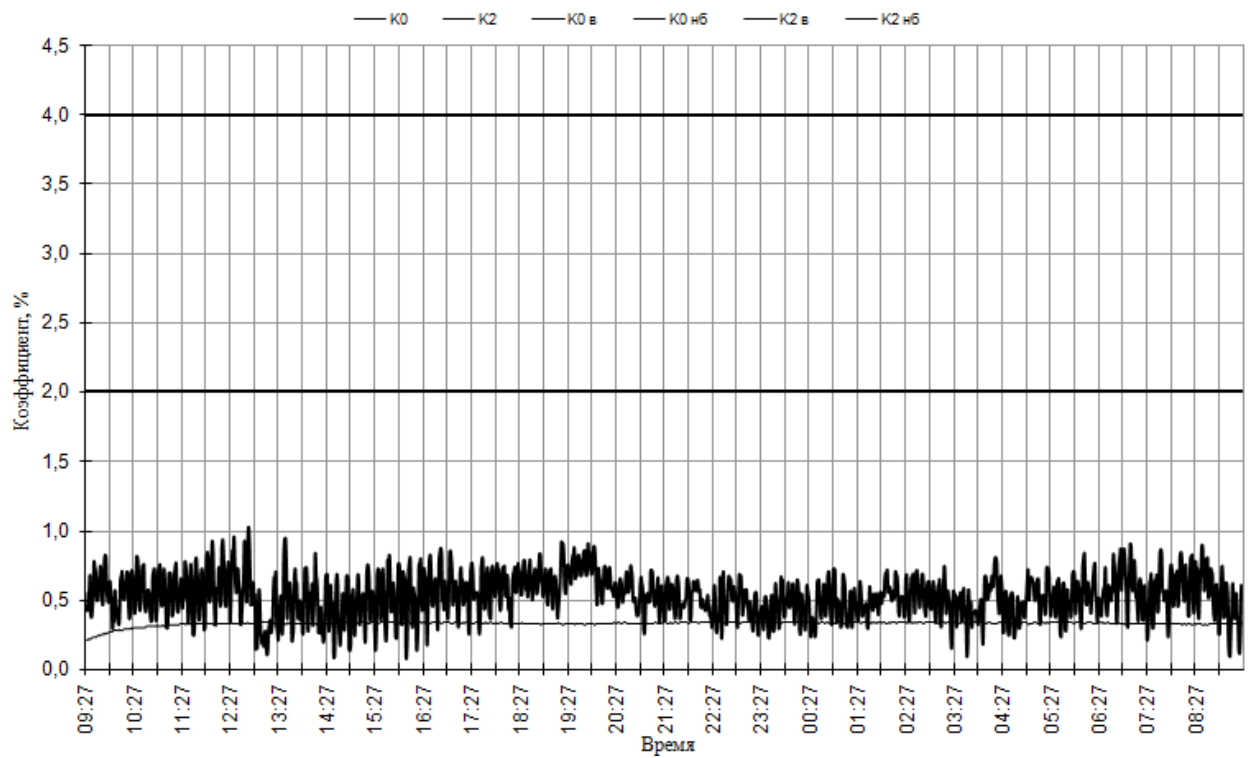


Рисунок 3.7 – Графики коэффициентов несимметрии по нулевой и обратной последовательности

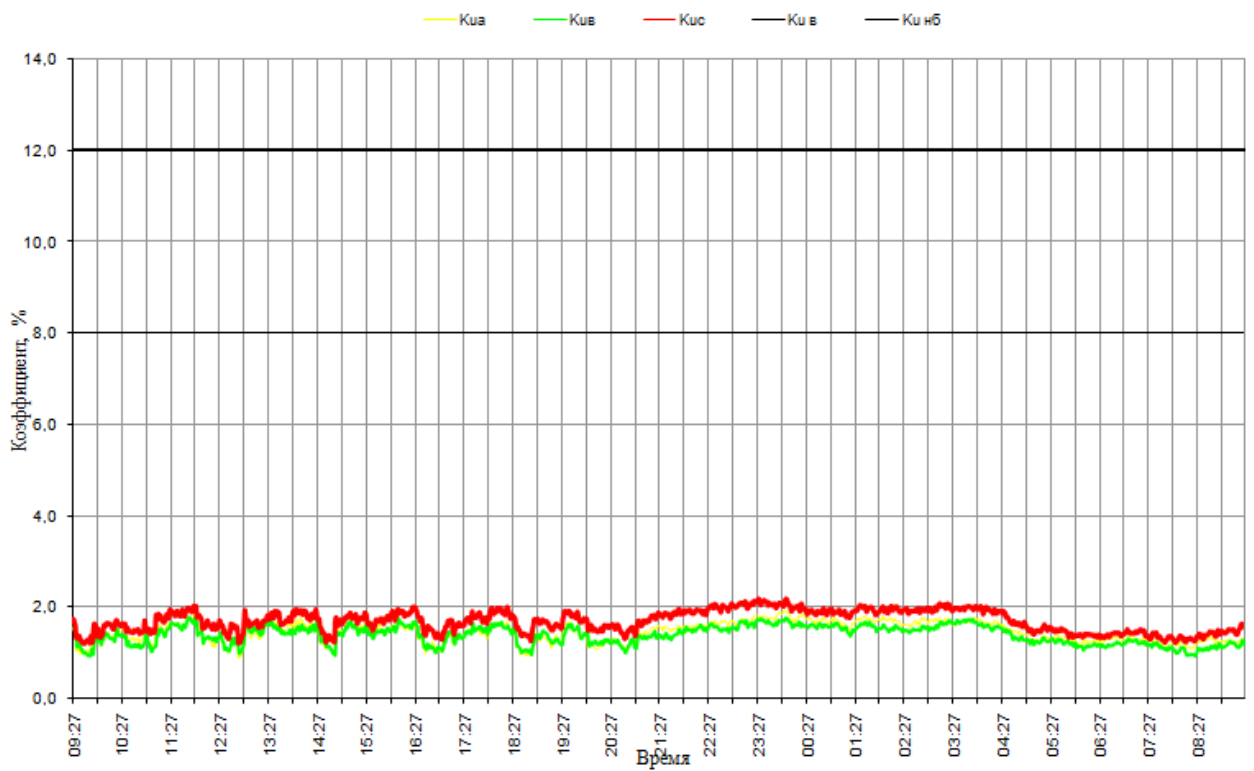


Рисунок 3.8 – Графики коэффициентов искажения синусоидальности фазных напряжений

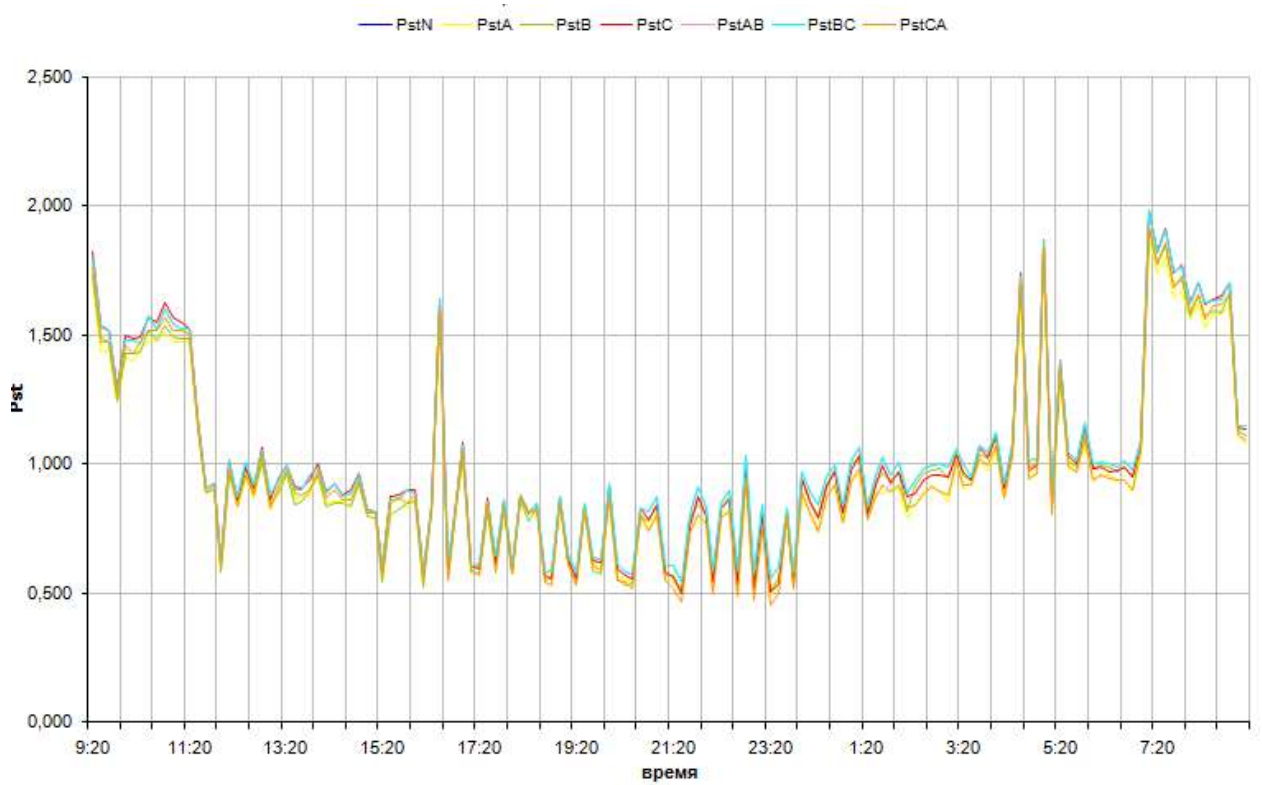


Рисунок 3.9 – Графики кратковременной дозы фликера

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

1. Графики отклонения фазных напряжений (рис. 3.5) и графики отклонения межфазных напряжений (рис. 3.6) 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 (рис.3.7) находятся в пределах нормы, что говорит о хорошем распределении однофазной нагрузки по фазам в колхозе и преобладании трехфазной нагрузки.

3. Графики коэффициентов искажения синусоидальности фазных напряжений (рисунок 3.8) находятся в пределах нормы, что говорит о незначительном использовании на предприятии источников искажения синусоидальности: инверторов, источников бесперебойного питания и пр.

4. Графики кратковременной дозы фликера (рисунок 3.9) демонстрируют режим работы предприятия: всплески импульсов наблюдаются в утреннее время, когда происходит кормление животных и дойка коров.

На рисунках 3.10 – 3.12. приведены результаты исследований ПКЭ в населенном пункте сельского поселения с. Покрово-Пригородное:

1. На рисунке 3.10 – Графики коэффициентов несимметрии по нулевой и обратной последовательности можно наблюдать отклонение значений коэффициентов несимметрии от нормативных значений. Это говорит о преобладании в населенном пункте однофазной нагрузки.

2. На рисунке 3.11 – Графики отклонения фазных напряжений видно, что фаза А менее нагружена, что приводит к увеличению показаний отклонения напряжений свыше 5%.



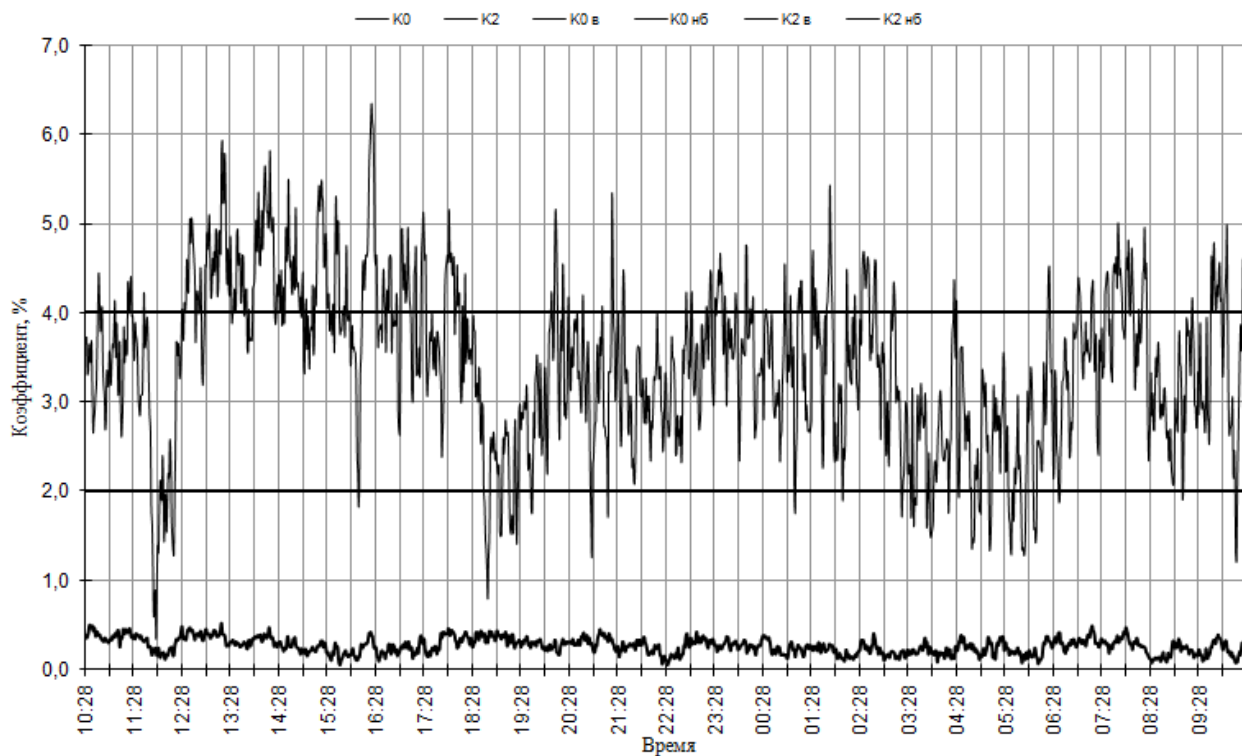


Рисунок 3.10 – Графики коэффициентов несимметрии по нулевой и обратной последовательности

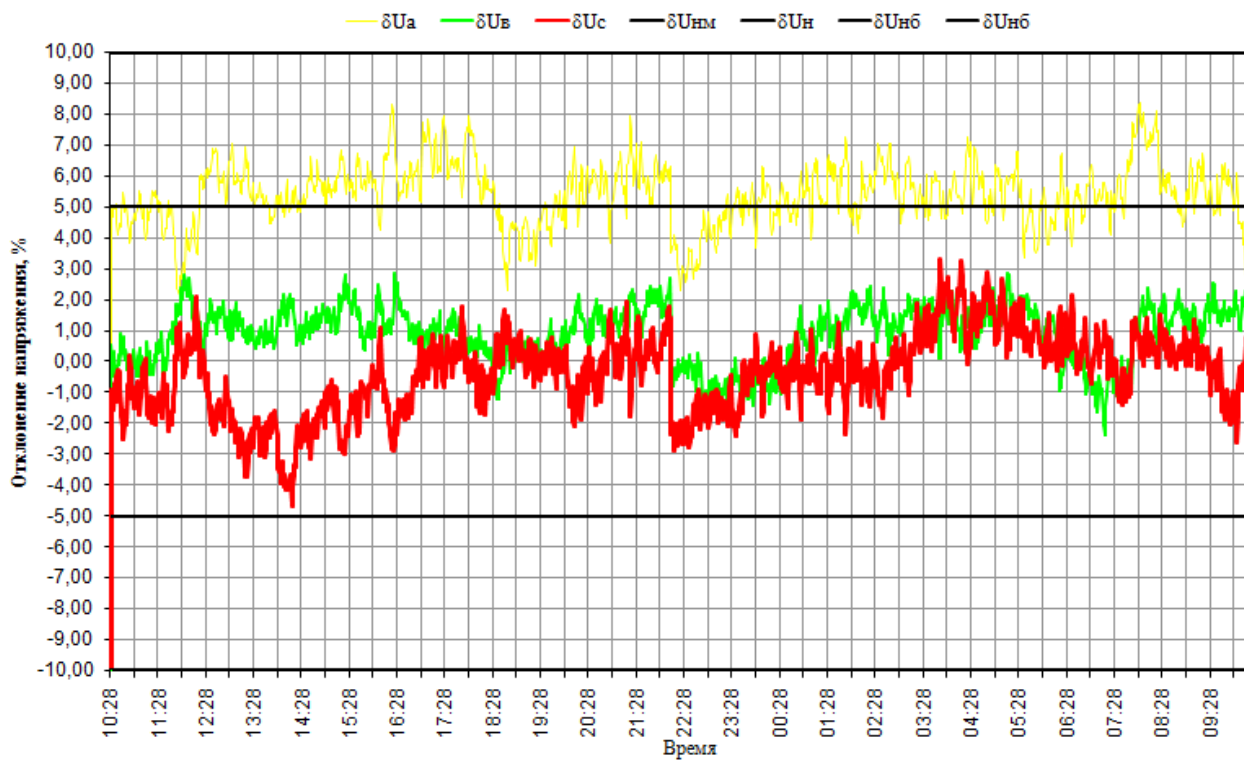


Рисунок 3.11 – Графики отклонения фазных напряжений

За последние десятилетия резко изменился характер нагрузки. Это связано с использованием полупроводниковой техники, как в производстве, так и в домашнем хозяйстве. К нагрузкам линейного характера: нагревательные элементы в виде ТЭНов, лампы накаливания и пр., были добавлены источники управления и выпрямления тока, инверторы, компьютерная техника, источники бесперебойного питания. Эти потребители имеют не линейную нагрузку, с изменяющимся во времени сопротивлением и током. Дiodный мост и сглаживающий фильтр, элементы являющиеся основой схемного решения приводят к появлению импульсного тока. Работа этого механизма подобна работе вентиля с отключением и включением нагрузки

Экспериментальные исследования, проводимые с помощью лабораторного комплекса, позволили получить характеристику изменения коэффициента искажения синусоидальной кривой напряжения  $K_U$  (рис. 3.12).

Коэффициент искажения синусоидальности вычислялся по формуле [120]:

$$K_U = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^N U_{(n)}^2}{U_{(1)}^2}}, \% \quad (3.1)$$

На рисунке 3.12 видно, что увеличение коэффициента искажения синусоидальности фазных напряжений 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. Что явно демонстрирует влияние коммунальной бытовой нагрузки на искажение синусоидальности кривой напряжения на шинах подстанции.

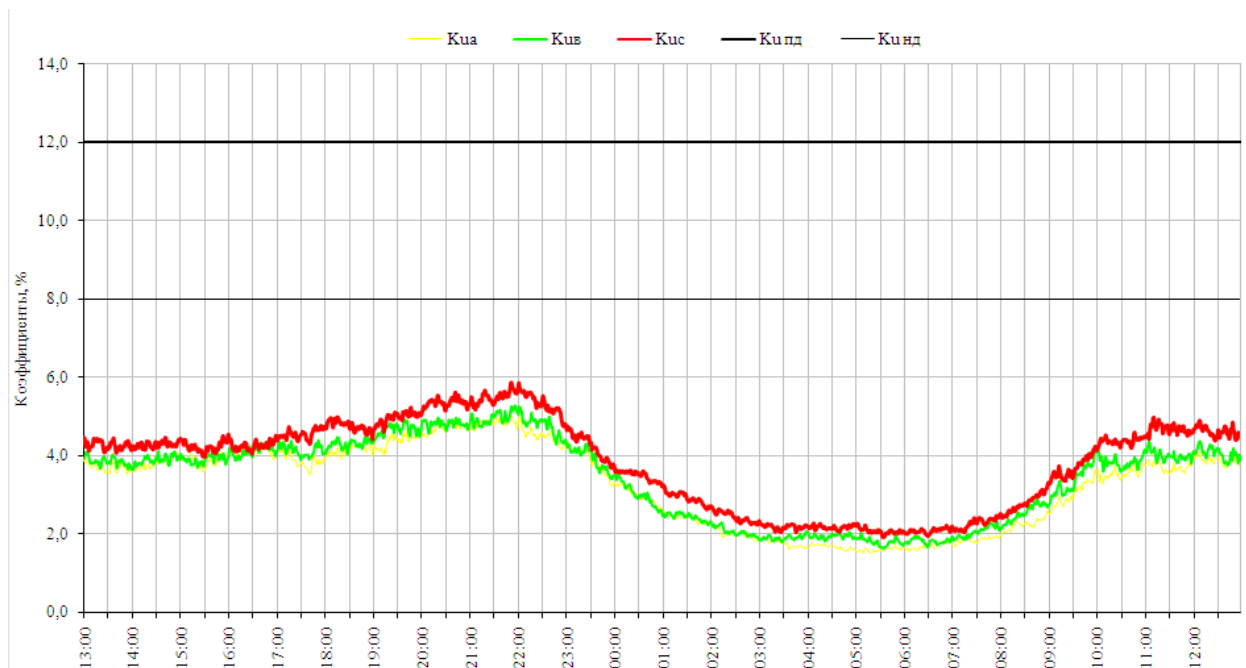


Рис. 3.12 Характеристика изменения коэффициента искажения синусоидальности фазных напряжений

Применение спектрального анализа для исследования искажения синусоидальности характеристик напряжения и тока, позволяет выделить отдельные гармонические составляющие и определить их величину. Для анализа спектрального характера искажения синусоидальности применим ряд Фурье для выражения тока  $i(t)$  [126]:

$$i(t) = I_0 + \sum_{k=0}^n I_{km} \sin(k\omega t + \varphi_k), \quad (3.2)$$

где  $n$  - порядок (номер) последней из учитываемых высших гармоник;  $I_{km} \sin(k\omega t + \varphi_k)$  - гармоники или гармонические составляющие  $k$ -го порядка с амплитудой  $I_{km}$  и начальной фазой  $\varphi_k$ ,  $I_0$  - постоянная составляющая [24-25].

Особое внимание в исследованиях уделяют анализу гармоник кратным трем (т.е. 3, 9, 15, 21 и т. д.) [128-130]:

$$n = 3(2k + 1), \text{ где } k=0, 1, 2, \dots \quad (3.3)$$

Особенностью является то, что нечетные гармоники кратные трем суммируются в проводнике нейтрали, что вызывает рост тока в нейтральном проводнике [129]:

$$I_n = 3\sqrt{I_3^2 + I_9^2 + I_{15}^2 + \dots}, \quad (3.4)$$

В ряде случаев ток в нейтральном проводнике из-за этого превышает токи в фазных проводниках. К негативному влиянию гармоник можно отнести [45]:

- разрушение нулевых проводников из-за перегрева;
- высушивание и старение изоляции кабелей и проводов;
- нарушение надежной работы релейной защиты;
- потери в силовых трансформаторах;
- резонансные явления в распределительных электрических сетях;
- нарушение работы электрических двигателей.

На основании выше сказанного, можно сделать вывод о необходимости реализации систем оперативного контроля и мониторинга параметров качества электрической энергии для раннего прогнозирования и предупреждения аварийных ситуаций в электроснабжении сельскохозяйственных потребителей.

С целью проверки адекватности имитационной модели представленной на рисунках 2.3 - 2.6. Были проведены экспериментальные исследования, повторяющие теоретические с измерениями параметров КЭ рис. 3.13 – 3.14.

