

на правах рукописи



Федоринова Эльвира Сергеевна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ
РАБОТЫ НИЗКОВОЛЬТНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

2.4.2 Электротехнические комплексы и системы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутский государственный аграрный университет имени А. А. Ежевского»

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Наумов Игорь Владимирович

Официальные оппоненты: **Багаев Андрей Алексеевич**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Алтайский государственный аграрный университет», кафедра электрификации и автоматизации сельского хозяйства, заведующий кафедрой;

Боярская Наталия Петровна, кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Красноярский государственный аграрный университет», кафедра теоретических основ электротехники, доцент.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Защита состоится 20 сентября 2023 г. в 16:00 на заседании диссертационного совета 24.2.404.12 на базе ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26, корпус №14 ауд. 21-02.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» <http://www.sfu-kras.ru>

Автореферат разослан « » _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Сизганова Евгения Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы обусловлена необходимостью улучшения эксплуатационных и технико-экономических режимных характеристик низковольтных систем электроснабжения.

Одной из проблем, связанных с качеством электрической энергии, является несимметрия напряжений, которая отрицательно влияет на режимы работы однофазных и трехфазных электроприемников, вызывая сбои в работе и сокращая срок службы электрооборудования. Например, у асинхронных машин при незначительном увеличении несимметрии напряжений (до 4%), срок службы снижается вдвое. У других электроприемников компонентов систем электроснабжения могут происходить сбои в работе систем автоматики технологических процессов, повышается аварийность при транспорте электроэнергии, снижается уровень надежности электроснабжения, возникает опасность возникновения пожароопасных ситуаций.

В связи с этим актуальность проблемы несбалансированного электропотребления, приводящего к возникновению несимметричных режимов работы низковольтных систем электроснабжения, ставит задачу разработки способов и технических средств ее минимизации.

Степень разработанности темы исследования. Большой вклад в решение проблем качества электроэнергии и электромагнитной совместимости элементов систем электроснабжения внесли Багаев А.А., Боярская Н.П., Вороницкий В.Э., Железко Ю.С., Косоухов Ф.Д., Лещинская Т.Б., Наумов И.В., Шидловский А. К. и другие ученые. Вместе с этим, несмотря на значительное число работ, посвященных несимметричным режимам работы систем электроснабжения (СЭС) напряжением 0,4 кВ, вопросы повышения качества электрической энергии и снижения ее потерь при несбалансированном электропотреблении рассмотрены не в полной мере. Открываются новые возможности решения данной задачи, связанные с управлением несимметричными потоками электрической энергии.

Цель диссертации – создание методов и алгоритмов расчета, а также способов управления несимметричными режимами работы на примере систем электроснабжения 0,4 кВ.

Для достижения указанной цели поставлен и решён ряд следующих **задач**:

1) проведен анализ режимов работы действующих систем электроснабжения;

2) предложено симметрирующее устройство с автоматическим управлением его параметрами, а также схемное решение преобразования трёхфазной системы в однофазную, позволяющее исключить возникновение

несимметричных режимов;

3) созданы новые методы: определения параметров симметрирующего устройства в зависимости от изменяющегося несимметричного электропотребления и расчета несимметричных режимов, с динамически изменяющимися параметрами симметрирующего устройства;

4) создано программное обеспечение для имитационного моделирования несимметричных режимов и их расчета в действующих низковольтных системах электроснабжения;

5) определены экспериментально характеристики качества и дополнительных потерь электрической энергии на модели системы электроснабжения 0,4 кВ; подтверждена экономическая эффективность применения разработанного симметрирующего устройства.

Объект исследования – системы электроснабжения на примере СЭС 0,4 кВ.

Предмет исследования – управление режимными параметрами систем электроснабжения.