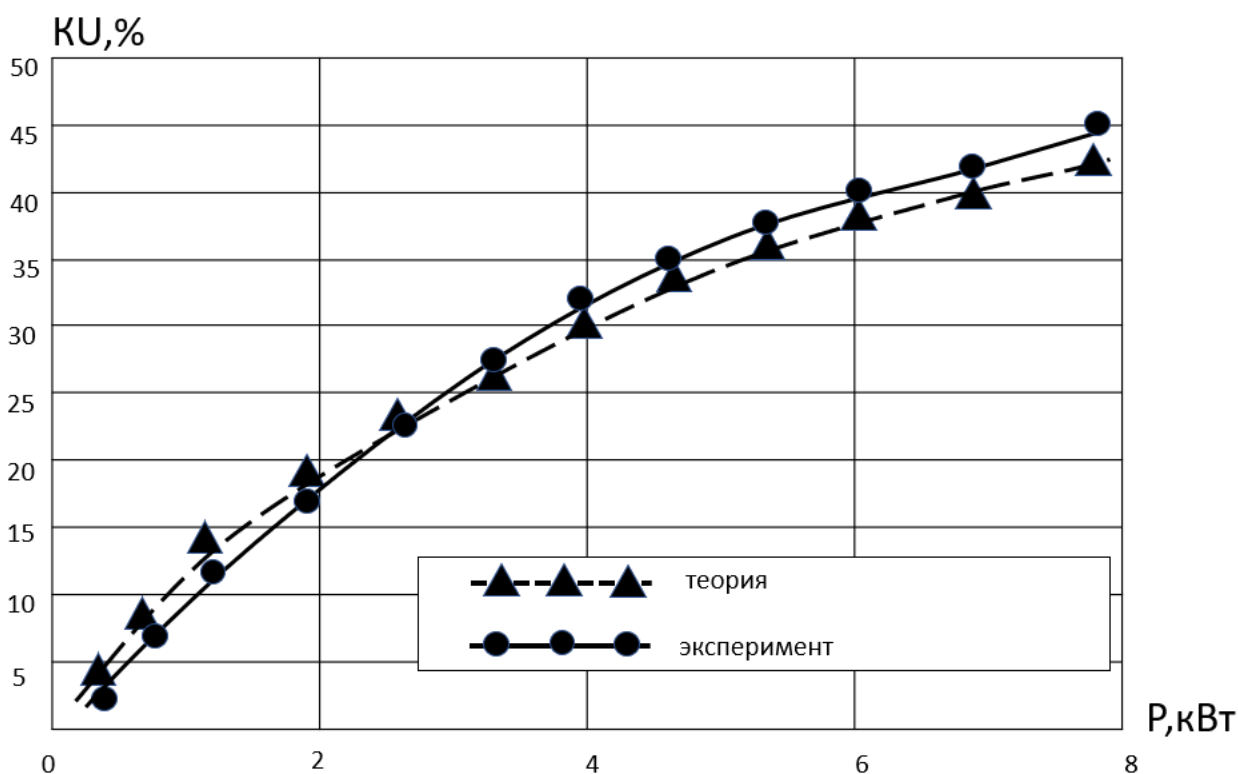


Рисунок 3.13 - Характеристика коэффициента несимметрии напряжения по нулевой последовательности от изменения мощности однофазной нагрузки

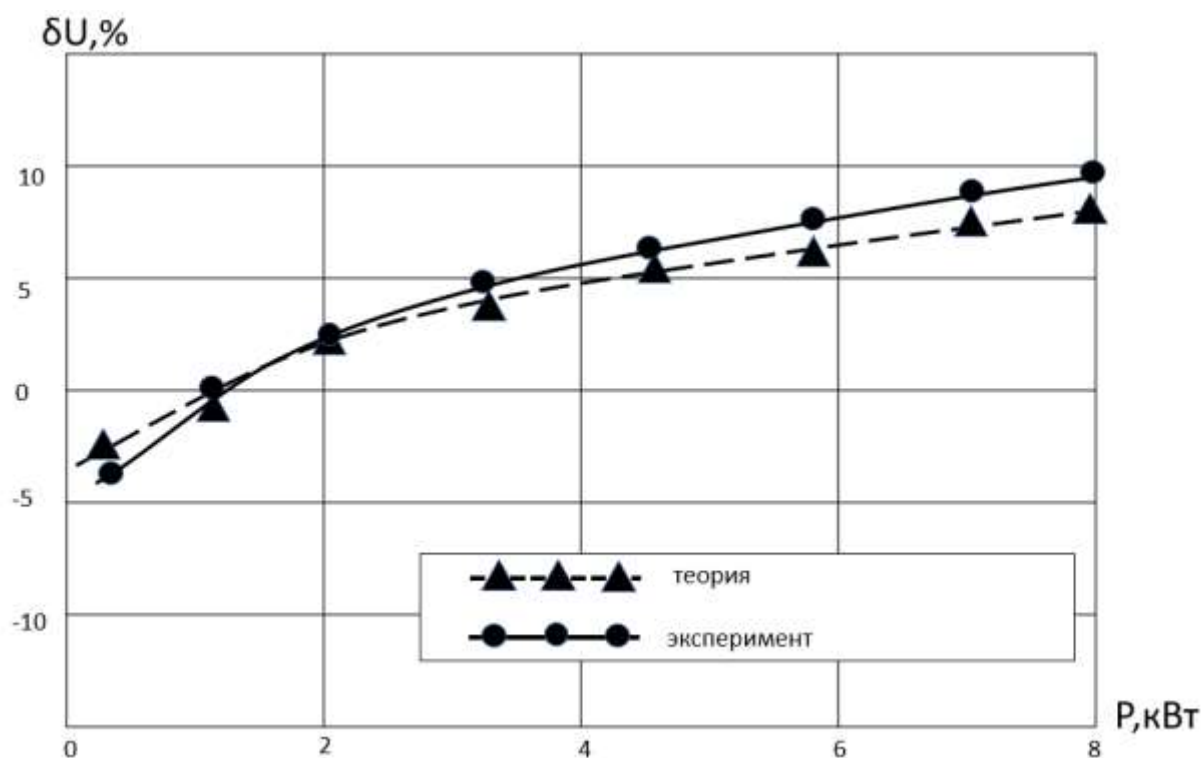


Рисунок 3.14 - Зависимость отклонения напряжения от мощности нагрузки электрической сети

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

### 3.2. Исследования влияния работы люминесцентных ламп на показатели качества электрической энергии

Исполнение Федерального закона № 261-ФЗ от 23.09.2009 «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности...» обязывает предприятия и организации к внедрению энергосберегающих технологий. Наиболее распространенным мероприятием является замены устаревших источников света - ламп накаливания, на современные энергосберегающие, такие как компактные люминесцентные (CFL –

CompactFluorescentLamps) и светодиодные источники света. Энергосберегающие источники света используют в теплицах при выращивании рассады, овощей, цветов в зимнее время, а также для увеличения продолжительности светового дня в животноводческих помещениях, в птичниках в осеннее-зимнее время. Подобные мероприятия позволяют экономить до 80% электроэнергии, используемой на освещение. Однако, встроенные в систему зажигания электронные схемы приводят к изменению формы тока и напряжения. [9]

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. Технические характеристики лампы приведены в таблице 4.2.

Схема лабораторной установки представлена на рисунке 3.15. Для проведения исследований был использован измеритель качества электрической энергии Ресурс -UF2М с токовыми клещами и персональный компьютер для обработки и отображения измеряемой информации.

Таблица 3.2. – Технические характеристики лампы CFL

№ п/п	Наименование	Параметр (значение)
1	Тип колбы	S
2	Цоколь	E27
3	Эквивалент лампы накаливания, Вт	65
4	Цветность	Естественный белый (3300 – 5000 К)
5	Назначение	Общее освещение
6	Световой поток, Лм	754
7	Цветовая температура, К	4200
8	Цветопередача, Ra	82
9	Срок службы, ч	10000

В ходе проведения лабораторного исследования фиксировались параметры качества электрической энергии, отраженные в таблице 4.3.

Таблица 3.3. – Метрологические характеристики измерений

	Измеряемый параметр	Диапазон измерений	Пределы допускаемой основной погрешности (абсолютной $\Delta$ , относительной $\delta$ ; %, приведенной $\gamma$ , %)
1	Среднеквадратическое значение напряжения $U$ , В	от $0,01U_{\text{ном}}$ до $1,5U_{\text{ном}}$	$\pm 0,1(\gamma)$
2	Частота $f$ , Гц	от 42,5 до 57,5	$\pm 0,01 (\Delta)$
3	Коэффициент искажения синусоидальности напряжения, $K_U$ , %	от 0,5 до 30	$\pm 0,05 (\Delta)$
4	Коэффициент $n$ -ой гармонической составляющей напряжения $K_{U(n)}$ , %	от 0,1 до 30	$\pm 0,05 (\Delta)$
5	Среднеквадратическое значение силы тока $I$ , А	от $0,01I_{\text{ном}}$ до $1,2I_{\text{ном}}$	$\pm 0,01(\gamma)$
6	Коэффициент $n$ -ой гармонической составляющей тока $K_{I(n)}$ , %	от 1 до 100	$\pm 0,15 (\Delta)$

В результате проведенных лабораторных исследований были получены спектральные характеристики напряжения и тока (рисунок 3.16 и 3.17).



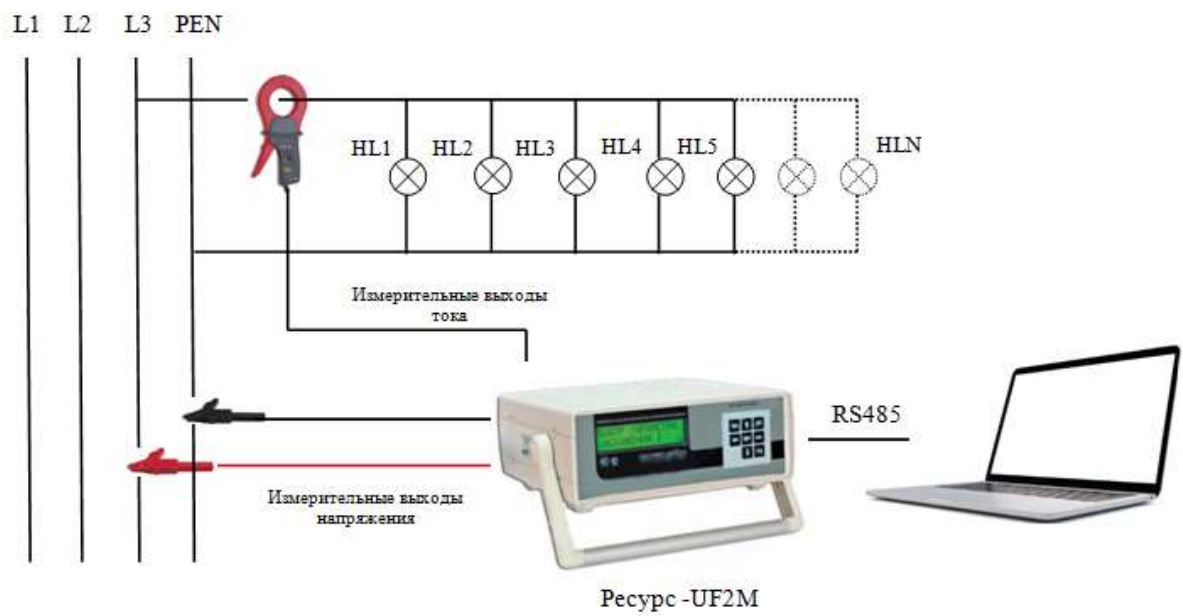


Рисунок 3.15 – Схема лабораторной установки для измерения ПКЭ

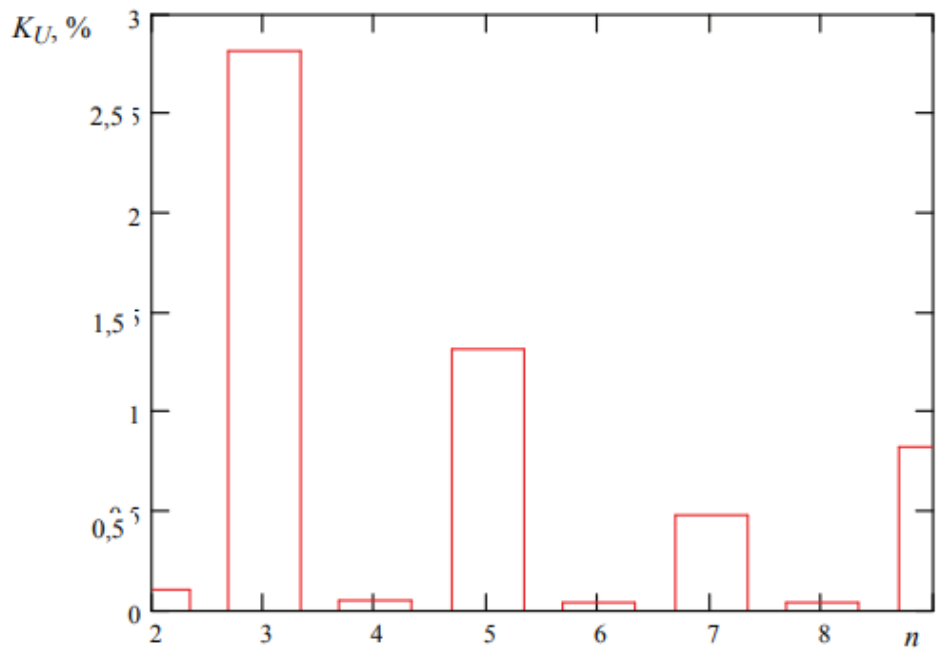


Рис. 3.16 Спектральное представление гармонических составляющих напряжения

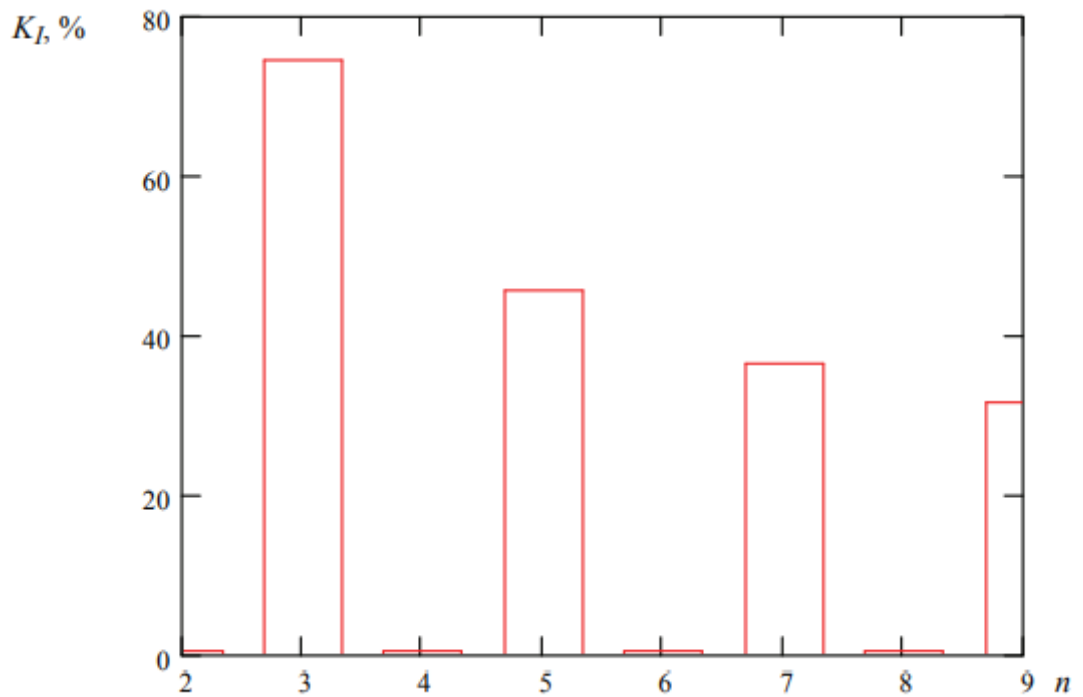


Рис. 3.17 Спектральное представление гармонических составляющих тока

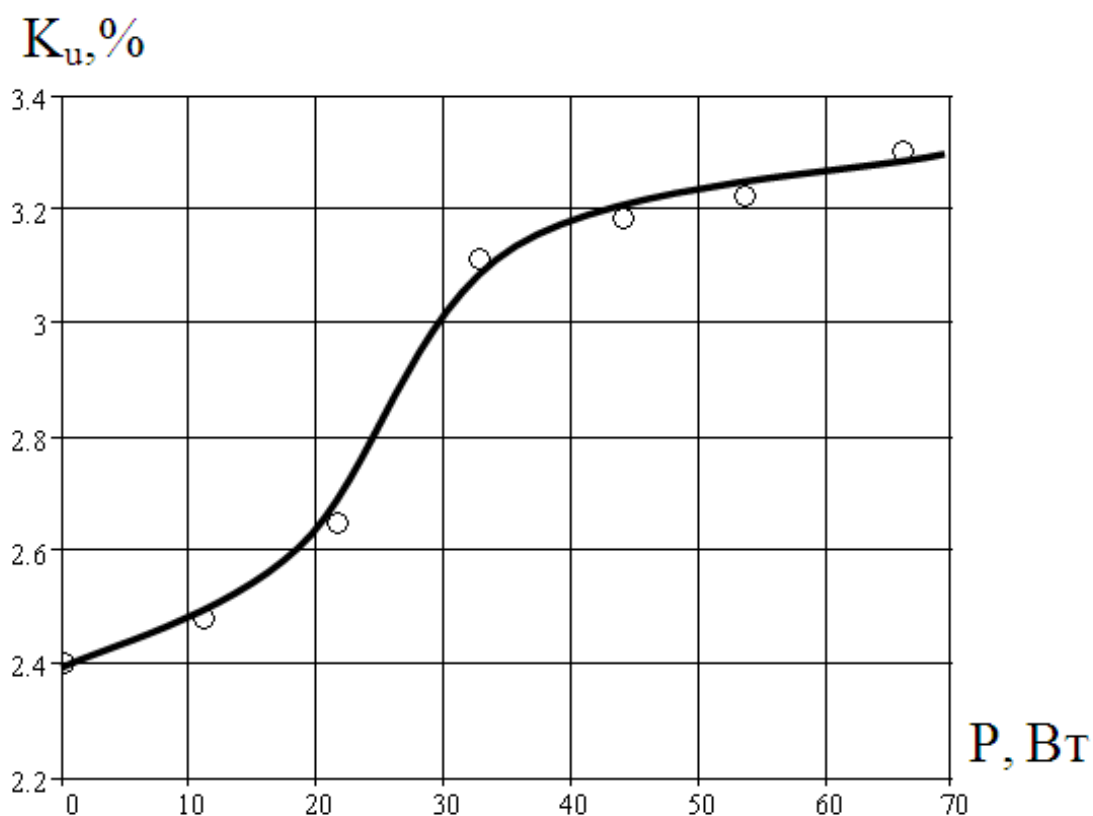


Рис. 3.18. Зависимость коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения от потребляемой мощности люминесцентных ламп

В результате исследований установлено, что в гармонических составляющих напряжения и тока потребляемого преобладают нечетные гармоники. 3-я гармоника тока увеличивается до 74% основной частоты тока, а 3-я гармоника напряжения является наибольшей из анализируемых гармонических составляющих.

Согласно данным (рисунок 3.18) с увеличением количества ламп CFL и потребляемой ими мощности возрастает коэффициент искажения синусоидальной кривой напряжения  $K_U$ .

Для прогнозирования характера изменения  $K_U$ , на основе проведенных лабораторных исследований была получена математическая модель, демонстрирующая характер изменения коэффициента искажения синусоидальной кривой напряжения в функции активной мощности  $P$ , потребляемой источниками света CFL:

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

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.

## ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ НЕЙРОСТЕВОВОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

### 4.1. Формирование структуры и алгоритма системы нейростевого регулирования напряжения

Проведенные исследования, отраженные выше в работе, позволяют сформировать структурную схему и алгоритм системы нейросетевого регулирования напряжения представленную на рисунках 4.1 и 4.2.

Особенностью структурной схемы 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. Заданное значение медленных изменений напряжения, устанавливаются в соответствии с ГОСТ в границах не более 10 % номинального или согласованного значения напряжения в течение 100 % времени интервала в одну неделю в точках передачи электрической энергии.

Необходимым условием функционирования системы нейросетевого регулирования напряжения, является контроль и поддержание заданного отклонения напряжения как в точках передачи электрической энергии, что в условиях сельских электрических сетей – это трансформаторная подстанция, так и самого удаленного потребителя.

Как уже было отмечено выше, в сельском хозяйстве для регулирования напряжения наиболее часто применяют устройства ПБВ (переключение без возбуждения). Этот тип устройств не позволяет регулировать напряжение трансформатора под нагрузкой, как у РПН (регулирование под нагрузкой), а используется во время сезонных переключений в периоды максимальных и минимальных нагрузок.

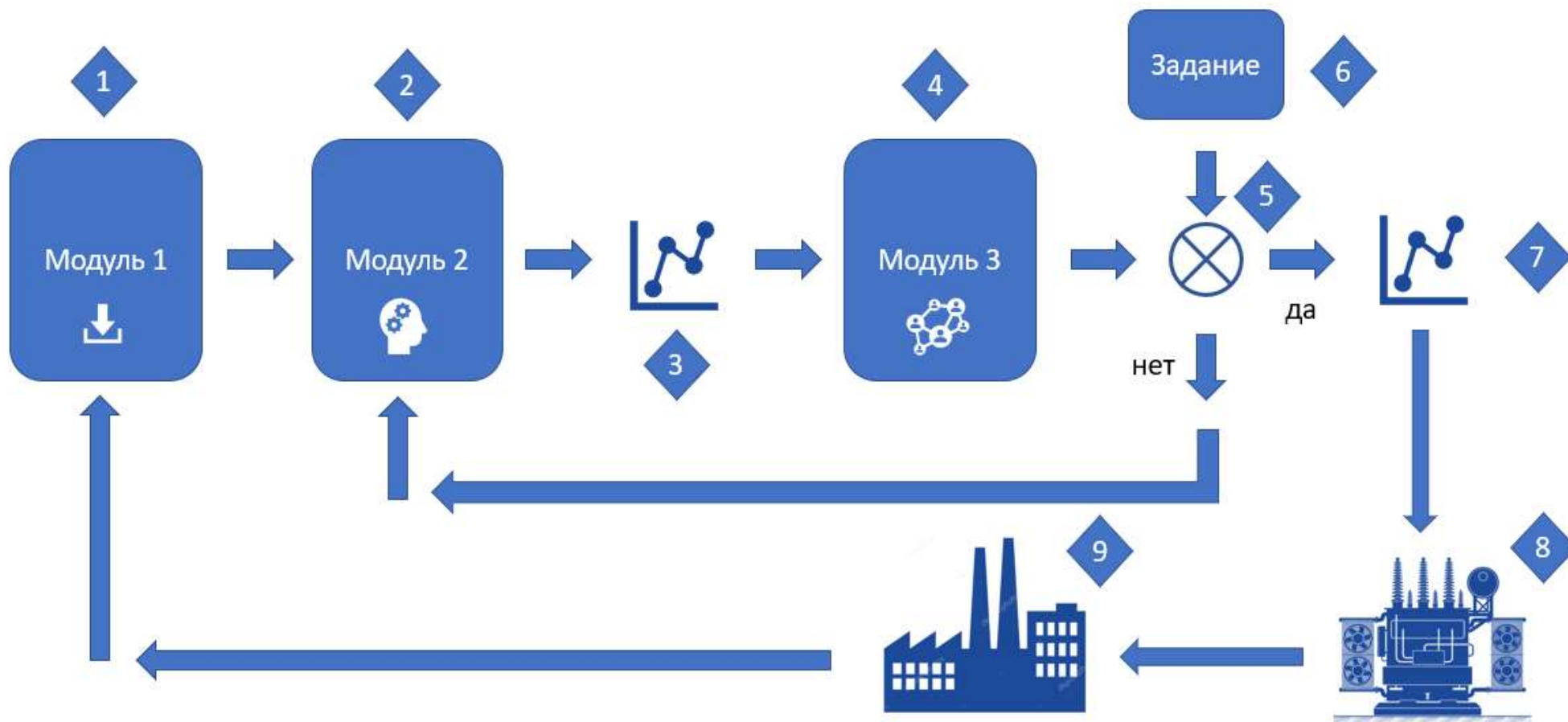


Рисунок 4.1. – Структурная схема системы нейросетевого регулирования напряжения

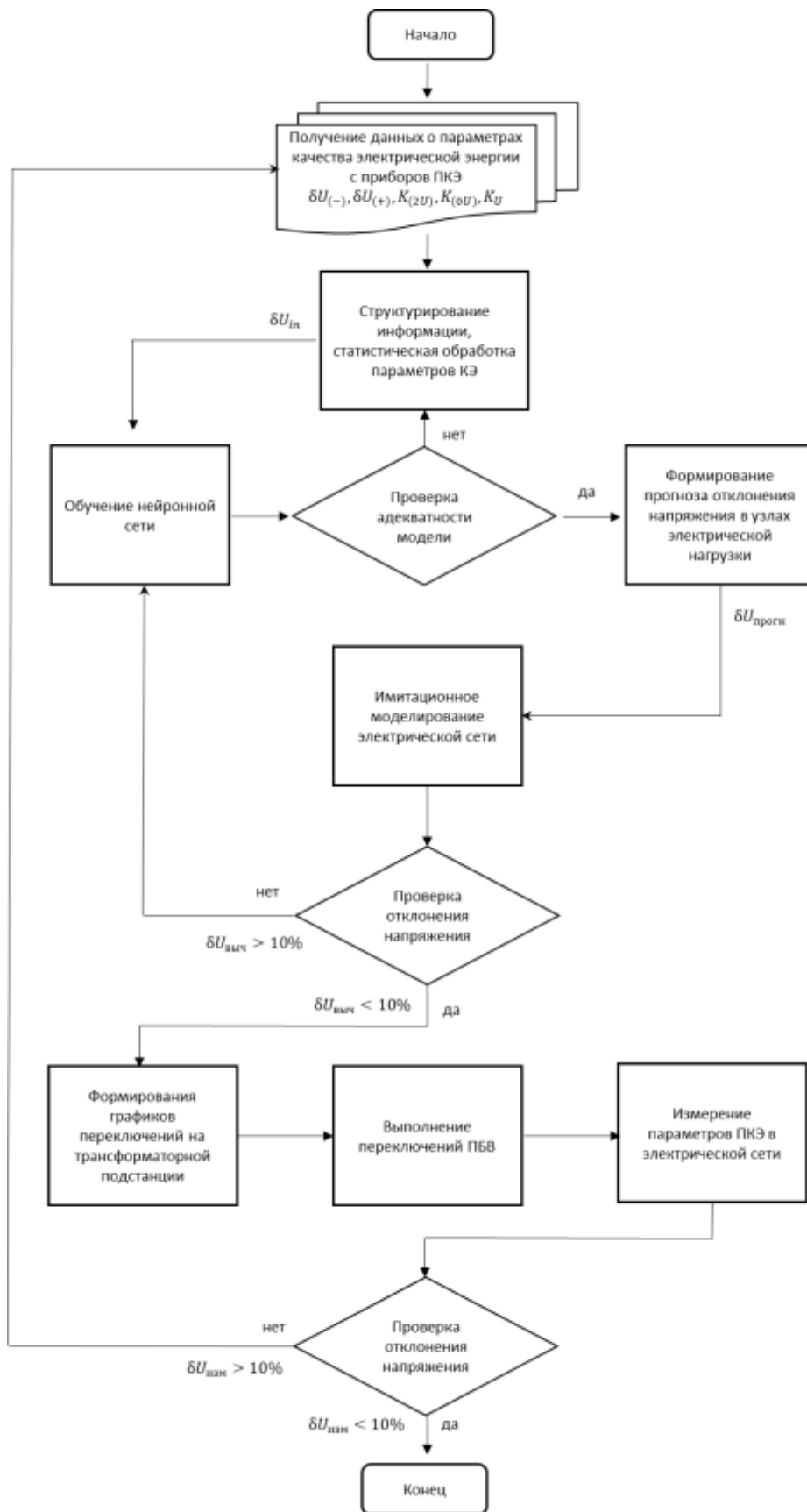


Рисунок 4.2 - Блок-схема системы нейросетевого регулирования напряжения

Поэтому рассматриваемый алгоритм (рисунок 4.2) работы системы нейросетевого регулирования напряжения предполагает, в том числе работу с устройствами ПБВ, за счет формирования графиков переключений на трансформаторных подстанциях в результате нейросетевого прогнозирования отклонения напряжения.

Приведем описание структурной схемы и бок-схемы 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. Сбор информации осуществляется по беспроводной технологии ZigBee. Топология схема установки приборов КЭ реализуется с помощью ячеистой технологии mesh, позволяющей ретранслировать данные через соседние маршрутизаторы в случае перерывов связи.

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

2.1. Структурирование информации, статистическая обработка параметров КЭ в соответствии со стандартом ГОСТ и ее архивация с глубиной архива: минуты, часы, сутки, месяцы, годы. Подобная глубина архива позволяет создать массив данных для обучения нейронной сети.

2.2. Обучение нейронной сети и проверка ее адекватности. В ходе прогнозирования параметров КЭ происходит формирование графиков отклонений КЭ с прогнозом помесечно в течение года. Проверка адекватности позволяет установить параметры отклонения точности прогноза. Точность прогноза должна быть не более 5%.

2.3. Расчет времени проведения регулировки напряжения и величины регулировочной уставки (3). Прогноз отклонения напряжения в узлах электрической нагрузки в течение года по месяцам позволяет установить



месяц, в котором по прогнозу будет максимальное отклонение напряжения. Таким образом на предстоящий год можно более точно установить периоды максимальных и минимальных нагрузок, а по величине отклонения напряжения рассчитать степень регулирования ПБВ.

Подобный подход позволяет оптимизировать работу электротехнических служб и выстроить графики сезонных переключений 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 снова сравнивается с допустимой величиной отклонения напряжения направляется в «Модуль 1» (1) для

последующего формирования массива данных для обучения нейросетевого регулятора.

#### 4.2. Экспериментальные исследования эффективности системы нейросетевого регулирования напряжения

Цель экспериментального исследования заключалась в проверке работы нейросетевого регулирования напряжения для обеспечения необходимого уровня напряжения у наиболее удаленного сельскохозяйственного потребителя.

Задачами исследования – проведение физического моделирования сельской электрической сети и оценка эффективности применения технологии прогнозирования отклонения напряжения, имитационного моделирования сельской электрической сети, точности регулирования напряжении.

Для проведения исследований использована существующая в лаборатории кафедры «Электроэнергетика» Тамбовского государственного технического университета лабораторная установка для проведения физического моделирования системы управления качеством электрической энергии в сельской электрической сети. Конструктивное исполнение лабораторной установки представлено на рисунке 4.3

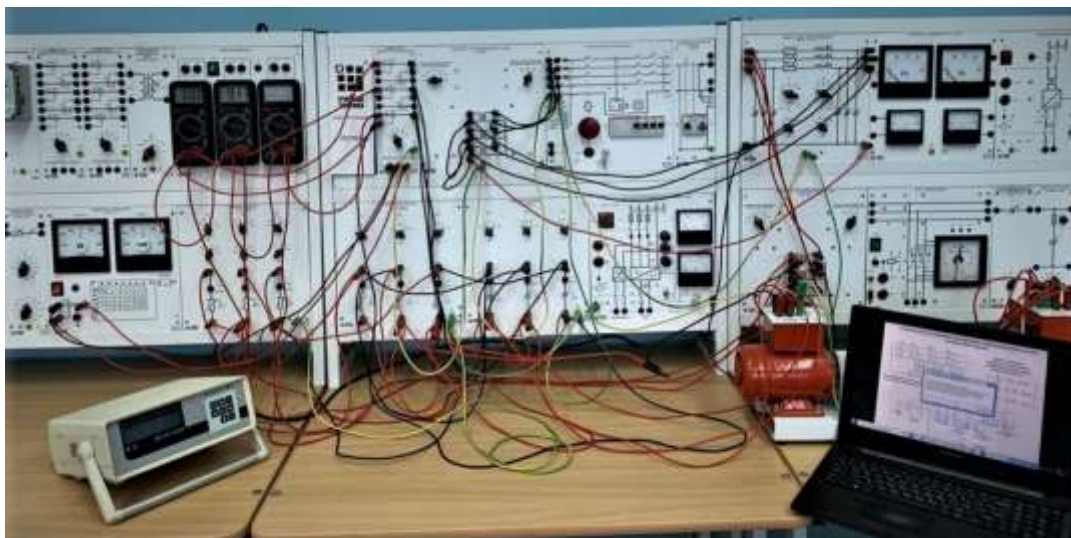


Рисунок 4.3 - Конструктивное исполнение лабораторной установки

Состав лабораторной установки:

1. Модель воздушной трехфазной линии электропередач ВЛ 10 кВ;
2. Модель воздушной трехфазной линии электропередач ВЛ 0,4 кВ;
3. Модель воздушной однофазной линии электропередач ВЛ 0,4 кВ;
4. Модель трансформатора 110/10 кВ;
5. Модель трансформатора 10/0,4 кВ;
6. Модель индуктивной нагрузки;
7. Модель емкостной нагрузки;
8. Модель осветительной нагрузки;
9. Модель двигательной нагрузки;
10. Измеритель качества электрической энергии Ресурс UF2M;
11. Персональный компьютер.

Структурная схема лабораторной установки исследования нейростевого регулятора напряжения на рисунке 4.5.

Описание и технические характеристики функциональных блоков лабораторной установки представлены в таблице 4.1.

Программа эксперимента

Основные этапы

1. Проведение физического моделирования режимов работы электрической сети с учетом графиков электрических нагрузок (рисунок 4.6);
2. Обучение нейронной сети на основании данных о показателях качества электрической энергии за условный период с 1 по 4 год;
3. Прогнозирование отклонения напряжения на зажимах регулировочного трансформатора (Т2 рисунок 4.4) на условный 5 год и вычисление ступени регулирования напряжения;
4. Выполнение расчета отклонения напряжения в имитационной модели на зажимах нагрузки наиболее удаленного потребителя с учетом полученной величины регулирования напряжения в п.3. В случае соответствия расчетного

значения нормативному выполняется п. 5. Если значение не соответствует, повторно выполняется п.3.

5. Реализация на физической модели переключения на регулировочном трансформаторе и измерение показателей качества электрической энергии.

6. Выполнение вывода о точности регулирования напряжения системой управления качеством электрической энергии.

На рисунке 4.4 представлена однолинейная электрическая схема физической модели исследуемой сети.

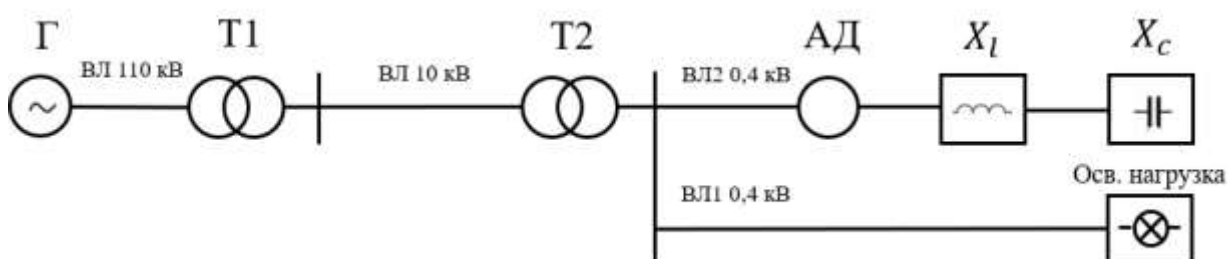


Рисунок 4.4 – Однолинейная электрическая схема исследуемой сети

Электрическая схема физической модели исследуемой сети представляет собой распределительную электрическую сеть 110/10/0,4 кВ. Электрическая энергии передается по воздушным линиям электропередач протяженностью ВЛ 110кВ – 3 км, ВЛ1 0,4кВ - 5км, ВЛ2 0,4кВ – 15 км. В качестве нагрузки используются: трехфазный асинхронный двигатель, индуктивная нагрузка, емкостная нагрузка и осветительная нагрузка.

В результате проведенного экспериментального исследования были построены характеристики изменения отклонения напряжения с применением нейросетевого регулирования и без него на зажимах вторичной обмотки трансформатора (рисунок 4.7) и на зажимах осветительной нагрузки (рисунок 4.8)

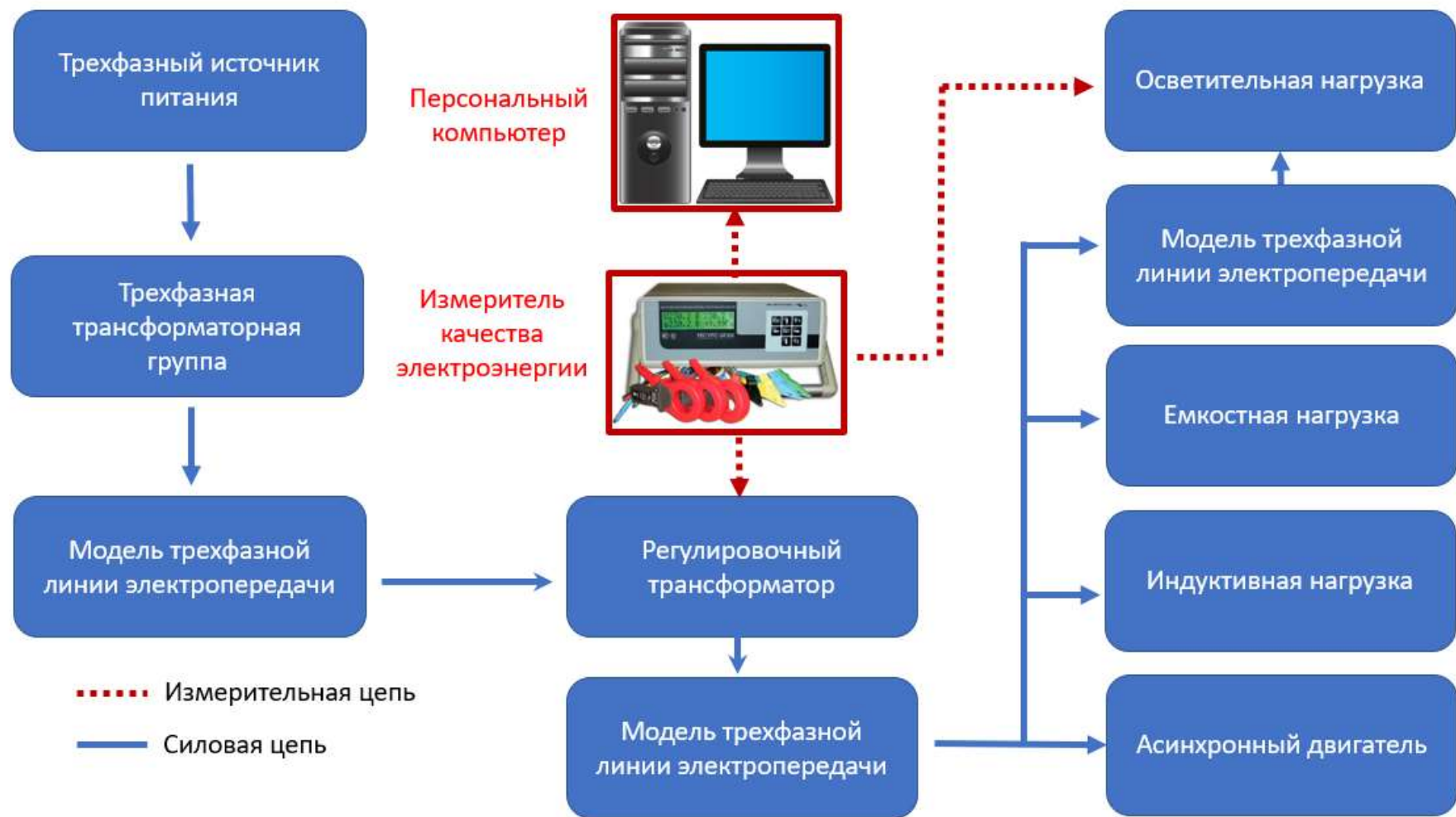


Рисунок 4.5 - Структурная схема лабораторной установки исследования нейростевого регулирования напряжения

Таблица 4.1 – Технические характеристики функциональных блоков электрической сети

№ п/п	Наименование	Технические характеристики
1	Трёхфазный источник питания. Предназначен для питания комплекса трёхфазным переменным напряжением.	400 В ~; 16 А Ток срабатывания УЗО - 30 мА
2	Трёхфазная трансформаторная группа	3 х 80 В-А; 242, 235, 230, 126, 220, 133, 127 В/ 230 В (звезда)
3	Регулировочный трансформатор.	250ВА 3х220/3х90... 140В
4	Модель линии электропередачи. Предназначена для моделирования ЛЭП переменного тока.	400 В; 50 Гц; 3х0,3 А индуктивность/активное сопротивление фазы 0...1,5 Гн/0...250 Ом, ёмкость между фазой и землёй 0...0,45 мкф
5	Активная нагрузка Предназначена для моделирования однофазных и трёхфазных потребителей активной мощности.	220/380 В; 50Гц; 3х0...50 Вт;
6	Ёмкостная нагрузка Предназначена для моделирования опережающей реактивной мощности в электрической системе	220/380 В; 50 Гц; 3х40 ВАр
7	Индуктивная нагрузка. Предназначена для моделирования потребителя отстающей реактивной мощности в электрической системе.	220/380 В; 50Гц; 3х40 ВАр
8	Осветительная нагрузка. Предназначена для моделирования и исследования характеристик узла комплексной электрической нагрузки.	220/380 В; 50 Гц; 3х45 Вт
9	Асинхронный двигатель	120 Вт; 220/380 В; $\cos \phi=0,7$ ; 1360 мин <sup>-1</sup>
10	Измеритель мощностей. Предназначен для измерения активной и реактивной мощностей в трёхфазных цепях.	0...600ВА 0...1 А 0...600В
11	Измеритель показателей качества электрической энергии	Трёхфазный / ~380 В Ресурс UF-2М.
12	Блок ввода/вывода цифровых сигналов	8 входов типа «сухой контакт»; 8 релейных выходов
13	Коннектор	8 аналог, диф. входов; 2 аналог, выхода; 8 цифр, входов/ выходов
14	Персональный компьютер.	IBM-совместимый, Windows 9*, монитор, мышь, клавиатура, плата сбора информации PCI 6024E (PCI 6023E)

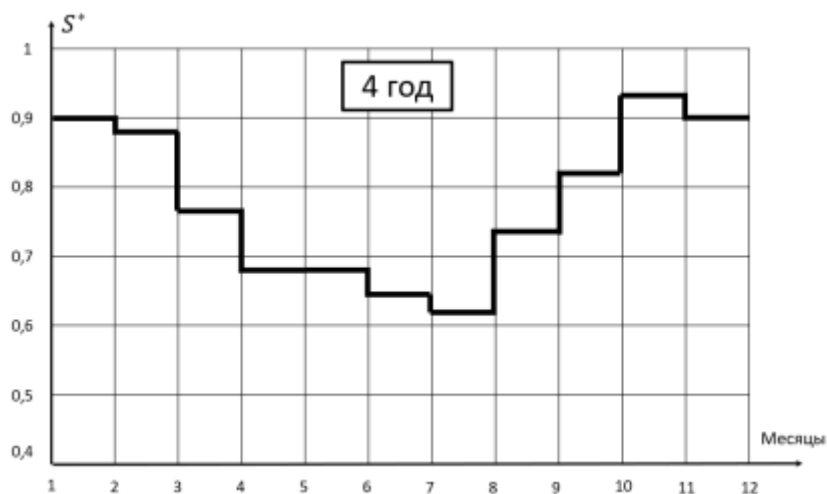
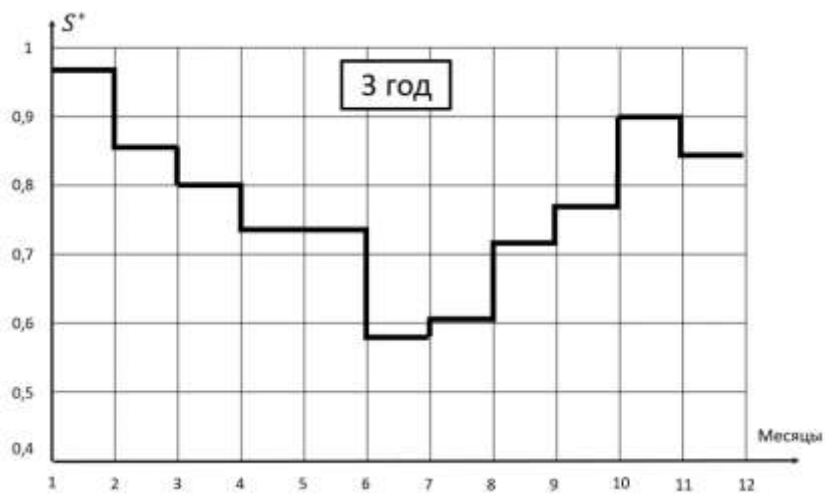
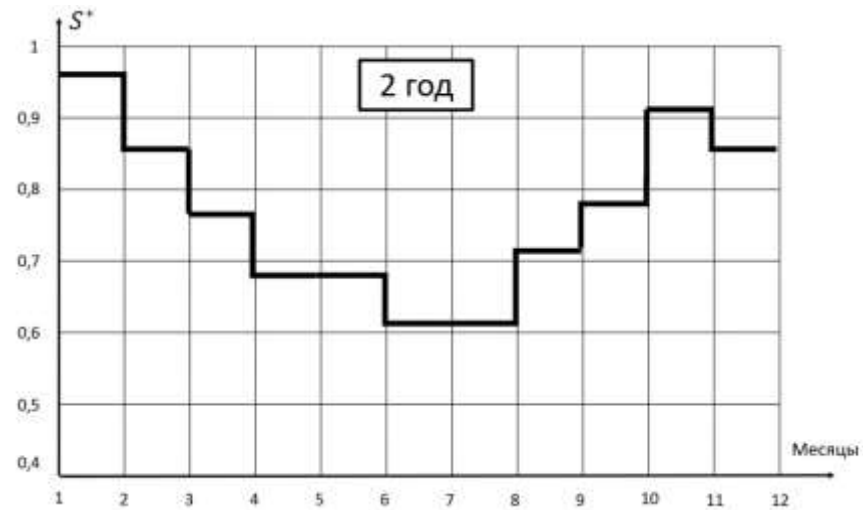
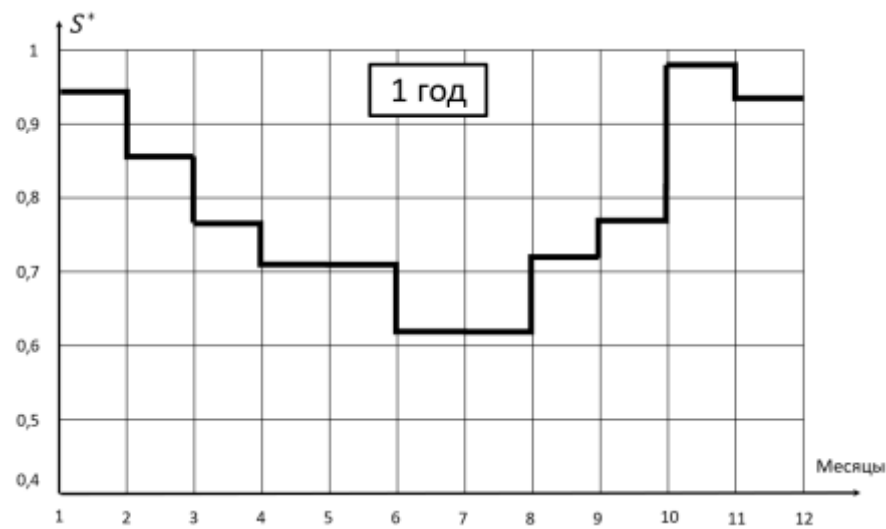