Научная новизна и положения, выносимые на защиту:

1) созданы новые методы расчета несимметричных режимов низковольтных систем электроснабжения и определения параметров симметрирующего устройства, отличающиеся от известных возможностью учета динамического изменения параметров СЭС и симметрирующего устройства в функции изменяющегося уровня несимметричного электропотребления;

2) впервые предложен способ определения предельно-допустимой температуры поверхности проводника в зависимости от уровня несимметрии токов;

3) предложено авторское программное обеспечение для имитационного моделирования, позволяющего осуществлять теоретические исследования разноуровневых моделей низковольтных систем электроснабжения, а также программное обеспечение расчетов несимметричных режимов в действующих системах 0,4 кВ, позволяющее исследовать реальные режимы работы этих систем с сосредоточенной и распределенной нагрузкой при отсутствии и подключении в них симметрирующего устройства уже на стадии проектирования.

Теоретическая значимость работы представлена:

– созданным методом расчета несимметричных режимов работы с симметрирующим устройством, автоматически изменяющим свои параметры от изменяющегося уровня несбалансированного электропотребления, а также программным обеспечением для имитационного моделирования несимметричных режимов работы систем электроснабжения 0,4 кВ и расчета реальных режимов в действующих системах при несимметричном электропотреблении;

– предложенным методом расчета параметров симметрирующего устройства в динамике от несбалансированного электропотребления и определением эффективности использования этого устройства.

Практическая значимость состоит в:

– в создании нового схемного решения преобразования трёхфазной системы напряжения электропитания в однофазную систему, позволяющее исключить несимметричное электропотребление, отличающееся возможностью регулирования ступеней мощности однофазных нагрузок потребителей;

– в предложенной модели нового симметрирующего устройства, отличающегося автоматически изменяющейся мощностью в зависимости от уровня несбалансированного электропотребления в трехфазной системе напряжения электропитания, позволяющее повысить эффективность симметрирования до 60 %.

Методологической и методической основой диссертационного исследования послужили основы общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование несимметричных режимов работы низковольтных систем электроснабжения. При обработке результатов исследования – разработанные алгоритмы эффективного управления несимметричными режимами и созданные на их основе программные комплексы.

Соответствие паспорту научной специальности. Работа соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности 2.4.2 – электротехнические комплексы и системы: п. 1 – физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем; п. 3 – разработка алгоритмов эффективного управления; п. 4 – исследование качества функционирования систем и их компонентов в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях.

Степень достоверности полученных результатов подтверждается корректностью использованных методов расчёта показателей несимметрии токов и напряжений, а также современных методов математического, имитационного и экспериментального моделирования сходимостью результатов теоретических исследований с результатами исследований в действующих системах электроснабжения.

Апробация работы. Основные положения и результаты исследований докладывались и обсуждались на международных конференциях: «Энергетика XX I века: устойчивое развитие и интеллектуальное управление» (Иркутск, ИСЭМ СО РАН им. Л.А. Мелентьева, 7 – 11 октября 2020 г.), «IV International

Scientific Conference: AGRITECH-IV-2020» (г. Красноярск, 18-20 ноября 2020 г.); международной научно-практической конференция молодых ученых «Научные исследования и разработки к внедрению в АПК» (Иркутск, 25 – 26 марта 2021 г.), II этап Всероссийского конкурса на лучшую научную работу среди студентов, аспирантов и молодых ученых высших учебных заведений министерства сельского хозяйства РФ (г. Красноярск , 15 апреля 2021 г.), Всероссийской молодежной конференции с международным участием «Системные исследования в энергетике – 2021» (г. Иркутск, 25 – 28 мая 2021 г.), международной научно-практической конференции «АгроТех (AgroTech): «Умные» инновации в сельском хозяйстве в интересах устойчивого развития на базе искусственного интеллекта (AI), Больших данных (Big Data) и Интернета вещей (IoT)» (г. Ставрополь, 27 мая 2021 г.), II Международной научно-практической конференции «Обеспечение устойчивого развития в контексте сельского хозяйства, зеленой энергетики, экологии и науки о Земле» (ESDCA-II-2022) (г. Смоленск, 17 февраля 2022 г.), SciTech 2022: II Международный научно-практический форум по передовым достижениям в науке и технике (Барнаул, 24 – 25 февраля 2022 г.), II этап Всероссийского конкурса на лучшую научную работу среди студентов, аспирантов и молодых ученых высших учебных заведений министерства сельского хозяйства РФ (г. Красноярск, 14 апреля 2022 г.), III этап Всероссийского конкурса на лучшую научную работу среди студентов, аспирантов и молодых ученых высших учебных заведений Минсельхоза России в номинации «Электротехнологии, электрооборудование и энергосбережение АПК» (г. Ставрополь, 27 мая 2022 г.).