Рисунок 4.6 – Графики электрических нагрузок сельскохозяйственных потребителей

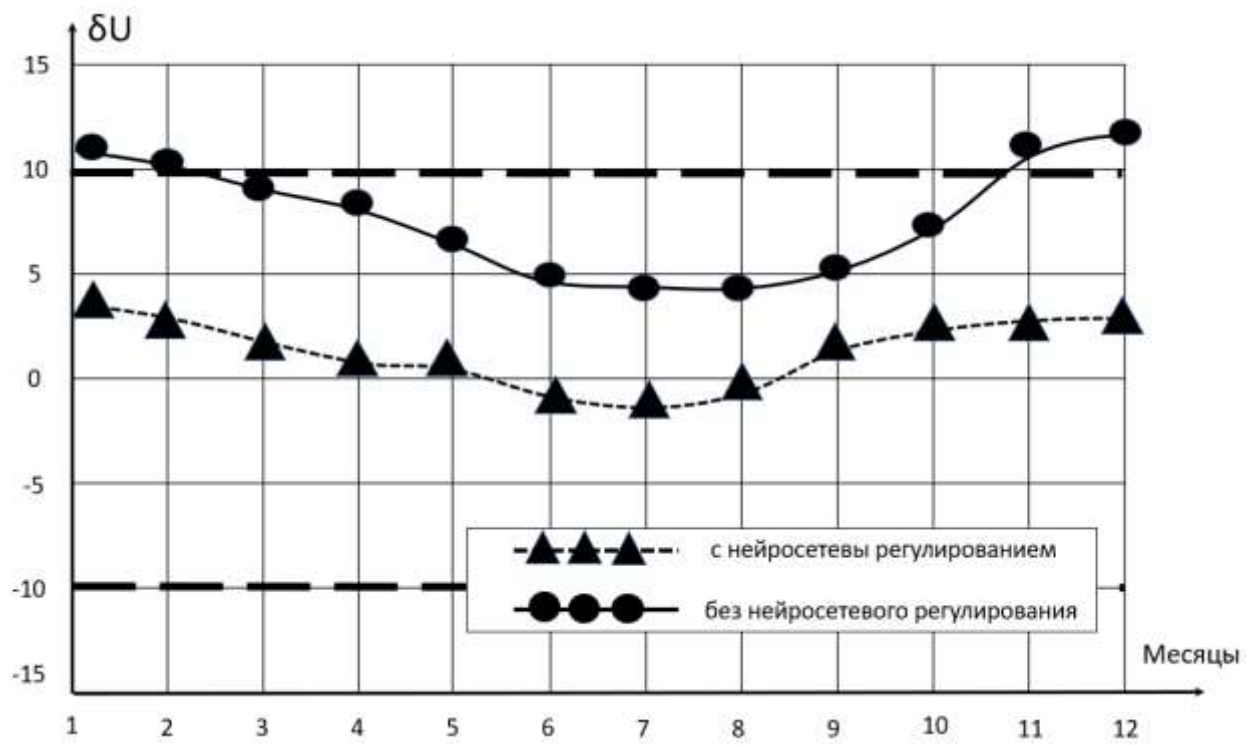


Рисунок 4.7. - Изменение отклонения напряжения на зажимах вторичной обмотки трансформатора

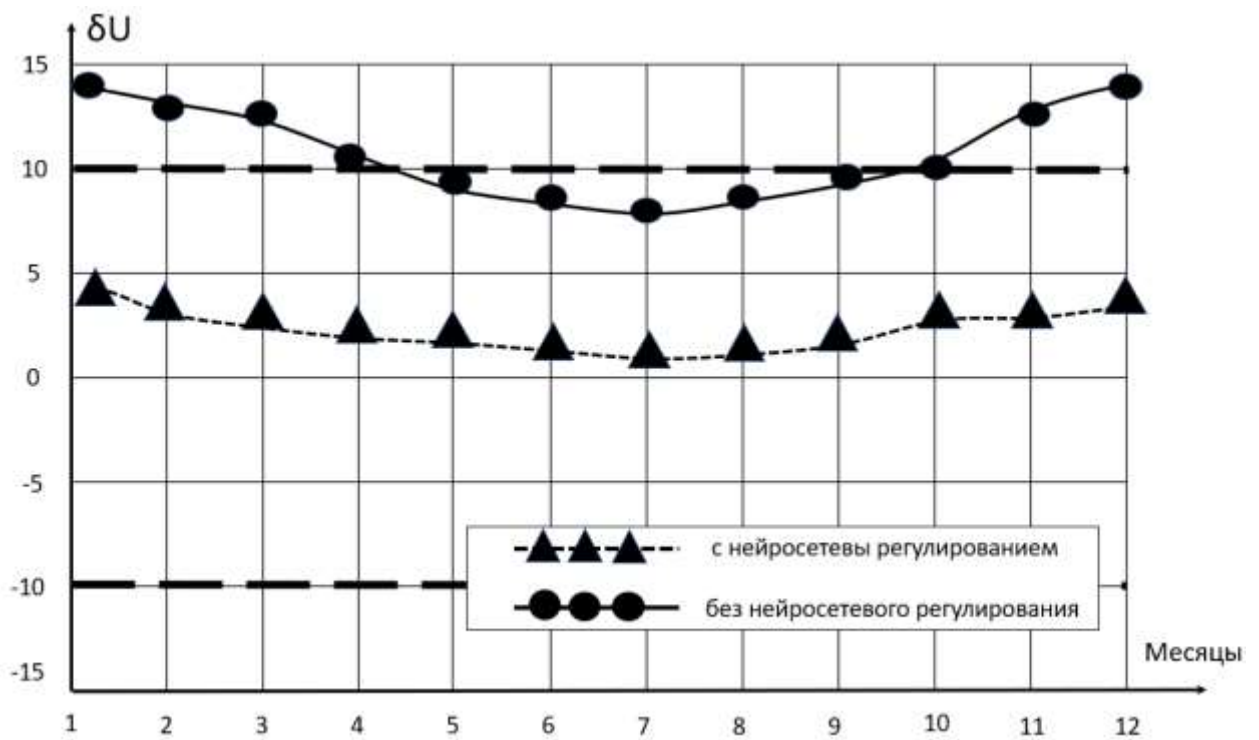


Рисунок 4.8 - Изменение отклонения напряжения на зажимах осветительной нагрузки



Отклонение напряжения вычислялось по формуле [56]:

$$\delta U = \frac{U_0 - U_{\text{изм}}}{U_0} \cdot 100, \quad (4.1)$$

где  $U_0$  - напряжение равное стандартному напряжению в соответствии с ГОСТ, В;  $U_{\text{изм}}$  – измеренное значение, В.

Согласно полученным результатам, прослеживается зависимость отклонения напряжения от электрической нагрузки, распределенной по месяцам. Были установлены периоды максимальных и минимальных отклонений напряжения и их величина.

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 осветительной 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 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.

## 5. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СИСТЕМЫ НЕЙРОСЕТЕВОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

### 5.1. Оценка экономических параметров управления качеством электроэнергии сельскохозяйственных потребителей

Агропромышленный комплекс (АПК) является ключевым элементом экономической и продовольственной безопасности государства [131-133]. В настоящее время АПК имеют в своем составе высокотехнологичное и энергоемкое оборудование. Стоимость оборудования исчисляется миллионами долларов. Для обеспечения надежного и бесперебойного энергоснабжения АПК требуется поддержание нормируемого качества электрической энергии (КЭ) в распределительных сетях в соответствии с ГОСТ [120-122]. Качество электрической энергии оказывает значительное влияние на производительность технологического оборудования, энергоэффективность и его технико-экономические показатели.

В результате нарушения электроснабжения объектов АПК возможны случаи электротравматизма людей и животных, в следствии отказа защитных устройств, элементов заземления и зануления. В результате нарушения технологического процесса происходят остановки электроприводов поточных линий, что приводит к большому экономическому ущербу.

Экономический ущерб от нарушения электроснабжения является основополагающим критерием при обосновании выбора элементов управления надежностью электроснабжения при проектировании. Он определяется по минимуму приведенных годовых затрат  $Z$ , учитывающая вероятный ущерб  $У$  от остановки технологического оборудования и может быть определен следующей формулой [134]:

$$Z = p_n \cdot K + И + Z_k + У \quad (5.1)$$

где  $Z_k$  – затраты на управление КЭ,  $I$  – затраты на эксплуатацию оборудования,  $p_n$  – нормирующий коэффициент равный 0,12;  $K$  – единовременные капитальные вложения.

Степень экономического ущерба зависит от степени энерговооруженности предприятия, сложности схем технологических цепочек, количества животных и пр. и складывается из составляющих по отдельным технологическим процессам.

Важным является момент нарушения электроснабжения, который может совпадать с процессом в технологической цепочке сельскохозяйственного производства. Например, для животноводческих ферм и комплексов молочного направления, значительный ущерб возможен в момент процесса доения.

Ожидаемый годовой недоотпуск электрической энергии сельскохозяйственному потребителю при отключении питания на подстанциях и распределительных пунктах определяется [134]:

$$\Delta W_{\Pi} = \frac{W_{\Pi}}{8760} N \tau, \quad (5.2)$$

где  $W_{\Pi}$  – величина годового потребления активной электрической энергии рассматриваемым потребителем, кВт·ч;  $N$  – количество внезапных отключений потребителя в год, откл./год;  $\tau$  – средняя продолжительность одного внезапного отключения, ч.

Тогда величина ожидаемого ущерба сельскохозяйственного потребителя можно представить в следующем виде [134]:

$$Y_{\Pi} = y_0 \Delta W_{\Pi}, \quad (5.3.)$$

Для обеспечения поддержания требуемого КЭ проводят специальные организационные мероприятия и разрабатывают технические средства мониторинга и управления КЭ.

Технические затраты на функционирование систем управления КЭ определяются следующими параметрами:

- эксплуатационными расходами по поддержанию нормативных показателей КЭ;
- временем реакции систем мониторинга на определение отклонений параметров КЭ в распределительной электрической сети;
- временем обработки информации интеллектуальными модулями мониторинга КЭ и поиска причин отклонения параметров КЭ;
- объемом восстановительных работ при отклонении КЭ;
- качеством прогнозирования параметров КЭ.

Эффективность внедрения систем управления КЭ сельскохозяйственных потребителей возможна при минимизации затрат на внедрение и эксплуатацию, а также при обеспечении поддержания требуемых параметров КЭ. В настоящее время отсутствуют универсальные методы оценки экономической эффективности внедрения подобных технологий в АПК, позволяющие учитывать комплектность технологического оборудования и режимы его работы. Разработка такой методологии ведет к построению оптимального уровня управляемости системы с позиции поддержания нормируемых показателей КЭ.

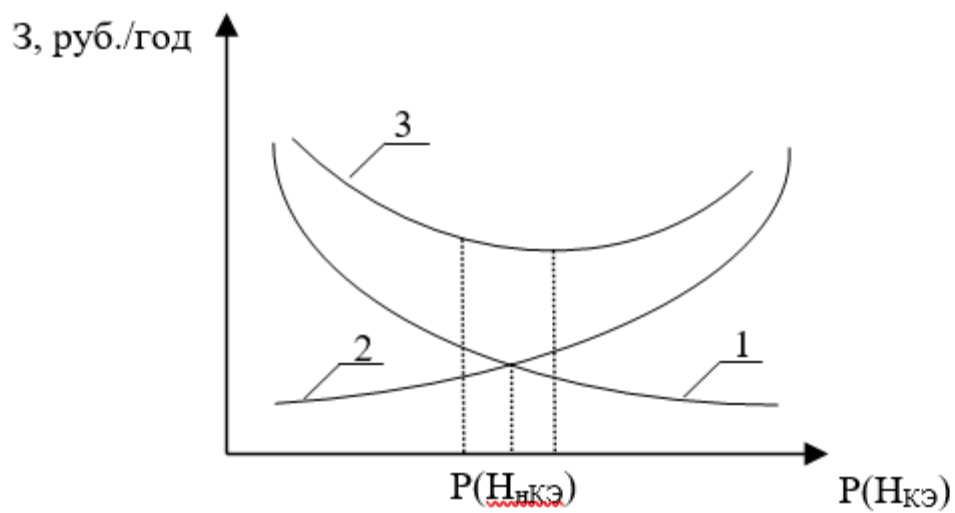
При выборе и обосновании экономической эффективности управления КЭ необходимо руководствоваться следующими критериями:

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

$$H_{дкЭ} \geq H_{нкЭ}$$

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

На основании этого, характеристика, учитывающая затраты на внедрение системы управления КЭ не ниже нормативного, представлена на рисунке 5.1.



1- снижение нормируемого показателя КЭ; 2 - дополнительные затраты на повышение КЭ; 3 - полные годовые затраты

Рисунок 5.1 – Аналитические зависимости экономических затрат от надежности системы электроснабжения

Оптимальный уровень затрат и надежности системы электроснабжения соответствует минимуму (точка  $N_{нкэ}$ ). Экономическая эффективность управления КЭ будет определяться уровнем затрат соответствующих поддержанию нормативных значений КЭ.

## 5.2. Определение экономических потерь при снижении напряжения в узле электрической нагрузке

По результатам исследований [135-139] установлено, что отклонение напряжения в сельских распределительных электрических сетях происходит наиболее часто по сравнению с изменением частоты и другими параметрами КЭ. Отклонение напряжения в значительной степени оказывает влияние на работу асинхронных двигателей, являющихся ключевым элементом в различных приводных механизмах сельскохозяйственных технологий, а также на осветительные и термические установки.

Нагрузка асинхронных двигателей зависит от отклонения напряжения согласно выражению [134]:

$$P_{АД} = P_{дв}^{ном} \left( 1 - k_{загр} \frac{U_{ном}^2}{U^2} S_{ном} \right), \quad (5.4)$$

где  $P_{дв}^{ном}$  – номинальная мощность асинхронного двигателя при 100% нагрузке;  $k_{загр}$  – коэффициент загрузки двигателя;  $S_{ном}$  – номинальное скольжение асинхронного двигателя;  $U_{ном}$ ,  $U$  – номинальное и измеренное напряжение, соответственно.

Нагрузка термических установок [137]:

$$P_{терм} = P_{терм}^{ном} \left[ 1 - 2,14 \left( 1 - \frac{U}{U_{ном}} \right) \right], \quad (5.5)$$

Нагрузка осветительных установок []:

$$P_{осв} = P_{осв}^{ном} \left( \frac{U}{U_{ном}} \right)^{1.53}, \quad (5.6)$$

Суммарный ущерб потребителям из-за снижений напряжения в сети определяется, в основном, четырьмя факторами [134]:

1) регулирующим эффектом нагрузки предприятия по напряжению, характеризующим зависимость его электрической нагрузки от уровня напряжения в сети;

2) длительностью работы предприятия при пониженном напряжении;

3) снижением объема производства продукции за время работы предприятия при пониженном напряжении; 4) возможностью восполнения невыработанной продукции после восстановления напряжения в течение той же рабочей смены.

Проведем расчет экономических потерь при снижении напряжения в узле электрической нагрузке, питающей сельскохозяйственное предприятие согласно методике [134].

Таблица 5.1 – Характеристика узла электрической нагрузки питающего сельскохозяйственное предприятие

2	Максимальная электрическая нагрузка в i-м узле, МВт ( $N_{нагр}^{max}$ )	0,5
5	Отраслевой характер нагрузки	смешанный
6	Номинальное напряжение в узле, кВ (U)	380
8	Регулирующий эффект нагрузки по напряжению, отн.ед ( $k_p^U$ )	1,7
9	Удельный ущерб от снижения напряжения от невыработки продукции, руб/(кВт·ч) [117]	3,43

Степень ограничения нагрузки из-за работы с пониженным напряжением:

$$\varepsilon(U) = k_p^U \left(1 - \frac{U}{U_{ном}}\right) \quad (5.7)$$

$$\varepsilon(U) = 1,7 \left(1 - \frac{342}{380}\right) = 0,17$$

Абсолютное снижение максимальной нагрузки, МВт:

$$\Delta N = \varepsilon N_{\text{нагр}}^{\text{max}} \quad (5.8)$$

$$\Delta N = 0,17 \cdot 0,5 = 0,085$$

Длительность ограничения нагрузки в течении суток, ч/сут:

$$\tau_{\text{огр}}^{\text{сист}}(\varepsilon) = 72,956\varepsilon^{0,128} - 38,339 \quad (5.9)$$

$$\tau_{\text{огр}}^{\text{сист}}(\varepsilon) = 72,956 \cdot 0,085^{0,128} - 38,339 = 14,87$$

Плотность ограничения части графика нагрузки, отн.ед:

$$\gamma(\varepsilon) = 0,72\varepsilon^{0,74} \quad (5.10)$$

$$\gamma(\varepsilon) = 0,72 \cdot 0,085^{0,74} = 0,116$$

Снижение электропотребления в течении года из-за работы с пониженным напряжением, млн кВт·ч/год:

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{год}} = 365 \cdot \Delta N \cdot \tau_{\text{огр}}^{\text{сист}} \cdot \gamma(\varepsilon) \cdot 10^{-3} \quad (5.11)$$

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{год}} = 365 \cdot 0,085 \cdot 14,87 \cdot 0,12 \cdot 10^{-3} = 0,0553$$

Годовой ущерб потребителям из-за работы с пониженным напряжением, млн руб/год:

$$\Delta \mathcal{Z}_{\text{ущ}}^U = \Delta \mathcal{E}_{\text{год}} \cdot 3,343 \quad (5.12)$$

$$\Delta \mathcal{Z}_{\text{ущ}}^U = 0,0553 \cdot 3,343 = 0,185$$

Таким образом снижение напряжения в узле электрической нагрузки на 12% приводит к годовому ущербу предприятия на 949 тыс. руб/год

Внедрение систему управления КЭ позволяет обеспечить регулирование напряжения не более 5% от номинального значения. В соответствии с этим повторим расчет экономических потерь при снижении напряжения в узле электрической нагрузке на 5%.

Степень ограничения нагрузки из-за работы с пониженным напряжением:

$$\varepsilon_{\text{КЭ}}(U) = 1,7 \left( 1 - \frac{375}{380} \right) = 0,022$$

Абсолютное снижение максимальной нагрузки, МВт:

$$\Delta N_{\text{КЭ}} = 0,085 \cdot 0,5 = 0,0425$$

Длительность ограничения нагрузки в течении суток, ч/сут:



$$\tau_{\text{огр}}^{\text{сист}} \text{КЭ}(\varepsilon) = 72,956 \cdot 0,022^{0,128} - 38,339 = 6,42$$

Плотность ограничения части графика нагрузки, отн.ед:

$$\gamma_{\text{КЭ}}(\varepsilon) = 0,72 \cdot 0,022^{0,74} = 0,043$$

Снижение электропотребления в течении года из-за работы с пониженным напряжением, млн кВт·ч/год:

$$\Delta \text{ЭКЭ}_{\text{год}} = 365 \cdot 0,0425 \cdot 6,42 \cdot 0,043 \cdot 10^{-3} = 0,0042$$

Годовой ущерб потребителям из-за работы с пониженным напряжением, млн руб/год:

$$\Delta \text{ЗКЭ}_{\text{ущ}}^U = 0,0042 \cdot 3,343 = 0,0143$$

Таким образом, экономия в результате обеспечения поддержания напряжения в узле электрической нагрузки питающей сельскохозяйственное предприятие, млн руб/год:

$$S_{\text{экКЭ}} = \Delta \text{З}_{\text{ущ}}^U - \Delta \text{ЗКЭ}_{\text{ущ}}^U = 0,185 - 0,0143 = 0,17$$

### 5.3 Определение затрат на внедрение системы нейросетевого регулирования напряжения

Для реализации технологии управления качеством электрической энергии необходим комплекс оборудования, осуществляющий:

1. Измерение параметров КЭ в соответствии с ГОСТ 30804.4.30-2013 (ГОСТ Р 51317.4.30–2008) (класс А), ГОСТ 32144-2013 (ГОСТ Р 54149-2010);
2. Обработку и анализ параметров КЭ;
  - Отклонение частоты;
  - Медленные изменения напряжения;
  - Колебания напряжения и фликер;
  - Несинусоидальность напряжения;
  - Несимметрия напряжений в трехфазных системах;
  - Прерывания напряжения;

- Провалы напряжения и перенапряжения;
  - Импульсные напряжения
3. Передачу информации о КЭ по линиям связи (АСКУЭ);
    - ModBus TCP – протокол для передачи данных в TCP/IP сетях
  4. Прогнозирование параметров КЭ и выработку управляющих команд в автоматическом режиме;
    - Программно-вычислительный комплекс, осуществляющий прогнозирование и реализацию методов нейросетевого регулирования напряжения в системе управления КЭ (ПВК КЭ).

Для обеспечения нейросетевого регулирования напряжения в управлении качеством электрической энергии подберем комплект оборудования:

Таблица 5.2 – Комплект оборудования для системы управления КЭ сельскохозяйственных потребителей

№ п/п	Наименование	Цена с НДС, тыс.руб.
1	Анализатор качества электроэнергии PM175 SATEC	130
2	Программно-вычислительный комплекс, осуществляющий прогнозирование и реализацию методов нейросетевого регулирования напряжения в системе управления КЭ (ПВК КЭ)	100
	Итого	230

Рассчитаем капитальные затраты на внедрение ПВК КЭ по формуле [137]:

$$K = Ц + M + T, \quad (5.13)$$

где Ц – стоимость комплекта оборудования, руб; М – затраты на монтаж оборудования, руб. (принимается из расчета 10% от стоимости оборудования); Т – транспортные расходы, руб. (принимается из расчета 5% от стоимости оборудования).

Выполним расчет капитальных затрат, тыс.руб:

$$K = 230 + 0,1 \cdot 230 + 0,05 \cdot 230 = 264,5$$

Для расчета эксплуатационных издержек воспользуемся выражением [134]:

$$\mathcal{E} = A + TP + Пр, \quad (5.14)$$

где А – амортизационные отчисления, руб.; Тр – расходы на ремонт и техническое обслуживание ПВК КЭ, руб.; Пр – прочие прямые расходы, руб.

Отчисления на амортизацию вычисляется согласно выражению [137]:

$$A = H_A \cdot K, \quad (5.15)$$

где  $H_A$  – норма отчисления на амортизацию (согласно [137] определяется как 4% от капитальных затрат).

Затраты на ремонт и техническое обслуживание ПВК КЭ [137]:

$$TP = H_{TP} \cdot K, \quad (5.16)$$

где  $H_{TP}$  – норма отчисления на технический осмотр и технический ремонт (согласно [137] принимается равная 5%).

Прочие затраты вычисляются в зависимости от величины эксплуатационных затрат согласно выражению [137]:

$$\text{Пр} = \text{Н}_{\text{пр}} \cdot (\text{А} + \text{ТР}), \quad (5.17)$$

где  $\text{Н}_{\text{пр}}$  – отчисления на прочие расходы (согласно [137] принимаем 5%).

Выполним расчет эксплуатационных издержек, тыс.руб:

$$\text{А} = 0,04 \cdot 264,5 = 10,6$$

$$\text{ТР} = 0,05 \cdot 264,5 = 13,2$$

$$\text{Пр} = 0,05 \cdot (10,6 + 13,2) = 1,2$$

$$\text{Э} = 10,6 + 13,2 + 1,2 = 25$$

#### 5.4. Расчет экономического эффекта от внедрения системы нейросетевого регулирования напряжения

Согласно выше проведенным расчетам установлено, что за счет внедрения системы нейросетевого регулирования напряжения в узле электрической нагрузки, питающей сельскохозяйственных потребителей, обеспечивается снижение отклонения напряжения у потребителей с 10% до 2%. В результате этого годовой ущерб потребителям из-за работы с пониженным напряжением снижается с 185 до 14,3 тыс. руб/год. Однако, для внедрения этой системы требуются затраты на покупку дополнительного оборудования (таблица 5.2) на сумму 230 тыс. руб., затраты на монтаж и транспортные расходы на общую сумму 34,5 тыс. руб., а также эксплуатационные издержки на сумму 25 тыс. руб.

Проведем расчеты окупаемости по годам, результаты представим в таблице 5.3

Таблица 5.3 Расчет окупаемости системы нейросетевого регулирования напряжения

Показатели	Единица измерения	Годы				
		1	2	3	4	5
<b>Результаты</b>						
Прирост прибыли за счет экономии затрат	тыс. руб.	170,7	170,7	170,7	170,7	170,7
<b>Затраты</b>						
Приобретение оборудования	тыс. руб.	230	-	-	-	-
Монтаж и транспортные расходы	тыс. руб.	34,5	-	-	-	-
Эксплуатационные издержки	тыс. руб.	25	25,7	26,4	27,1	27,9
Всего затраты:	тыс. руб.	289,5	25,7	26,4	27,1	27,9
<b>Экономический эффект</b>	тыс. руб.	-	145,0	144,3	143,6	142,8
Превышение результата над затратами	тыс. руб.	-118,8	145,0	144,3	143,6	142,8
Тоже с нарастающим итогом	тыс. руб.	-118,8	26,2	170,7	314,3	457,1

Согласно полученным данным (табл. 5.3) в первый год внедрения системы управления КЭ для сельскохозяйственных потребителей, наблюдается отрицательный экономический эффект, однако уже на второй год затраты окупаются и к пятому году экономический эффект составляет 457,1 тыс. руб.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе проведены теоретические и экспериментальные исследования и предложены новые решения, позволяющие повысить эффективность и надежность функционирования систем электроснабжения сельскохозяйственных потребителей за счет использования системы нейросетевого регулирования напряжения. Основные результаты 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.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Будзко И.А., Лещинская Т.Б., Сукманов В.И. Электроснабжение сельского хозяйства. М.: Колос, 2000. - 537 с.
2. Стребков, Д.С. Перспективные направления по развитию энергетической базы сельского хозяйства [Текст] / Д.С. Стребков, А.В. Тихомиров // Достижения науки и техники АПК, 2004. - № 6. - С. 22-24
3. Стребков, Д.С. О стратегии энергетического обеспечения сельского хозяйства [Текст] / Д.С. Стребков // Техника в сельском хозяйстве, 2004. - № 2.-С. 6-8
4. Будзко И.А., Левин М. С. Электроснабжение сельскохозяйственных предприятий и населенных пунктов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Агропромиздат, 1985. 320 с.
5. Арзамасцев Д. А. Снижение технологического расхода электроэнергии в электрических сетях / Д.А. Арзамасцев, А.В. Липес. — М.: Высшая школа, 1989. - 127с.
6. Будзко И.А., Степанов В.Н. Электрически линии и сети сельскохозяйственного назначения: Уч. пособ. М.: Энергоатомиздат, 1988.- 488 с.
7. Будзко И.А., Гессен В.Ю., Левин М.С. Электроснабжение сельскохозяйственных предприятий и населенных пунктов. — М.: Колос, 1975.-187 с.
8. Гордеев А. С., Огородников Д. Д., Юдаев И. В. Энергосбережение в сельском хозяйстве/под ред. д. т. н., проф. Гордеева А.С. -СПб.: Лань, 2014. -400 с.
9. Энергетический аудит в сельском хозяйстве: методические основы./А.С. Гордеев, С.В. Кириллов, Г.И. Попов, В.П. Шелякин. - Мичуринск: ООО «Бис», 2013. -164 с.

10. Лещинская Т.Б., Наумов И.В. Электроснабжение сельского хозяйства. – М.: Колос, 2008.
11. Шпиганович, А.Н. Оценка оборудования по уровню надежности на примере систем электроснабжения сталеплавильных производств [Текст] / А.Н. Шпиганович, А.А. Шпиганович, Е.П. Зацепин // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2017. № 1. – С. 38-46.
12. Шпиганович, А.Н. Оценка надежности неразветвленных систем [Текст] / А.Н. Шпиганович // Горный журнал. Известия вузов. – 1983.– №5. – С. 52-64.
13. Зацепина В.И. Оценка функционирования систем электроснабжения с использованием суммарных потоков// Промышленная энергетика. 2007. №2 С 26-28.
14. Зацепина В.И., Зацепин Е.П. Статистический анализ искажений напряжения в системах передачи, распределения и потребления электрической энергии// Вести высших учебных заведений Черноземья. 2011. №3. С. 24-28.
15. Зацепина В.И., Шпиганович А.А. Математическое описание функционирования элементов систем электроснабжения // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2008. №2. С. 239-242.
16. Виноградов В.В., Виноградова А.В., Большев В.Е. Устройства и система мониторинга надежности электроснабжения и отклонения напряжения в электрических сетях 0,38 кВ // Вестник НГИЭИ. 2017. № 11 (78). С. 69-81.
17. Применение мультиконтактных коммутационных систем с мостовой схемой и четырьмя выводами в схемах электроснабжения потребителей и кодирование возникающих при этом ситуаций. Виноградов А.В., Виноградова А.В., Марин А.А.. Вестник НГИЭИ. 2019. № 3 (94). С. 41-50.

18. Сокращение сроков выполнения технологических присоединений к электрическим сетям посредством совершенствования структуры электросетевых компаний. Виноградов А.В., Баскаева А.К. В сборнике: Актуальные вопросы энергетики в АПК. Материалы всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Ответственный редактор О. А. Пустовая, редактор Е. С. Дубкова. 2019. С. 129-131.

19. Использование электроэнергии в сельском хозяйстве и электроснабжение сельскохозяйственных районов: Сб. науч. тр./Науч. ред. А. В. Луковников: МИИСП. М.: 1984. - 112 с.

20. Наумов И. В. Электроснабжение. — Иркутск: ИГСХА, 2003. 189с.

21. Повышение надежности электроснабжения и электроустановок в сельском хозяйстве. — Челябинск: ЧИМЭСХ, 1985. — 101 с.

22. Рекомендации по повышению надежности электроснабжения в колхозах и совхозах. зерноград: ВНИПТИМЭСХ, 1976. - 43 с.

23. Федосенко Р. Я, Мельников А. Я. Энергетическая эксплуатационная надежность электросетей сельскохозяйственного назначения. — М.: Энергия, 1977.-320 с.

24. Корчемный Н. А. Повышение надежности электрооборудования в сельском хозяйстве. — Киев: Урожай, 1988. — 224 с.

25. Наумов, И.В. Анализ уровня надёжности сельских распределительных электрических сетей напряжением 10 кВ (на примере филиала восточных электрических сетей ОАО "ИЭСК") [Текст] / И.В. Наумов, А.В. Ланин // Вестник ИрГСХА, выпуск № 40. - 2010 - С. 115-120

26. Стребков, Д.С. О возможности однопроводной передачи электроэнергии [Текст] / Д.С. Стребков, А.И. Некрасов, С.В. Авраменко, О.А. Роцин // Техника в сельском хозяйстве, 2004. - № 4. - С. 35-36

27. Бородин И.Ф. Потери электроэнергии в сельских сетях и пути их снижения / И.Ф. Бородин, А.П. Сердешнов // Техника в сельском хозяйстве. - 2002. №1. — С.23-26.

28. Губанов М.В., Лещинская Т.Б. Состояние сельской электрификации и ее перспективы / Механизация и электрификация, №3, 2000, с.2

29. Дьяченко Ю.А. Выбор средств обеспечения надежности электроснабжения птицефабрики по многокритериальной модели : автореф. дис.канд.техн. наук: 26.01.09/ Дьяченко Ю.А. — Москва, 2008. 17 с.

30. Епишков Н.Е. Энергосбережение — базовая технология создания эффективного сельского хозяйства / Н.Е. Епишков // Вестник энергосбережения Южного Урала. 2001. - №1.

31. Методика энергетического мониторинга сельскохозяйственных объектов, выявление резервов и потенциала экономии топливноэнергетических ресурсов ТЭР / В. Р. Краусп, В. Н. Расстригин, Б. П. Коршунов и др. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2001. – С. 35.

32. Государственная программа развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2013–2020 годы. Утверждена постановлением Правительства от 14 июля 2012 года №717.

33. О производстве мяса и мясопродуктов в России в 2018 году: [сайт] URL: <https://ab-centre.ru/news/o-proizvodstve-myasa-i-myasoproduktov-v-rossii-v-2018-godu>.

34. Стребков Д.С., Тихомиров Д.Д., Тихомиров А.В. Показатели потребления топливно-энергетических ресурсов в сельском хозяйстве и энергоемкости производства, их прогноз на период до 2030 года//Вестник ВНИИМЖ. 2018. № 4. С. 4-12.

35. Дегтерев, Г. П. Технологии и средства механизации животноводства : учеб. пособие для студентов вузов по специальности 311400 "Технология пр-ва и перераб. с.-х. продукции" / Г. П. Дегтерев. – М. : Столичная ярмарка, 2010. – 384 с. – (Учебники и учебные пособия для студентов вузов. Гр. УМО).

36. ЭБС Университетская библиотека ONLINE: Федоренко И.Я. Ресурсосберегающие технологии и оборудование в животноводстве / И.Я. Федоренко, В.В. Садов. – Изд-во «Лань», 2012. – 304 с.
37. ЭБС Университетская библиотека ONLINE: Хазанов Е.Е. Технология и механизация молочного животноводства / Е.Е. Хазанов, В.В. Гордеев, В.Е. Хазанов. – Изд-во «Лань», 2010. – 352 с.
38. Тимофеев Е.В., Эрк А.Ф., Судаченко В.Н., Размук В.А. Повышение энергоэффективности в сельском хозяйстве // Молодой ученый. 2017. №4. С. 213-217.
39. Особенности эксплуатации измерительных комплексов электрической энергии в сельских распределительных сетях. Шерязов С.К., Николаевский А.Б., Серов С.Л., Сидоренков В.А. Ползуновский вестник. 2009. № 1-2. С. 328-331.
40. Общая характеристика сетей и особенности потребителей электроэнергии в сельской местности. Мамарасулова Т.С. European Science. 2017. № 4 (26). С. 22-23.
41. Особенности эксплуатации сельских электрических сетей. Александров Н.В. Символ науки. 2016. № 12-2 (24). С. 25-29.
42. Системы управления качеством электроэнергии в условиях функционирования агропромышленного комплекса. Джапарова Д.А., Калинин В.Ф., Кочергин С.В. В сборнике: Импортзамещающие технологии и оборудование для глубокой комплексной переработки сельскохозяйственного сырья материалы I Всероссийской конференции с международным участием. 2019. С. 513-517.
43. Проектирование систем сельского электроснабжения. Костюченко Л.П. Красноярск, 2016. (3-е издание, исправленное и дополненное).
44. Оценка эффективности мероприятий по снижению несимметрии и несинусоидальности в распределительных сетях 0,4-10 кВ. Вендин С.В.,

Килин С.В., Соловьёв С.В. Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2018. № 2 (18). С. 3-19.

45. Прогнозирование числа аварийных отключений в сельских линиях электропередачи напряжением 10 кВ. Наумов, И.В., Ланин А.В., Николаенко Е.В. Вестник ИрГСХА. 2014. № 65. С. 91-96.

46. Анализ времени перерывов в электроснабжении сельских потребителей и методы его сокращения за счет мониторинга технического состояния линий электропередачи. Виноградов А.В., Васильев А.Н., Семенов А.Е., Синяков А.Н., Большев В.Е. Вестник ВИЭСХ. 2017. № 2 (27). С. 3-11.

47. Прогнозирование повреждаемости изоляторов в сельских линиях электропередачи для повышения эффективности комплектования запаса. Ланин А.В., Наумов И.В. В сборнике: Климат, экология, сельское хозяйство Евразии Материалы VII международной научно-практической конференции. 2018. С. 221-231.

48. Классификация объектов энергосистем по показателям надёжности и экономичности работы. Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Фарзалиев Ю.З. Энергетик. 2015. № 8. С. 27-29.

49. Применение сварочных инверторов в сельском хозяйстве. Баракин Н.С. Университет. Наука, идеи и решения. 2010. № 1. С. 117-119.

50. Система бесперебойного питания и автоматического управления комплектом облучателей-озонаторов "ОЗУФ" для птицеводческих помещений. Буклагина Г.В.. Инженерно-техническое обеспечение АПК. Реферативный журнал. 2010. № 2. С. 548.

51. Экспериментальное исследование бесперебойности электроснабжения сельских потребителей с применением альтернативных источников электроэнергии. Чиндяскин В.И., Абдюкаева А.Ф., Кислова Е.Ф., Большаков Е.В. Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2019. № 4 (78). С. 153-159.

52. Инвертор для зерносушилки (варианты). Титов М.С., Колинко В.П., Колинко П.В., Маяровский В.Ю., Куршева Е.В. Патент на полезную модель RUS 85992 21.04.2009.

53. Шевченко А.Ф., Приступ А.Г., Новокрещенов О.И., Топорков Д.М., Корнеев В.В. Особенности конструкции и проектирования энергоэффективных магнитоэлектрических электродвигателей общепромышленного назначения//Электротехника. 2014. № 12. С. 41-44.

54. Садиков Д.Г., Титов В.Г. Анализ гармонического состава тока и напряжения, потребляемого преобразователями частоты // Вестник Чувашского ун-та. - 2015. - № 2. - С. 116-121.

55. Бодылев А.С., Рябишина Л.А. Гармонические искажения при работе преобразователей частоты // Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов: межвуз. сб. науч. тр. (с междунар. участием). Уфа: Изд-во Энергодиагностика, 2018. 347 с.

56. Жежеленко, И.В., Саенко, Ю.Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 2000. - 252 с.

57. Признаки повреждения обмотки статора асинхронного генератора Богдан А.В., Потапенко И.А., Соболев А.Н. Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2007. № 8. С. 13-14.

58. Метод функциональной диагностики повреждений в обмотках статора асинхронных двигателей с оперативным анализом несимметрии полных сопротивлений обмоток. Пономарев В.А., Суворов И.Ф., Юдин А.С. Промышленная энергетика. 2008. № 7. С. 17-21.

59. Признаки повреждения обмотки статора асинхронного генератора. Богдан А.В., Потапенко И.А., Соболев А.Н. Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2007. № 8. С. 13-14.



60. Гуревич Э.И., Мамиконянц Л.Г. Некоторые задачи диагностики теплового состояния электрических машин. - "Электричество" №10, 1979.
61. Единое окно доступа к образовательным ресурсам: информационная система: [сайт]. URL: <https://elibr.gstu.by/>.
62. Ледин С.С. Интеллектуальные сети Smart Grid - будущее российской энергетики / С.С. Ледин // Автоматизация и ИТ в энергетике // М.: ООО „Амальгер”, 2010. № 11. - С. 4-9.
63. Адаптивное автоматическое регулирование напряжения в сельских электрических сетях 0,38 кВ. Голиков И.О., Виноградов А.В. Монография / Орел, 2017.
64. Повышение энергоэффективности в россии: внедрение интеллектуальной сети электроснабжения SMART GRID. Гаврилова А.А., Кузнецова С.Ю. Молодежный вестник ИрГТУ. 2018. Т. 8. № 3. С. 118-121.
65. 2017 IEEE INNOVATIVE SMART GRID TECHNOLOGIES - ASIA: SMART GRID FOR SMART COMMUNITY, ISGT-ASIA 2017. 7, Smart Grid for Smart Community / 2017.
66. Развитие электроэнергетических систем на базе концепции SMART GRID. Зайцев А.И. Электротехнические комплексы и системы управления. 2013. № 1. С. 71-76.
67. 2017 IEEE INNOVATIVE SMART GRID TECHNOLOGIES - ASIA: SMART GRID FOR SMART COMMUNITY, ISGT-ASIA 2017 7, Smart Grid for Smart Community / 2017.
68. A STUDY ON THE IMPROVEMENT OF SMART GRID SECURITY PERFORMANCE AND BLOCKCHAIN SMART GRID PERSPECTIVE/ Kim S.K., Huh J.H. Energies. 2018. Т. 11. № 8. С. 1973.
69. Концепция SMART GRID: перспективы инновационного развития распределительных сетей Амурской области. Михальченко И.Н., Савина Н.В. Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 9 (92). С. 201-208.

70. Перспективы и проблемы внедрения технологии SMART GRID в России. Боева Е.Ю., Куникеев Б.А., Щеголев Н.Л. Инженерный вестник. 2015. № 9. С. 16.

71. Разработка модели электрической сети для управления качеством электрической энергии. Савина Н.В., Бодруг Н.С. Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2016. Т. 16. № 4. С. 23-31.

72. Проблемы нормирования качества электроэнергии при переходе на интеллектуальные электроэнергетические системы. Савина Н.В., Бодруг Н.С. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. № 5-6. С. 19-26.

73. Автоматизированная система коммерческого учета электроэнергии: опыт и результат. Савина Н.В., Пузырева Е.В. Вестник Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки. 2014. № 67. С. 85-90.

74. Концепция мобильного измерительного комплекса для обследования электрических сетей. Виноградов А.В., Букреев А.В., Виноградова А.В., Семёнов А.Е., Большев В.Е. Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2019. № 3 (36). С. 35-39.

75. A SYSTEM FOR MONITORING THE NUMBER AND DURATION OF POWER OUTAGES AND POWER QUALITY IN 0.38 KV ELECTRICAL NETWORKS. Vinogradov A., Bolshev V., Vinogradova A., Kudinova T., Borodin M., Selesneva A., Sorokin N. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. Т. 866. С. 1-10.

76. Жежеленко, И.В. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях / И.В. Жежеленко, Н.Л. Рабинович, В.М. Божко Киев: Техника, 1981.- 160с.

77. Жежеленко, Н.В. Перспективы применения силовой электроники в энергетике / Н.В. Жежеленко, Г.Г. Жемеров, Е.И. Сокол, А.Ю. Бару, Ю.Л.

Шинднес // Техшчна електродинамша. Тематичний випуск "Силова електронша та енергоефектившсть". 2000. - чЛ. - С.3-8.

78. Жежеленко, Н.В. Нормирование уровней гармоник с учётом экономического ущерба / Н.В. Жежеленко // Электричество. 1976 - №5. С.15-19.

79. Железко, Ю.С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии / Ю.С. Железко М.: Энергоатомиздат, 1985.-224 с.

80. Железко, Ю.С. О нормативных документах в области качества электроэнергии и условий потребления реактивной мощности / Ю.С. Железко // Электрические станции. 2002. - №6 - С. 18 - 24.

81. Горюнов И.Т., Мозгалев В.С., Богданова В.А. Проблемы обеспечения качества электрической энергии. // Электрические станции, 2001. №1. С. 16-20.

82. Левин М. С, Муродян А. Е. Качество электроэнергии в сетях сельских районов. -М.: Энергия, 1975. — 223 с.

83. Чернов Д. В. Взаимосвязь надежности электроснабжения и качества электрической энергии. / Г. Ф. Ковалев, Д. В. Чернов, // Материалы научно практической конференции, посвященной 50-летию аспирантуры ИрГСХА. Ч. 1 - Иркутск: 2003, с. 43 — 44;

84. Чернов, Д.В Исследование влияния надежности системы электроснабжения на качество электроэнергии на шинах сельских потребителей [Текст] / Д.В. Чернов // Дисс. ... канд. техн. наук. - Иркутск, 2009 - 150 с.

85. Кулагин С.А. Способы и средства повышения качества электрической энергии в сельских распределительных 0,38 кВ при несимметричной нагрузке: автореф. дис.канд.техн.наук: 05.09.90/ Кулагин С.А. Ленинград, 1990.- 18с.

86. Левин М.С. и др. Качество электроэнергии в сетях сельских районов. Под ред. акад. ВАСХНИЛ Будзко И.А. М.: «Энергия», 1975. -224с.

87. Левин М.С., Лещинская Т.Б. Анализ несимметричных режимов сельских сетей 0,38 кВ // Электричество. 1999. - № 5. - С. 18-22.
88. Перова М.Б. Анализ качества напряжения в сельских распределительных сетях / М.Б. Перова // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 1998. - №6. - С.10-12.
89. Петров В.М., Щербаков Е.Ф., Петрова М.В. О влиянии бытовых электроприемников на работу смежных электротехнических устройств // Промышленная энергетика. 1998. - №4. - С.28-30.
90. Моделирование электрической сети с системой мониторинга качества электроэнергии и надежности электроснабжения. Большев В.Е., Виноградов А.В.. Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2019. № 2 (35). С. 3-10.
91. Качество электрической энергии по напряжению в системах электроснабжения металлургических предприятий. Зацепина В.И., Зацепин Е.П. Вести высших учебных заведений Черноземья. 2013. № 1 (31). С. 21-25.
92. Анализ влияния объектов с резкопеременной нагрузкой на качество электроэнергии в системах электроснабжения. Шачнев О.Я., Зацепина В.И. В книге: Сборник тезисов докладов научной конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета Рецензенты: И.М. Володин, С.Е. Кузенков, А.С. Комоликов. 2015. С. 158-160.
93. Повышение качества электроэнергии посредством многоуровневых систем статком. Шачнев О.Я., Зацепина В.И. В книге: Сборник тезисов докладов научной конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета посвящается 60-летию Липецкого государственного технического университета: в 2-х частях. 2016. С. 51-53.
94. Баранов И.Л. Выбор пунктов мониторинга качества электроэнергии на основании степени сенсорности узлов ЭЭС / И.Л. Баранов,

Н.Ш. Чемборисова // Электроэнергетика глазами молодежи: сб. тр. IV междунар. техн. конф., Т.1, г.Новочеркасск, 14-18 октября 2013г. – Новочеркасск: Лик, 2013. – 610 с.

95. Баранов И.Л. Применение методик оценки сенсорности узлов ЭЭС на основании разложения матрицы Якоби // И.Л. Баранов, Н.Ш. Чемборисова / Сб. матер. Межд. науч.конф. «Актуальные вопросы науки и образования», 2012, №6

96. Баранов И.Л. Методика выявления критических пунктов электрической сети для технологического мониторинга качества электроэнергии/ И.Л. Баранов, Н.Ш. Чемборисова // Инновации и инвестиции. – 2014. - № 6. – С. 22.

97. Чувилкин А.В. Прогнозирование электропотребления объектов с применением искусственных нейронных сетей [Текст] / Чувилкин А.В., Гордеев А.С. //Вопросы современной науки и практики: Университет им. В.И. Вернадского.- 2008.-№2(12).- с.32-37.

98. Чувилкин А.В. Влияние метеорологических и производственных факторов на потребление электроэнергии предприятий АПК [Текст] / Чувилкин А.В., Гордеев А.С. // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета.-2010.- №1.- с.176-181.

99. Гунин В.М., Копуев Л.А., Никифоров Г.В. Опыт нормирования и прогнозирования электропотребления предприятия на основе математической обработки статистической отчетности // Промышленная Энергетика. 2000. №2. С. 2-5.

100. Дулесов В.А., Пантелеев В.И. Эффективность использования технологии нейронных сетей для прогнозирования // Электрификация металлургических предприятий Сибири. Вып.9.- Томск: 2000. С.264-265.

101. Сайтбаталова Р.С., Грачева Е.И., Хатанов В.А. Оперативное прогнозирование режима электропотребления // Промышленная энергетика. 2000. №6. С.27-29.

102. Макоклюев Б.И., Методология и система моделей прогноза электропотребления // «Электрические станции», N 3, 2007.
103. Шульгинов Н.Г. Методика прогнозирования графиков электропотребления для технологий краткосрочного планирования // ОАО "СО - ЦСУ ЕЭС", 2007.
104. Шумилова Г.П., Готман Н.Э., Старцева Т.Б. Краткосрочное прогнозирование электрических нагрузок с использованием искусственных нейронных сетей // «Электричество», 1999, №10.
105. Пальчиков, А.С. Существующие способы прогнозирования электропотребления объектов в металлургической отрасли // Современные научные исследования и инновации. 2012. - № 9.
106. Меламед М.А. Современные методы анализа и прогнозирования режимов электропотребления в электроэнергетических системах // Итоги науки и техники. Серия Энергетические системы и их автоматизация. - 1988.- Т.4. - С.4-111.
107. Шумилова Г.П. Прогнозирование нагрузки ЭЭС на базе новых информационных технологий. Новые информационные технологии в задачах оперативного управления электроэнергетическими системами / Г.П. Шумилова, Н.Э. Готман, Т.Б. Става // Екатеринбург: УрО РАН, 2002. - 77 с.
108. Жичкин, С.В. Краткосрочное прогнозирование суточного электропотребления Нижнетагильского металлургического комбината / С.В. Жичкин, А.В. Мозгалин // Электрификация металлургических предприятий Сибири. Выпуск 12. - Томск: Издательство Томского университета, 2005. - С. 222-228.
109. Наумов И.В. Прогнозирование отказов сельских распределительных сетей напряжением 10 кВ (на примере филиала восточных электрических сетей ОАО ИЭСК) / И.В. Наумов, А.В. Ланин // Вестник АГАУ. — 2011. — № 1. — С. 86-91.

110. Моделирование несимметричных сельских распределительных электрических сетей 10/0,4 кВ. Кобелев А.В., Кочергин С.В., Джапарова Д.А., Королева Л.Ю. Наука в центральной России. 2017. № 2 (26). С. 47-53.
111. Моделирование распределительных электрических сетей 10/0,4 кВ А. Н. Кагдин, М. Ю. Авдеева, Д. А. Джапарова. Университет им. В.И. Вернадского. Специальный выпуск (52). 2014. С. 59-64.
112. Хайкин С. Нейронные сети: Полный курс. Пер. с англ. Н. Н. Куссуль, А. Ю. Шелестова. 2-е изд., испр. — М.: Издательский дом Вильямс, 2008, 1103 с.
113. Воронов И.В. Обзор типов искусственных нейронных сетей и методов их обучения / И.В. Воронов, Е.А. Политов, В.М. Ефременко // Вестник КузГТУ. — 2007. — № 3. — С. 38—42.
114. Круг П.Г. Нейронные сети и нейрокомпьютеры: учеб. пособие. — М.: Издательство МЭИ, 2002. — 176 с.
115. Нейроинформатика / А.Н.Горбань, В.Л.Дунин-Барковский, А.Н.Кирдин и др. - Новосибирск: Наука. Сибирское предприятие РАН, 1998. - 296с.
116. Горбань А.Н., Россиев Д.А. Нейронные сети на персональном компьютере.-Новосибирск:Наука. Сибирская издательская фирма РАН.-1996.- 275с.
117. Ананичева С.С. Качество электроэнергии. Регулирование напряжения и частоты в энергосистемах: учебное пособие / С. С. Ананичева, А. А. Алексеев, А. Л. Мызин.; 3-е изд., испр. Екатеринбург: УрФУ. 2012. 93 с
118. Кудрин Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий: учебник для вузов / Б.И. Кудрин. М.: Энергоатомиздат, 1995. 416 с.
119. Справочник по проектированию электроснабжения / под ред. Ю.Г. Барыбина [и др.]. М.: Энергоатомиздат. 1990 (сер. Электроустановки промышленных предприятий).

120. ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
121. ГОСТ 30804.4.30-2013 (IEC 61000-4-30:2008) Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии.
122. ГОСТ 30804.4.7-2013 (IEC 61000-4-7:2009) Совместимость технических средств электромагнитная. Общее руководство по средствам измерений и измерениям гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств.
123. Сенько, В.В. Автоматизированные системы коммерческого учёта электроэнергии : учеб. пособие / В.В. Сенько. – Изд. 2-е. – Тольятти : ТГУ, 2011. – 48 с.
124. Соскин Э.А., Киреева З.А. Автоматизация управления промышленным энергоснабжением. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
125. Гельман Г.А. Автоматизированные системы управления электроснабжением промышленных предприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1984.
126. Цицикян Г. Н. Качество электроэнергии и смежные вопросы. СПб.: Элмор, 2011. 176 с.
127. Yacamini R. Power System Harmonics. Part 3 – Problems caused by distorted supplies // Power Engineering Journal, Oct., 1995, стр. 233-238.
128. Forrester W. Networking in Harmony // Electrical Contractor, Nov. / Dec., 1996, стр. 38-39.
129. Шклярский Я.Э. Влияние гармонического состава тока и напряжения на мощность искажения / Я.Э. Шклярский, А.А. Брагин, В.С. Добуш // Электронный научный журнал "Нефтегазовое дело". №4. 2012 - С. 26-31.



130. Добуш В.С. Анализ способов и средств компенсации высших гармоник// Современные научные исследования и инновации. 2015. № 5-2 (49). С. 55-59

131. Самсонов В. С. Экономика предприятий энергетического комплекса: Учеб.для вузов \ В. С.Самсонов, М. А.Вяткин. – М.: Высш. шк., 2001. –416 с.

132. Волкова, Н.А. Экономика сельского хозяйства и перерабатывающих предприятий: учебник / Н.А. Волкова, О.А. Столярова, Е.М. Костерин. - М.: КолосС, 2014. - 240 с.

133. Минаков, И.А. Экономика сельского хозяйства: учебник / И.А. Минаков, Г.Е. Смирнов, Н.П. Касторнов. - М.: КолосС, 2006. 288 с.

134. Каханович В. С., Телицын С. С., Порохнявый Б. Н. Экономическая эффективность внедрения автоматизированных систем учета электроэнергии // Промышленная энергетика. 1980. - № 2. - С. 5-7.

135. Непомнящий В.А. Экономические потери от нарушений электроснабжения потребителей. — М.: Издательский дом МЭИ, 2010. — 188 с.: ил.

136. Лещинская Т.Б. «Улучшение технико-экономических показателей систем электроснабжения сельских районов» // Электричество. 1989. №2

137. Методические рекомендации по технико-экономическому обоснованию проектных решений в энергетике при неоднозначности исходной информации / Беляев Л.С., Бабурин Б.Л., Буйнов Н.Е. и др. М., Иркутск: СЭИ, 1987, 74 с.

138. Орлов В.С. Снижение электропотребления путем регулирования напряжения // Промышленная энергетика. 1991. № 4.

139. Маркушевич Н.С. Регулирование напряжения и экономия электроэнергии. М.: Энергоатомиздат, 1984. 214 с.

140. Голиков Игорь Олегович. Адаптивное автоматическое регулирование напряжения в сельских электрических сетях 0,38 кв:

диссертация ... кандидата Технические науки: 05.20.02 / Голиков Игорь Олегович; [Место защиты: Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства].- Москва, 2016.

141. Крюков Евгений Валерьевич. Применение тиристорных вольтодобавочных устройств для повышения качества электроэнергии в системах электроснабжения: диссертация ... кандидата Технические науки: 05.09.03 / Крюков Евгений Валерьевич; [Место защиты: ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»], 2018.

142. Исмоилов Саиджон Туронович. Регулирование напряжения на подстанциях распределительной электрической сети с контролем режима прилегающего района,: диссертация ... кандидата технических наук: 05.14.02 / Исмоилов Саиджон Туронович; [Место защиты: Новосибирский государственный технический университет].- Новосибирск, 2014.- 151 с.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Таблица А1 - Результаты измерений ежеминутных значений ПКЭ на сельскохозяйственном предприятии

Время	Напряжение, В									Козф. несимметрии, %		Частота, Гц	Козффициенты несинусоидальности напряжения K <sub>U</sub> , %					
	U <sub>A</sub>	U <sub>B</sub>	U <sub>C</sub>	U <sub>AB</sub>	U <sub>BC</sub>	U <sub>CA</sub>	U <sub>0</sub>	U <sub>1</sub>	U <sub>2</sub>	K <sub>0</sub>	K <sub>2</sub>	F	K <sub>U<sub>A</sub></sub>	K <sub>U<sub>B</sub></sub>	K <sub>U<sub>C</sub></sub>	K <sub>U<sub>AB</sub></sub>	K <sub>U<sub>BC</sub></sub>	K <sub>U<sub>CA</sub></sub>
12:44	211,456	215,064	212,429	369,594	370,642	366,462	0,710	368,883	2,524	0,330	0,680	50,000	1,180	1,210	1,560	1,160	1,430	1,340
12:45	210,770	215,300	212,374	369,116	371,256	365,454	0,701	368,589	3,390	0,330	0,920	49,990	1,260	1,300	1,590	1,270	1,480	1,390
12:46	209,629	213,123	210,822	366,178	367,604	363,608	0,704	365,783	2,406	0,330	0,660	50,000	1,220	1,250	1,540	1,220	1,430	1,350
12:47	208,743	212,158	209,990	364,518	366,041	362,183	0,704	364,232	2,237	0,330	0,610	50,010	1,190	1,160	1,500	1,150	1,370	1,330
12:48	210,018	212,950	210,846	366,412	367,195	364,196	0,712	365,920	1,804	0,340	0,490	50,010	1,200	1,170	1,520	1,160	1,380	1,340
12:49	209,676	214,007	211,348	366,944	369,212	363,759	0,703	366,619	3,229	0,330	0,880	50,000	1,220	1,220	1,550	1,190	1,420	1,360
12:50	209,278	214,158	211,151	366,777	369,406	362,967	0,691	366,362	3,729	0,330	1,020	49,990	1,120	1,140	1,470	1,100	1,340	1,260
12:51	209,121	213,616	210,613	366,282	368,251	362,472	0,690	365,650	3,391	0,330	0,930	50,000	0,870	0,950	1,190	0,890	1,110	0,970
12:52	210,371	213,885	211,044	367,794	368,319	364,267	0,696	366,776	2,632	0,330	0,720	50,000	0,960	1,020	1,240	0,980	1,170	1,040
12:53	210,107	212,781	210,532	366,511	366,592	364,014	0,701	365,693	1,686	0,330	0,460	50,010	0,880	0,990	1,190	0,920	1,130	0,960
12:54	209,536	212,274	210,080	365,528	365,819	363,124	0,700	364,810	1,704	0,330	0,470	50,000	0,890	0,990	1,230	0,920	1,160	1,010
12:55	208,494	211,604	209,180	364,072	364,620	361,255	0,692	363,301	2,164	0,330	0,600	49,980	0,970	1,060	1,290	0,990	1,220	1,080
12:56	209,662	212,782	210,016	366,290	366,269	362,897	0,696	365,137	2,266	0,330	0,620	50,000	1,000	1,120	1,360	1,030	1,300	1,130
12:57	211,840	214,579	212,370	369,512	369,790	367,115	0,709	368,792	1,715	0,330	0,460	50,000	1,040	1,170	1,370	1,100	1,320	1,140
12:58	211,570	214,582	212,205	369,298	369,764	366,607	0,707	368,542	1,968	0,330	0,530	50,000	1,400	1,440	1,670	1,420	1,580	1,490
12:59	210,241	211,624	210,365	365,413	364,970	364,665	0,714	365,004	0,500	0,340	0,140	49,990	1,640	1,670	1,910	1,660	1,810	1,740
13:00	209,059	209,753	209,188	362,570	362,119	363,030	0,721	362,561	0,576	0,340	0,160	49,980	1,550	1,580	1,740	1,600	1,670	1,590
13:01	209,116	210,388	209,694	363,073	363,414	363,313	0,718	363,255	0,533	0,340	0,150	49,990	1,470	1,540	1,640	1,550	1,610	1,480
13:02	209,669	212,340	210,441	365,521	366,244	363,672	0,705	365,131	1,544	0,330	0,420	50,010	1,520	1,570	1,640	1,600	1,600	1,510
13:03	209,775	213,006	210,826	366,184	367,407	363,854	0,703	365,800	2,077	0,330	0,570	50,010	1,540	1,580	1,690	1,590	1,630	1,550
13:04	209,415	212,413	210,405	365,330	366,440	363,294	0,703	365,008	1,852	0,330	0,510	50,010	1,400	1,450	1,550	1,460	1,500	1,410
13:05	209,543	211,626	210,074	364,769	365,059	363,518	0,708	364,436	1,129	0,340	0,310	49,990	1,370	1,480	1,580	1,460	1,550	1,410
13:06	210,068	212,005	210,676	365,467	365,884	364,601	0,710	365,305	0,751	0,340	0,210	50,000	1,300	1,420	1,560	1,390	1,500	1,370
13:07	210,155	211,981	210,695	365,531	365,825	364,736	0,709	365,351	0,654	0,340	0,180	50,010	1,320	1,440	1,580	1,410	1,530	1,380
13:08	209,702	211,575	210,238	364,804	365,094	363,916	0,707	364,593	0,795	0,340	0,220	50,020	1,340	1,480	1,620	1,440	1,580	1,400
13:09	210,030	211,303	210,000	365,010	364,304	364,180	0,710	364,486	0,573	0,340	0,160	50,010	1,370	1,530	1,610	1,490	1,600	1,400
13:10	209,973	211,828	210,142	365,469	365,115	363,973	0,708	364,841	0,946	0,340	0,260	49,990	1,360	1,540	1,610	1,490	1,610	1,390
13:11	209,543	211,438	209,844	364,692	364,575	363,354	0,705	364,194	0,983	0,340	0,270	50,000	1,380	1,480	1,640	1,450	1,580	1,450
13:12	209,041	210,271	208,936	363,296	362,456	362,401	0,708	362,707	0,587	0,340	0,160	50,000	1,410	1,470	1,650	1,460	1,570	1,480
13:13	208,294	209,527	208,511	361,816	361,541	361,478	0,707	361,599	0,373	0,340	0,100	50,000	1,400	1,480	1,660	1,460	1,590	1,480
13:14	209,693	210,604	209,852	363,895	363,512	364,035	0,719	363,802	0,459	0,340	0,130	49,990	1,420	1,510	1,680	1,480	1,610	1,500
13:15	209,477	211,705	210,360	364,610	365,515	363,737	0,714	364,608	1,025	0,340	0,280	50,000	1,320	1,410	1,550	1,390	1,500	1,380
13:16	208,895	211,218	209,590	363,830	364,407	362,443	0,705	363,551	1,160	0,340	0,320	50,010	1,290	1,420	1,520	1,390	1,490	1,330
13:17	209,282	211,460	209,508	364,620	364,376	362,644	0,704	363,867	1,260	0,330	0,350	50,010	1,270	1,360	1,530	1,340	1,460	1,340

Таблица А2 - Результаты измерений коэффициента несинусоидальности на сельскохозяйственном предприятии

С	АВ	АС	AD
Время	Козф. несинусоидальности тока, %		
	$K_{I_A}$	$K_{I_B}$	$K_{I_C}$
12:44	264,430	266,610	267,430
12:45	255,320	256,910	265,990
12:46	249,100	277,110	255,420
12:47	235,420	245,740	223,940
12:48	284,500	278,000	242,230
12:49	266,440	255,080	239,400
12:50	249,130	266,770	241,100
12:51	275,780	301,600	250,470
12:52	267,300	202,440	272,820
12:53	277,970	261,560	222,950
12:54	270,290	260,000	248,900
12:55	274,140	251,530	243,680
12:56	269,780	295,930	257,180
12:57	291,720	270,730	253,050
12:58	268,800	262,190	198,330
12:59	244,020	267,080	258,830
13:00	288,430	257,880	225,960
13:01	273,970	286,960	268,180
13:02	262,910	227,460	224,690
13:03	270,470	279,880	232,190
13:04	256,390	265,150	251,400
13:05	281,550	256,030	258,460
13:06	249,040	262,510	252,270
13:07	256,260	264,780	237,770
13:08	265,970	253,780	234,800
13:09	269,880	283,210	267,740
13:10	266,930	255,070	249,640
13:11	294,630	234,620	251,940
13:12	274,930	273,260	238,930
13:13	250,480	258,120	255,630
13:14	287,630	297,410	258,730
13:15	261,420	269,610	253,460
13:16	286,230	249,870	262,450

Таблица А3 - Результаты расчетных значений отклонений ПКЭ на сельскохозяйственном предприятии

Время	Отклонение фазных напряжений, %						Отклонение междуфазных напряжений, %						Частота, Гц					
	$\delta U_{\text{В}}$	$\delta U_{\text{С}}$	$\delta U_{\text{НМ}}$	$\delta U_{\text{Н}}$	$\delta U_{\text{В}}$	$\delta U_{\text{НБ}}$	$\delta U_{\text{АВ}}$	$\delta U_{\text{ВС}}$	$\delta U_{\text{СА}}$	$\delta U_{\text{НМ}}$	$\delta U_{\text{Н}}$	$\delta U_{\text{В}}$	$\delta U_{\text{НБ}}$	$\Delta F$	$\Delta F_{\text{НМ}}$	$\Delta F_{\text{Н}}$	$\Delta F_{\text{В}}$	$\Delta F_{\text{НБ}}$
08:46	-0,48	-2,04	-10	-5	5	10	-0,99229	-1,2759	-2,17004	-10	-5	5	10	0,01	-0,4	-0,2	0,2	0,4
08:47	-0,83	-2,28	-10	-5	5	10	-1,42055	-1,52669	-2,49555	-10	-5	5	10	-0,01	-0,4	-0,2	0,2	0,4
08:48	-0,89	-2,24	-10	-5	5	10	-1,55978	-1,50379	-2,53661	-10	-5	5	10	-0,01	-0,4	-0,2	0,2	0,4
08:49	-1,23	-2,24	-10	-5	5	10	-1,78562	-1,73511	-2,42118	-10	-5	5	10	-0,01	-0,4	-0,2	0,2	0,4
08:50	-1,84	-2,77	-10	-5	5	10	-2,33076	-2,33448	-2,88761	-10	-5	5	10	-0,02	-0,4	-0,2	0,2	0,4
08:51	-2,05	-2,93	-10	-5	5	10	-2,52561	-2,52264	-3,03064	-10	-5	5	10	-0,01	-0,4	-0,2	0,2	0,4
08:52	-0,99	-2,08	-10	-5	5	10	-1,65311	-1,47893	-2,36215	-10	-5	5	10	0,01	-0,4	-0,2	0,2	0,4
08:53	0,07	-1,09	-10	-5	5	10	-0,64871	-0,42441	-1,43157	-10	-5	5	10	0,01	-0,4	-0,2	0,2	0,4
08:54	0,04	-1,10	-10	-5	5	10	-0,64347	-0,45816	-1,40332	-10	-5	5	10	0,01	-0,4	-0,2	0,2	0,4
08:55	-0,40	-1,38	-10	-5	5	10	-0,88337	-0,9301	-1,47871	-10	-5	5	10	0	-0,4	-0,2	0,2	0,4
08:56	-0,88	-1,69	-10	-5	5	10	-1,15435	-1,43031	-1,57413	-10	-5	5	10	0,01	-0,4	-0,2	0,2	0,4
08:57	-0,91	-1,71	-10	-5	5	10	-1,211	-1,44266	-1,62756	-10	-5	5	10	0	-0,4	-0,2	0,2	0,4
08:58	0,14	-1,04	-10	-5	5	10	-0,33002	-0,4931	-1,12436	-10	-5	5	10	0	-0,4	-0,2	0,2	0,4
08:59	0,40	-0,84	-10	-5	5	10	-0,22642	-0,18101	-1,09012	-10	-5	5	10	0	-0,4	-0,2	0,2	0,4
09:00	-0,24	-1,70	-10	-5	5	10	-0,90057	-0,90705	-1,99219	-10	-5	5	10	-0,01	-0,4	-0,2	0,2	0,4
09:01	-0,71	-1,94	-10	-5	5	10	-1,39333	-1,25112	-2,24635	-10	-5	5	10	0	-0,4	-0,2	0,2	0,4
09:02	-0,63	-1,59	-10	-5	5	10	-1,06723	-1,1673	-1,65586	-10	-5	5	10	0,01	-0,4	-0,2	0,2	0,4
09:03	-0,15	-1,11	-10	-5	5	10	-0,63359	-0,66927	-1,20847	-10	-5	5	10	0,01	-0,4	-0,2	0,2	0,4
09:04	0,16	-0,78	-10	-5	5	10	-0,4176	-0,30021	-0,97727	-10	-5	5	10	-0,01	-0,4	-0,2	0,2	0,4
09:05	0,62	-0,53	-10	-5	5	10	-0,11851	0,14004	-0,88801	-10	-5	5	10	0	-0,4	-0,2	0,2	0,4
09:06	0,64	-0,55	-10	-5	5	10	-0,08225	0,12787	-0,88143	-10	-5	5	10	0,01	-0,4	-0,2	0,2	0,4
09:07	0,85	-0,25	-10	-5	5	10	0,20397	0,34312	-0,50098	-10	-5	5	10	0	-0,4	-0,2	0,2	0,4
09:08	0,29	-0,34	-10	-5	5	10	-0,13704	-0,09829	-0,37693	-10	-5	5	10	-0,01	-0,4	-0,2	0,2	0,4
09:09	0,11	-0,42	-10	-5	5	10	-0,2383	-0,27167	-0,38058	-10	-5	5	10	-0,01	-0,4	-0,2	0,2	0,4
09:10	-0,15	-0,67	-10	-5	5	10	-0,4369	-0,55585	-0,5625	-10	-5	5	10	0	-0,4	-0,2	0,2	0,4
09:11	0,19	-0,54	-10	-5	5	10	-0,30435	-0,21532	-0,63915	-10	-5	5	10	0	-0,4	-0,2	0,2	0,4
09:12	0,91	0,04	-10	-5	5	10	0,27723	0,51135	-0,21184	-10	-5	5	10	0	-0,4	-0,2	0,2	0,4
09:13	1,21	-0,01	-10	-5	5	10	0,53341	0,66015	-0,31197	-10	-5	5	10	0	-0,4	-0,2	0,2	0,4
09:14	0,79	-0,33	-10	-5	5	10	0,1468	0,27647	-0,59493	-10	-5	5	10	0	-0,4	-0,2	0,2	0,4
09:15	-0,11	-1,18	-10	-5	5	10	-0,55414	-0,70149	-1,24609	-10	-5	5	10	0,01	-0,4	-0,2	0,2	0,4
09:16	-0,17	-1,16	-10	-5	5	10	-0,57111	-0,74505	-1,18003	-10	-5	5	10	-0,02	-0,4	-0,2	0,2	0,4
09:17	0,29	-0,82	-10	-5	5	10	-0,25367	-0,27153	-0,98815	-10	-5	5	10	-0,04	-0,4	-0,2	0,2	0,4
09:18	0,98	-0,17	-10	-5	5	10	0,37211	0,43505	-0,40301	-10	-5	5	10	-0,01	-0,4	-0,2	0,2	0,4
09:19	0,99	0,07	-10	-5	5	10	0,44276	0,51865	-0,08417	-10	-5	5	10	0	-0,4	-0,2	0,2	0,4
09:20	0,89	0,09	-10	-5	5	10	0,37739	0,46374	-0,03735	-10	-5	5	10	0,01	-0,4	-0,2	0,2	0,4
09:21	1,11	0,69	-10	-5	5	10	0,65664	0,83566	0,62835	-10	-5	5	10	0,02	-0,4	-0,2	0,2	0,4

Таблица А4 - Результаты вычислений n-х гармонических составляющих напряжения  $U_a$

Коэффициенты n-ых гармонических составляющих напряжения  $U_a$

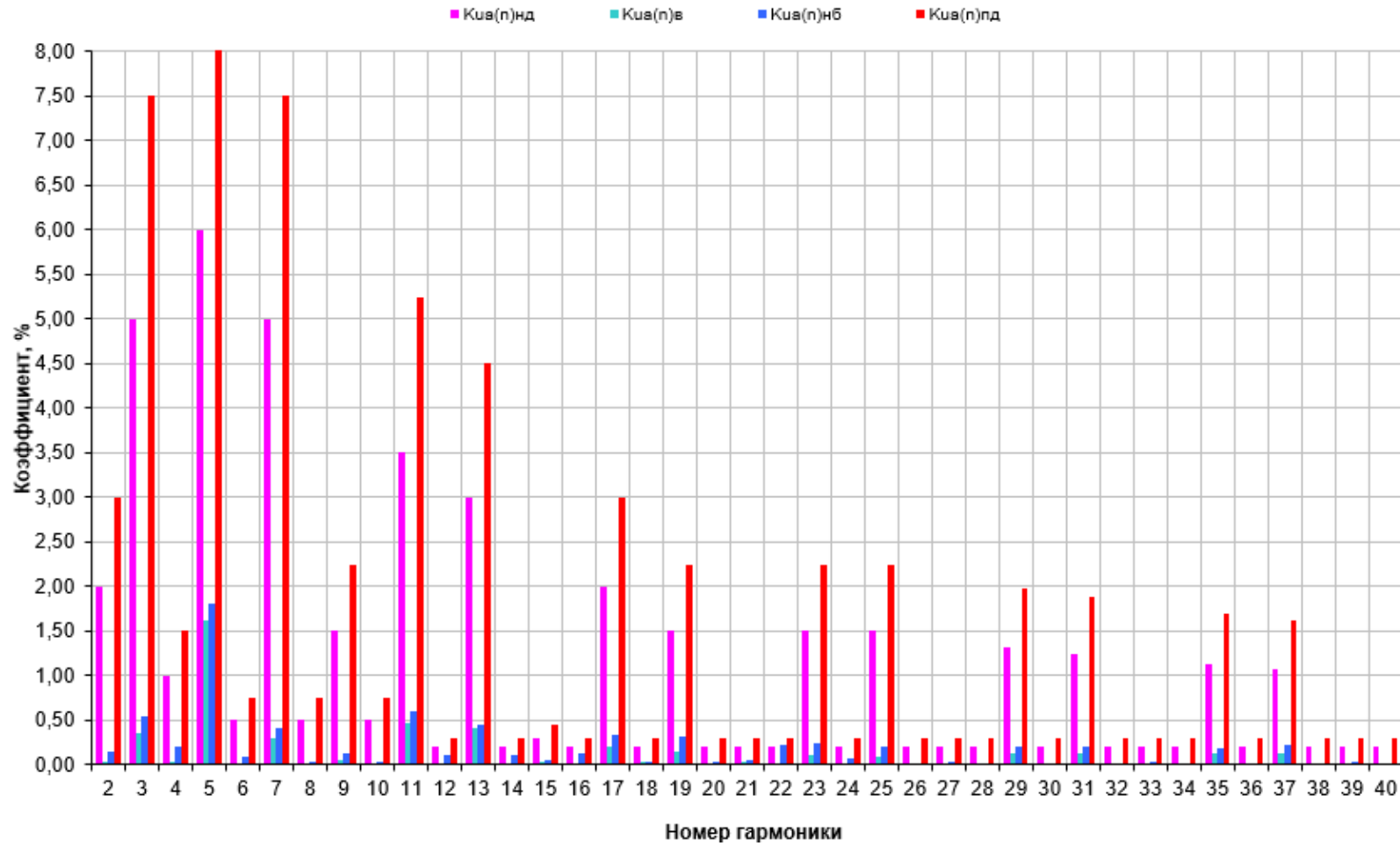


Таблица А5 - Результаты вычислений n-х гармонических составляющих напряжения  $U_B$

Коэффициенты n-ых гармонических составляющих напряжения  $U_B$

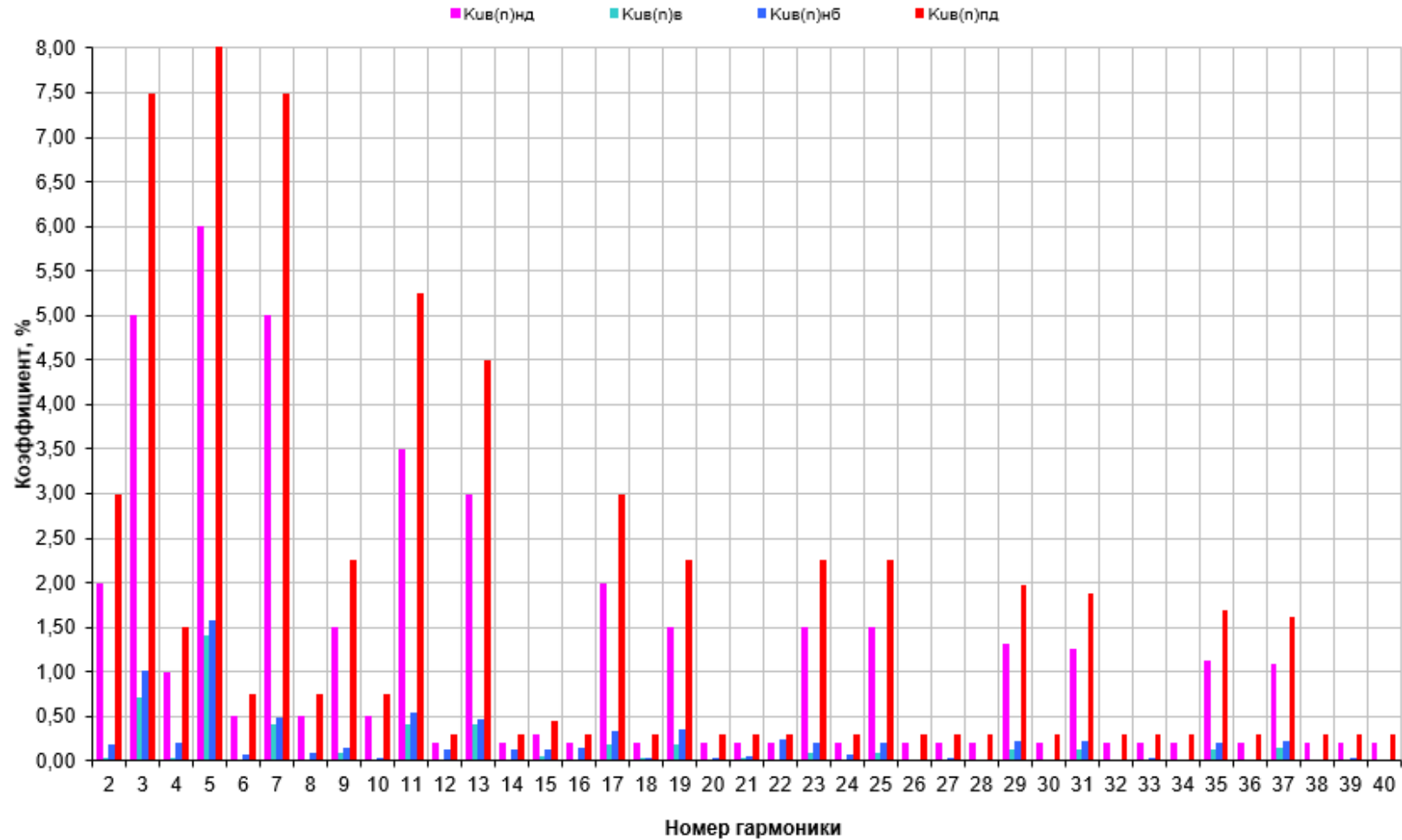




Таблица А6 - Результаты вычислений n-х гармонических составляющих напряжения  $U_c$

Коэффициенты n-ых гармонических составляющих напряжения  $U_c$

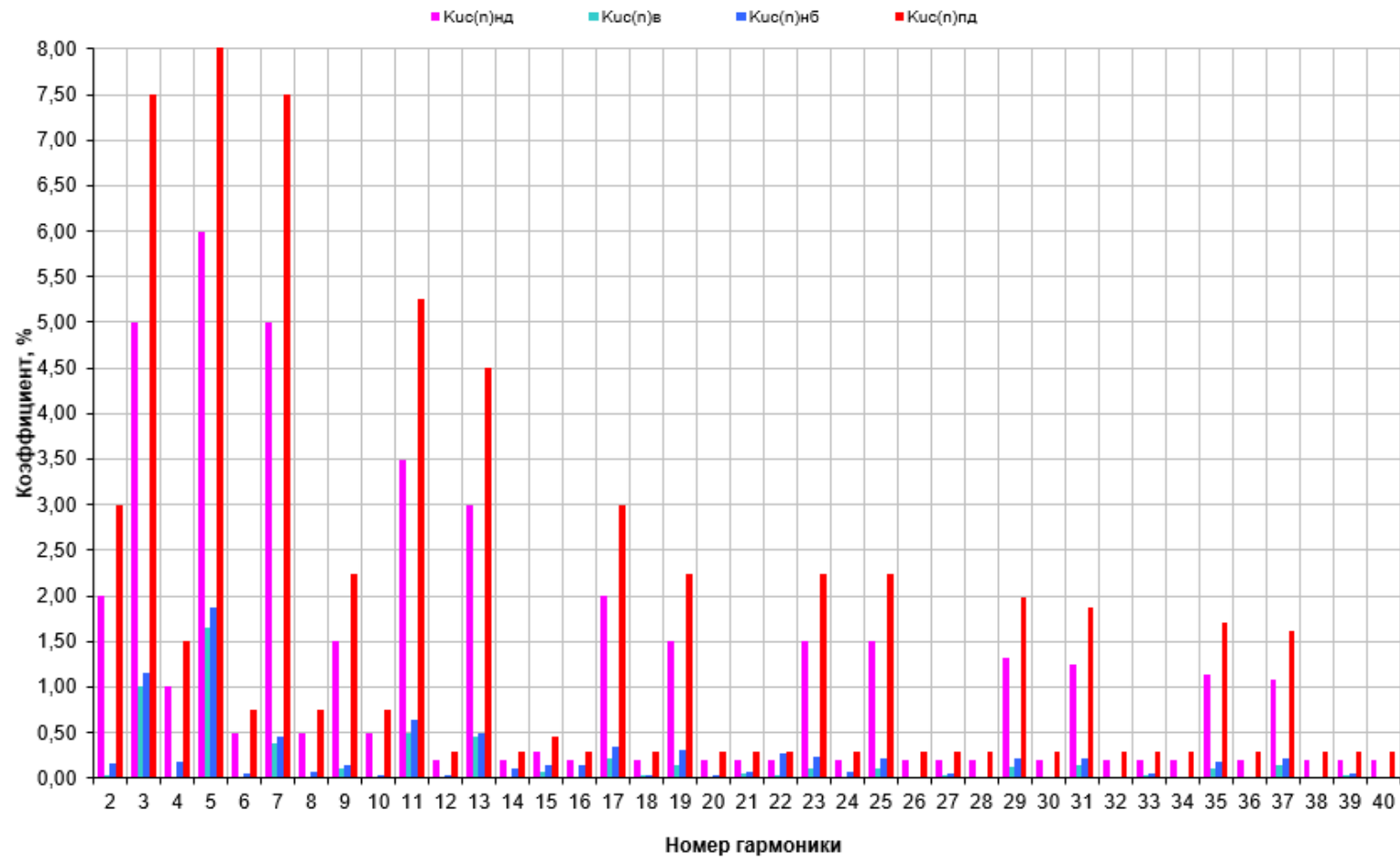
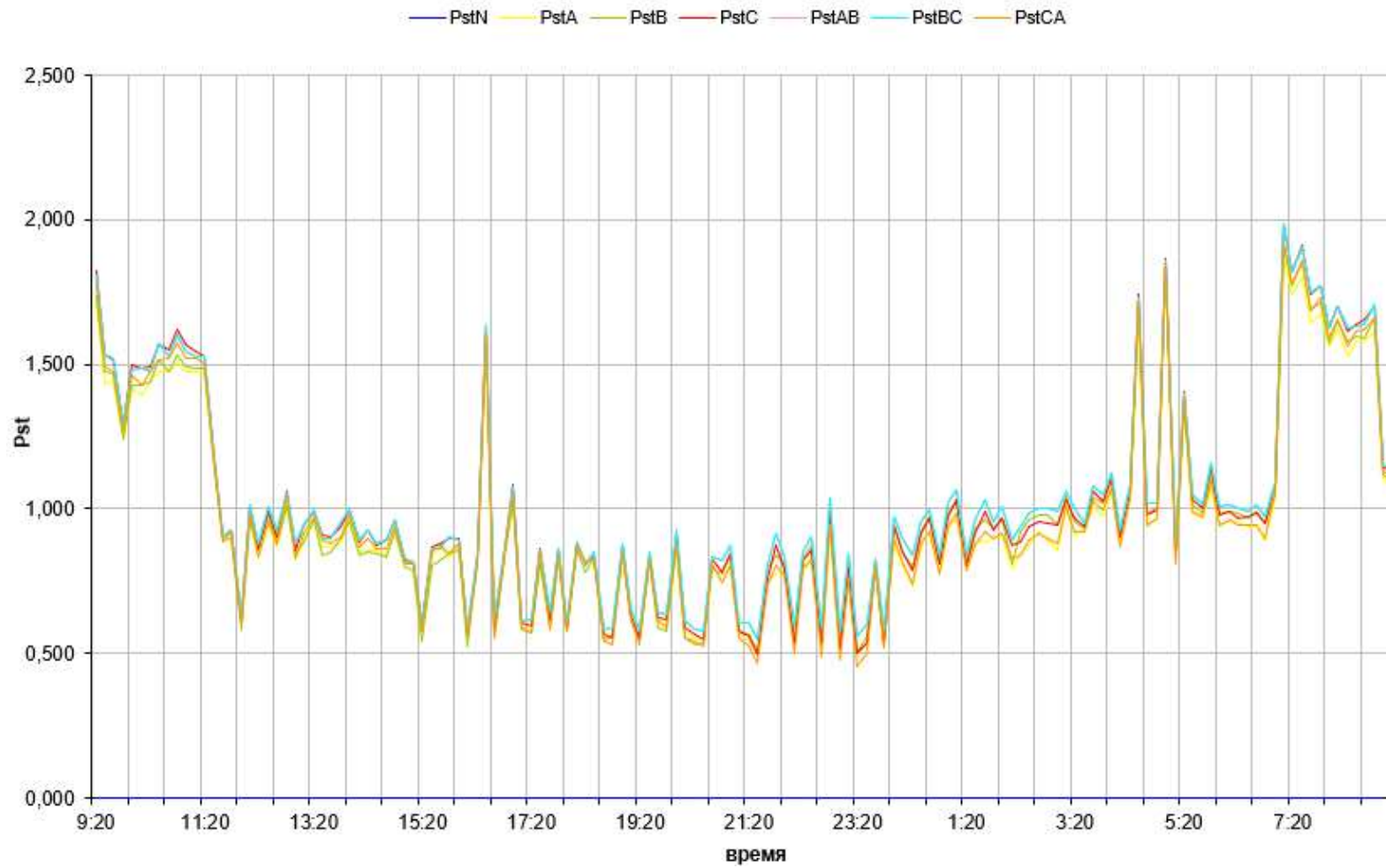


Таблица А7 - Результаты исследования кратковременной дозы фликера

График кратковременной дозы фликера





Публичное акционерное общество  
«Меңрегиональная распределительная  
сетевая компания Центра»

Филиал ПАО «МРСК Центра» - «Тамбовэнерго»

Заведующему кафедрой «Электроэнергетика» ФГБОУ ВО «ТГТУ»

А.В. Кобелеву

### СПРАВКА

об использовании результатов исследований

В результате совместной работы ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет» и филиала ПАО «МРСК Центра»-«Тамбовэнерго» по теме: «Нейросетевое регулирование напряжения в электроснабжении сельскохозяйственных потребителей», ответственным исполнителем которой от университета является аспирант Джапарова Динара Амангельдиевна, получены следующие результаты:

1. Установлено влияние параметров качества электрической энергии на надежность функционирования систем электроснабжения сельских потребителей.
2. Разработана имитационная модель сельской распределительной электрической сети 10/0,4 кВ и выполнено моделирование несимметрии напряжения с использованием пакета SimPowerSystems в математической программе MATLAB 7.0.
3. Разработана модель нейронной сети и проведены теоретические исследования по прогнозированию отклонения напряжения.
4. Проведен мониторинг показателей электрической энергии в системах электроснабжения бытовых потребителей, дана оценка влияния снижения качества электрической энергии на надежность систем электроснабжения.
5. Проведены экспериментальные исследования влияния газоразрядных ламп 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.

6. На основании проведенных экспериментальных исследований с целью прогнозирования увеличения коэффициента искажения синусоидальности, была получена математическая модель, позволяющая прогнозировать характер изменения коэффициента искажения синусоидальности в функции потребляемой активной мощности газоразрядных ламп.

7. Проведены экспериментальные исследования системы нейросетевого регулирования напряжения в системах электроснабжения сельскохозяйственных потребителей.

Полученные теоретические и экспериментальные результаты работы планируется использовать в перспективных НИОКР, повышающих эффективность и надежность электроснабжения потребителей.

Первый заместитель директора –  
главный инженер филиала  
ПАО «МРСК Центра» - «Тамбовэнерго»

Поляков И.В.

17.09.2019



Утверждаю

Главный инженер

Колхоз – племенной завод им. Ленина  
Тамбовского района Тамбовской области

А.В. Попов



### АКТ

о внедрении результатов научно-исследовательской работы  
аспиранта Джапаровой Динары Амангельдиевны  
на тему: «Нейросетевое регулирование напряжения в электроснабжении  
сельскохозяйственных потребителей»

Комиссия в составе: главного инженера Колхоз – племенной завод им. Ленина А.В. Попова, инженера-энергетика А.В. Носурова с одной стороны, заведующего кафедрой «Электроэнергетика» ФГБОУ ВО «ТГТУ», доцента, к.т.н., А.В. Кобелева, к.т.н., доцента С.В. Кочергина с другой стороны, составили настоящий акт о том, что в период с 2017 по 2019 г.г., на энергетических объектах колхоза проводились исследования параметров качества электрической энергии. Результаты проведенных исследований содержат следующие материалы:

- 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.
- Разработана система нейросетевого регулирования напряжения, отличительной особенностью которой является возможность работы с устройствами ПБВ. На основании нейросетевого прогнозирования



разработанная система позволяет формировать графики переключений на трансформаторных подстанциях.

- В результате экспериментальных исследований системы нейросетевого регулирования напряжения установлено, что она позволяет обеспечить поддержание отклонения напряжения на объектах сельскохозяйственных потребителей в пределах от 3% до 3,8%.
- Согласно проведенным расчетам 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.

Материалы исследований представляют несомненный практический интерес, используются в сельскохозяйственном предприятии Колхоз – племенной завод им. Ленина Тамбовского района Тамбовской области для разработки мероприятий по повышению надежности электроснабжения.

**Колхоз – племенной завод им. Ленина**

Главный инженер



26.09.19

А.В. Попов

Инженер-энергетик

25.09.19

А.В. Носуров

**ФГБОУ ВО «ТГТУ»**

Заведующий кафедрой

«Электроэнергетика», доцент, к.т.н.

24.09.19

А.В. Кобелев

Доцент, к.т.н.

24.09.19

С.В. Кочергин

Расчет несимметричного режима сельской распределительной электрической сети 10/0.4 кВ

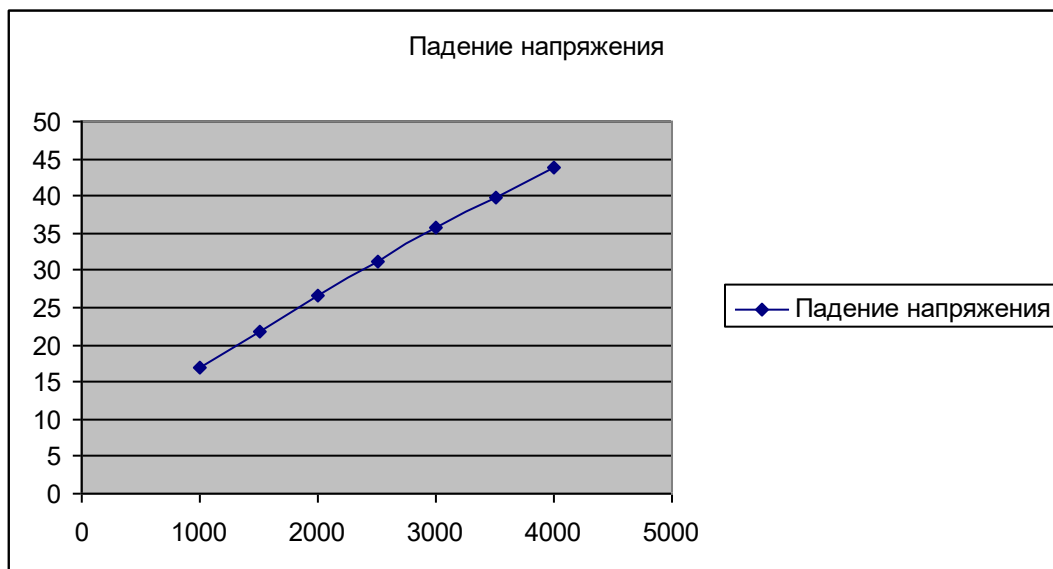


Рис. Д.1. Данные для линии 3км, провод АС-35

Таблица Д.1 - Данные для линии 1км, провод АС-35

<i>Мощность потребителей</i>	<i>Падение напряжения на линии</i>
1000	3,97
1500	5,9
2000	7,79
2500	9,64
3000	11,46
3500	13,26
4000	15
4500	16,73
5000	18,42
5500	20,09
6000	21,72

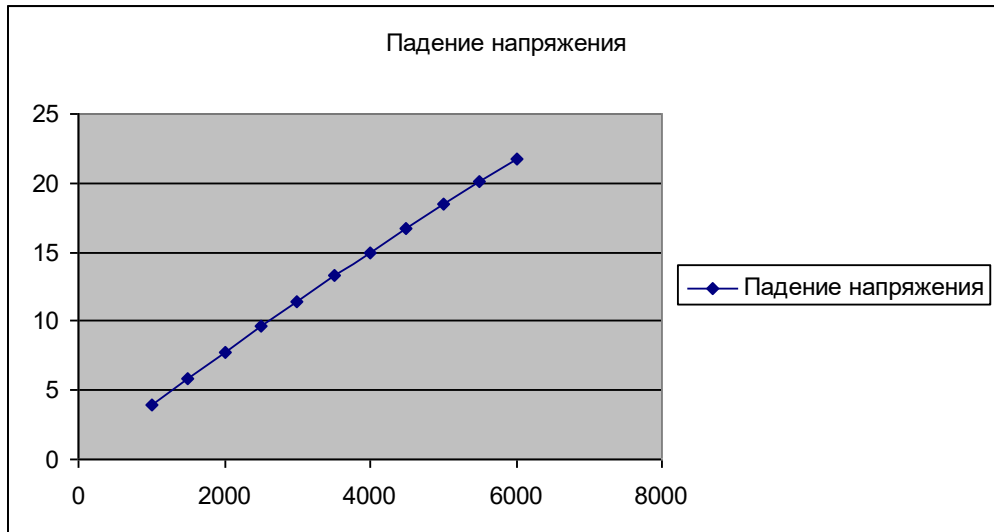


Рис. Д.2. Данные для линии 1 км, провод АС-35

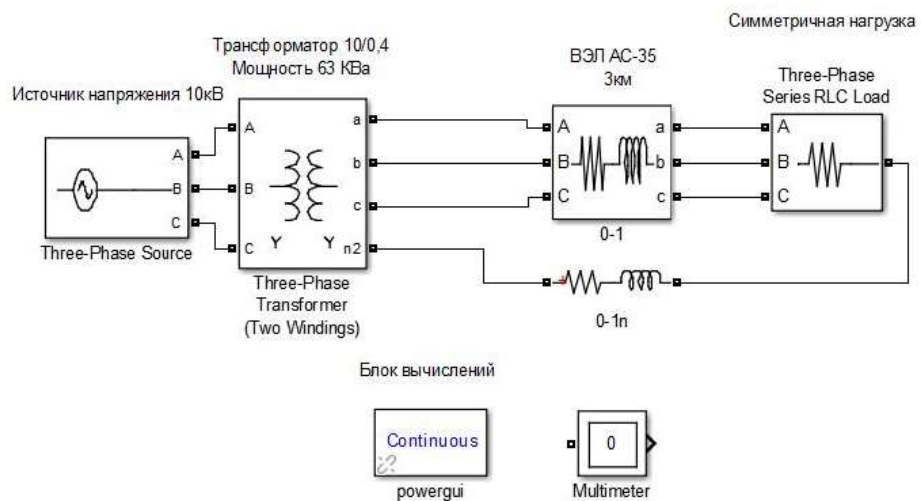


Рис. Д.3. Схема модели на 3 км в MATLAB



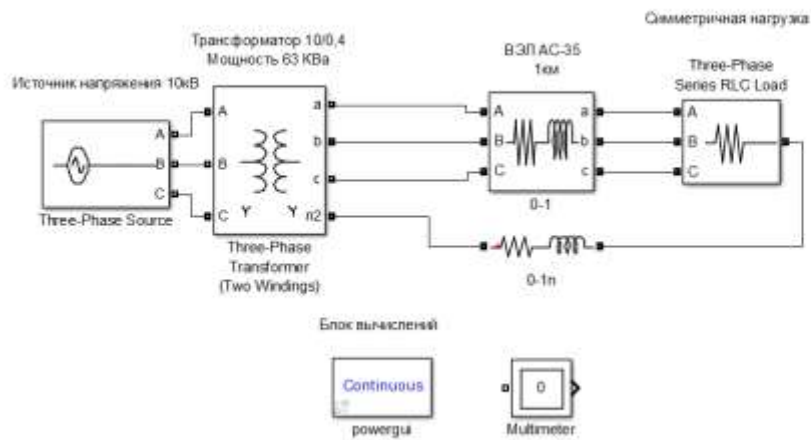


Рис. Д.4. Схема модели на 1 км в MATLAB

Таблица Д.2 - Данные по несимметрии для линии 3 км АС-35

<i>Разность мощности, Вт</i>	<i>коэффициент искажения напряжения по нулевой последовательности, %</i>	<i>ток нейтрали, А</i>
500	4,3	0,43
1000	10,12	0,78
1500	15,165	1,08
2000	19,22	1,34
2500	23,2	1,57
3000	27	1,77
3500	31	1,94
4000	34,3	2,09
4500	36,9	2,23
5000	39,7	2,36
5500	41,4	2,47
6000	43,2	2,57
6500	45,8	2,66
7000	47,2	2,75

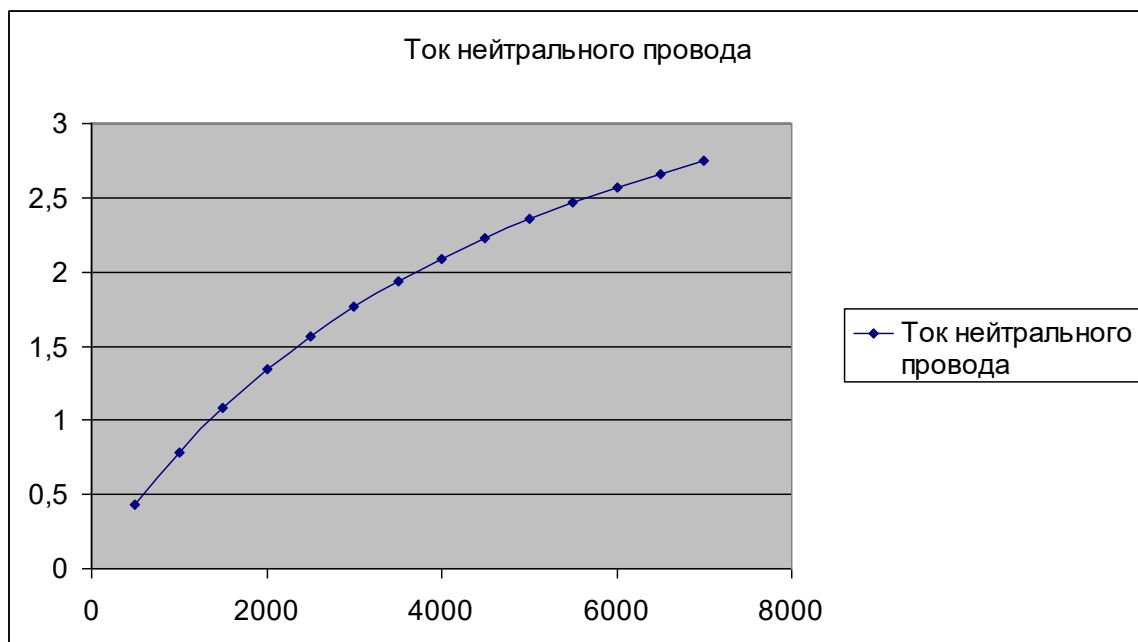


Рис. Д.5. График тока нейтрального провода

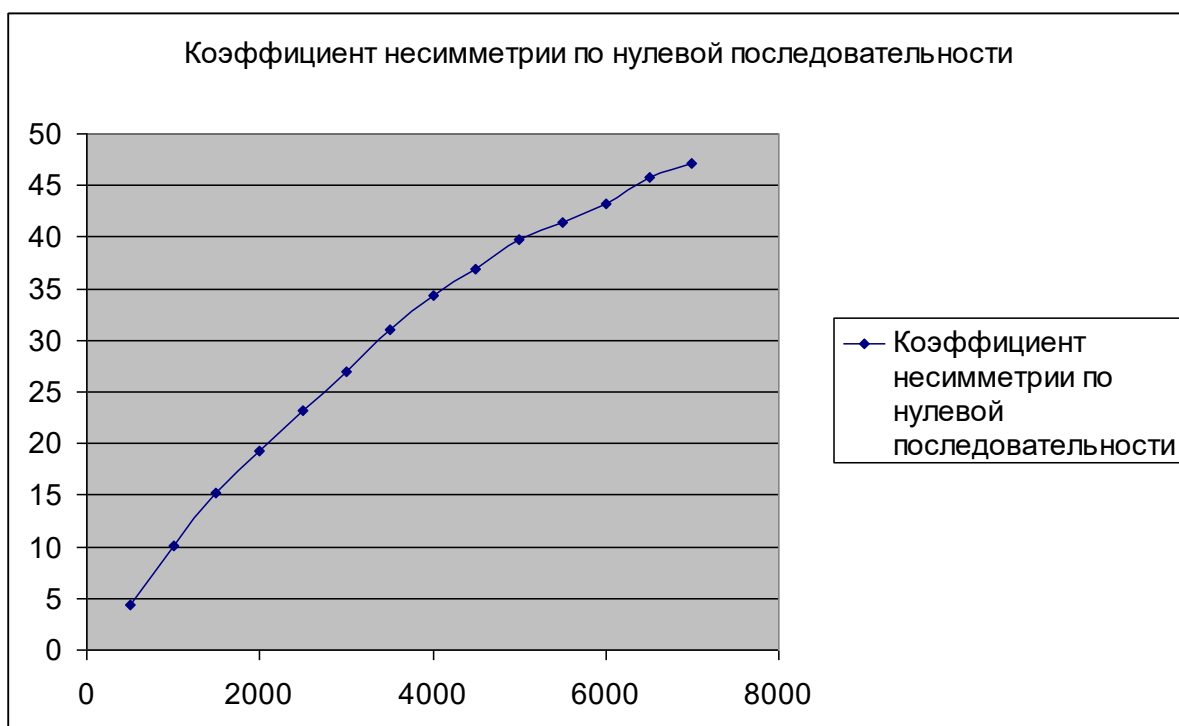


Рис. Д.6. График коэффициента несимметрии по нулевой последовательности

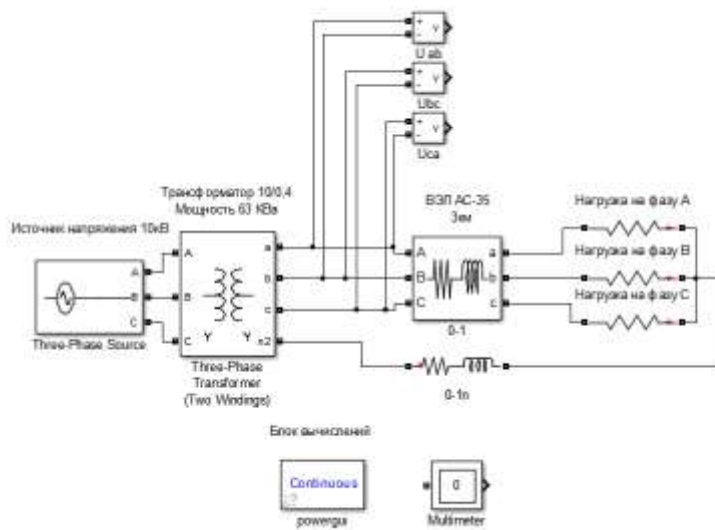


Рис. Д.7. Схема модели для расчетов параметра трансформатора

Таблица Д.3 - Расчет параметров трехфазного трансформатора

Номинальная мощность	$S_H = 63 \text{ кВА}$
Частота	$F = 50 \text{ Гц}$
Номинальные напряжения: Обмотки ВН Обмотки НН	$U_{H2} = 3000 \text{ В}$ $U_{H1} = 690 \text{ В}$
Схема и группа соединений	Y/Y <sub>H</sub> -0
Напряжение короткого замыкания	$U_K = 6,5\%$
Потери короткого замыкания	$P_K = 1260 \text{ Вт}$
Потери холостого хода	$P_X = 220 \text{ Вт}$
Ток холостого хода	$i_0 = 2,8\%$
Сечение стержня	$112 \text{ см}^2$

*Режим холостого хода*

Полное сопротивление намагничивания цепи при холостом ходе:

$$Z_0 = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot I_0} = \frac{3000}{\sqrt{3} \cdot 0,34} = 5102,04(\text{Ом}).$$

Активное сопротивление при холостом ходе:

$$R_0 = \frac{P_0}{3 \cdot I_0^2} = \frac{220}{3 \cdot 0,34^2} = 636,31(\text{Ом}).$$

Индуктивное сопротивление при холостом ходе:

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} = \sqrt{5102,04^2 - 636,31^2} = 5062,21(\text{Ом});$$

$$Z_m = Z_0 - Z_1 = 5102,04 \cdot e^{j82,84} - 4,64e^{j72,08} = 5097,48e^{j82,85};$$

$$E_1 = I_0 \cdot Z_m = 0,34e^{j7,16} \cdot 5097,48e^{j82,85} = 1730,50e^{j90,0};$$

$$U_1 = -E_1 + I_0 \cdot Z_1 = 1730,50e^{j90,0} + 0,34e^{j7,16} \cdot 4,64e^{j72,08}.$$

*Режим короткого замыкания*

Фазное напряжение короткого замыкания:

$$U_{\text{кф}} = U_{\phi 1} \cdot U_{\text{к, \%}} = 1,73 \cdot 0,065 \cdot 10^3 = 112,58(\text{В}).$$

Полное сопротивление короткого замыкания, где  $I_{1\text{к}} = I_{\text{ном}}$ :

$$Z_K = \frac{U_{\text{кф}}}{I_{1\text{к}}} = \frac{112,58}{12,12} = 9,29(\text{Ом}).$$

Активное сопротивление короткого замыкания:

$$R_K = r_1 + r_2' = \frac{P_K}{3 \cdot I_K^2} = \frac{1260}{3 \cdot 12,12^2} = 2,86(\text{Ом}).$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания:

$$X_K = x_1 + x_2' = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2} = \sqrt{9,29^2 - 2,86^2} = 8,84(\text{Ом});$$

$$r_1 \approx r_2' = \frac{1}{2} \cdot r_K;$$

$$x_1 \approx x_2' = \frac{1}{2} \cdot x_k,$$

где:

$r_1$  – активное сопротивление первичной обмотки трансформатора;

$x_1$  – индуктивное сопротивление первичной обмотки трансформатора,

обусловленное магнитным потоком рассеяния  $\Phi_{1\sigma}$ ;

$r_2'$  – приведенное активное сопротивление вторичной обмотки трансформатора;

$x_2'$  – приведенное индуктивное сопротивление вторичной обмотки

трансформатора, обусловленное магнитным потоком рассеяния  $\Phi_{2\sigma}$ .

$$r_1 \approx r_2' = \frac{2,86}{2} = 1,43(\text{Ом});$$

$$x_1 \approx x_2' = \frac{8,84}{2} = 4,42(\text{Ом}).$$

Коэффициент трансформации:

$$k = \frac{U_{\phi 1}}{U_{\phi 2}} = \frac{1,73}{0,4} = 4,35.$$

Определяем сопротивление обмоток реального трансформатора:

$$r_2 = \frac{r_2'}{k^2} = \frac{1,43}{4,35^2} = 0,08(\text{Ом});$$

$$x_2 = \frac{x_2'}{k^2} = \frac{4,42}{4,35^2} = 0,23(\text{Ом}).$$

Для расчета коэффициента несимметрии воспользуемся формулами:

$$U_{11} := \sqrt{\frac{1}{12} \cdot \left[ \left[ \sqrt{3} \cdot U_{ab} + \sqrt{4 \cdot U_{bc}^2 - \left( U_{ab} + \frac{U_{bc}^2 - U_{ca}^2}{U_{ab}} \right)^2} \right]^2 + \left( \frac{U_{bc}^2 - U_{ca}^2}{U_{ab}} \right)^2 \right]};$$

$$U_{01} := \frac{1}{6} \cdot \sqrt{\left( \frac{U_{bc}^2 - U_{ca}^2}{U_{ab}} - 3 \cdot \frac{U_b^2 - U_a^2}{U_{ab}} \right)^2 + \left[ \sqrt{4 \cdot U_{bc}^2 - \left( U_{ab} - \frac{U_{bc}^2 - U_{ca}^2}{U_{ab}} \right)^2} - 3 \cdot \sqrt{4 \cdot U_b^2 - \left( U_{ab} - \frac{U_b^2 - U_a^2}{U_{ab}} \right)^2} \right]^2};$$

$$K_{0u} := \sqrt{3} \cdot \frac{U_{01}}{U_{11}} \cdot 100$$

Код программы по прогнозированию параметров качества электрической энергии

### Файл `data_helper.py`

```
import numpy as np
import pandas as pd

def load_timeseries(filename, params):
    """Загрузка набора данных временного ряда"""

    series = pd.read_csv(filename, sep=',', header=0, index_col=0, squeeze=True)
    data = series.values

    adjusted_window = params['window_size'] + 1

    # Разделение данных на окна
    raw = []
    for index in range(len(data) - adjusted_window):
        raw.append(data[index: index + adjusted_window])

    # Нормализация данных
    result = normalize_windows(raw)

    raw = np.array(raw)
    result = np.array(result)

    # Разделение входного набора данных на тренировочную и тестовую части
    split_ratio = round(params['train_test_split'] * result.shape[0])
    train = result[:int(split_ratio), :]
    np.random.shuffle(train)

    # x_train и y_train – тренировочные части
    x_train = train[:, :-1]
    y_train = train[:, -1]

    # x_test и y_test – тестовые части
    x_test = result[int(split_ratio):, :-1]
    y_test = result[int(split_ratio):, -1]

    x_train = np.reshape(x_train, (x_train.shape[0], x_train.shape[1], 1))
    x_test = np.reshape(x_test, (x_test.shape[0], x_test.shape[1], 1))

    x_test_raw = raw[int(split_ratio):, :-1]
    y_test_raw = raw[int(split_ratio):, -1]

    # Получение последнего окна для прогнозирования значения в следующей метке времени
    last_raw = [data[-params['window_size']:]]
    last = normalize_windows(last_raw)
```

```

last = np.array(last)
last = np.reshape(last, (last.shape[0], last.shape[1], 1))

return [x_train, y_train, x_test, y_test, x_test_raw, y_test_raw, last_raw, last]

def normalize_windows(window_data):
    """Нормализация данных"""

    normalized_data = []
    for window in window_data:
        normalized_window = [(float(p) / float(window[0])) - 1) for p in window]
        normalized_data.append(normalized_window)
    return normalized_data

```

### Файл build\_model.py

```

import numpy as np
from keras.layers.core import Dense, Activation, Dropout
from keras.layers.recurrent import LSTM
from keras.models import Sequential

def rnn_lstm(layers, params):
    """Построение модели рекуррентной нейронной сети (LSTM) с использованием
библиотек Keras и Tensorflow """

    model = Sequential()
    model.add(LSTM(input_shape=(layers[1], layers[0]), output_dim=layers[1],
return_sequences=True))
    model.add(Dropout(params['dropout_keep_prob']))
    model.add(LSTM(layers[2], return_sequences=False))
    model.add(Dropout(params['dropout_keep_prob']))
    model.add(Dense(output_dim=layers[3]))
    model.add(Activation("tanh"))

    model.compile(loss="mean_squared_error", optimizer="rmsprop")
    return model

def predict_next_timestamp(model, history):
    """Прогнозирование значения в следующей метке времени с учетом
последовательности данных истории"""

    prediction = model.predict(history)
    prediction = np.reshape(prediction, (prediction.size,))
    return prediction

```

### Файл train\_predict.py

```

import sys
import json
import build_model
import data_helper
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import os

os.environ['KMP_DUPLICATE_LIB_OK']='True'

def train_predict():
    """Обучение и прогнозирование временного ряда"""

    # Получение аргументов командной строки
    train_file = sys.argv[1]
    parameter_file = sys.argv[2]

    # Загрузка параметров процесса обучения
    params = json.loads(open(parameter_file).read())

    # Загрузка датасета с данными временного ряда, разбиение его на тренировочную и
    # тестовую части
    x_train, y_train, x_test, y_test, x_test_raw, y_test_raw, \
        last_window_raw, last_window = data_helper.load_timeseries(train_file, params)

    # Построение модели рекуррентной нейронной сети (LSTM)
    lstm_layer = [1, params['window_size'], params['hidden_unit'], 1]
    model = build_model.rnn_lstm(lstm_layer, params)

    # Обучение модели на тренировочном наборе данных
    model.fit(
        x_train,
        y_train,
        batch_size=params['batch_size'],
        epochs=params['epochs'],
        validation_split=params['validation_split'])

    # Проверка модели на тестовом наборе данных
    predicted = build_model.predict_next_timestamp(model, x_test)
    predicted_raw = []
    for i in range(len(x_test_raw)):
        predicted_raw.append((predicted[i] + 1) * x_test_raw[i][0])

    # Построение графика с настоящими и прогнозируемыми значениями
    plt.subplot(111)
    plt.plot(predicted_raw, label='Actual')
    plt.plot(y_test_raw, label='Predicted')

```



```
plt.legend()
plt.show()

# Прогнозирование следующего значения
next_timestamp = build_model.predict_next_timestamp(model, last_window)
next_timestamp_raw = (next_timestamp[0] + 1) * last_window_raw[0][0]
print("The next time stamp forecasting is: {}".format(next_timestamp_raw))

if __name__ == '__main__':
    # Пример запуска: python3 train_predict.py ./data/sales.csv ./training_config.json
    train_predict()
```

### Файл training\_config.json

```
{
  "epochs": 100,
  "batch_size": 2,
  "window_size": 6,
  "train_test_split": 0.8,
  "validation_split": 0.1,
  "dropout_keep_prob": 0.2,
  "hidden_unit": 100
}
```