Личный вклад автора состоит в определении цели и задач исследования, создании экспериментальной лабораторной установки и осуществлении экспериментальных исследований по доказательству эффективности предлагаемой физической модели устройства, проведении экспериментальных работ, формулировании положений научной новизны. Постановка задач и анализ результатов обсуждались совместно с научным руководителем. В совместных публикациях вклад автора составляет от 50 до 85 %.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 20 печатных работ, в том числе 3 свидетельства государственной регистрации программ для ЭВМ, 2 патента на изобретение, 3 публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, и 7 публикаций в изданиях, индексируемых в Scopus. Поданы 2 заявки на изобретение РФ.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, выводов, списка литературы из 165 наименований и 4 приложений. Работа изложена на 131 странице машинописного текста, содержит 44 рисунка и 5 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, изложена научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, отражена информация по апробации результатов.

В первой главе проанализированы причины возникновения несимметричных режимов работы, влияние несимметрии напряжений и токов на работу приемников электрической энергии и на увеличение пожарной опасности, а также представлен анализ режимов работы действующих систем электроснабжения 0,4 кВ Иркутской области.

Критериями оценки влияния несимметричных режимов на качество и дополнительные потери электроэнергии могут служить показатели несимметрии напряжений по обратной K_{2U} и нулевой последовательности K_{0U} , а также установившееся отклонение напряжения δU , которые определяются по выражениям:

$$\begin{aligned} K_{2u} &= \frac{U_2}{U_{\text{ном.}}} \cdot 100\%, & \delta U_{(-)} &= \frac{U_0 - U_{M(-)}}{U_0} \cdot 100\%, \\ K_{0u} &= \frac{U_0}{U_{\text{ном.}}} \cdot 100\%, & \delta U_{(+)} &= \frac{U_0 - U_{M(+)}}{U_0} \cdot 100\%, \end{aligned} \quad (1)$$

где $U_{\text{ном.ф.}}$ – номинальное значение междуфазного и фазного напряжений, U_2, U_0 – действующее значение напряжения обратной и нулевой последовательности основной частоты трехфазной системы напряжений, U_0 – напряжение, равное стандартному номинальному напряжению, $U_{M(-)}, U_{M(+)}$ – значения напряжения электропитания, меньше U_0 и больше U_0 , соответственно, усредненные в интервале 10 мин.

Показателем, определяющим увеличение потерь мощности, за счет появления симметричных составляющих токов обратной K_{2i} и нулевой последовательности K_{0i} , служит коэффициент потерь:

$$K_p = \Delta P_n / \Delta P_c = K_{1I}^2 + K_{2I}^2 + K_{0I}^2 (r_0 / r_1), \quad (2)$$

где ΔP_n – потери мощности в сети при несимметричном режиме; ΔP_c – потери мощности в системе, обусловленные протеканием токов прямой последовательности; K_{2I} – коэффициент несимметрии токов по обратной последовательности; K_{0I} – коэффициент несимметрии токов по нулевой последовательности; r_0, r_1 – сопротивления, соответственно, нулевой и прямой последовательностей линии электропередачи в компонентах СЭС.

Для оценки уровня несимметрии напряжений и токов были произведены исследования в действующих СЭС, питающих производственные и коммунально-бытовые потребители на территории Иркутской области.

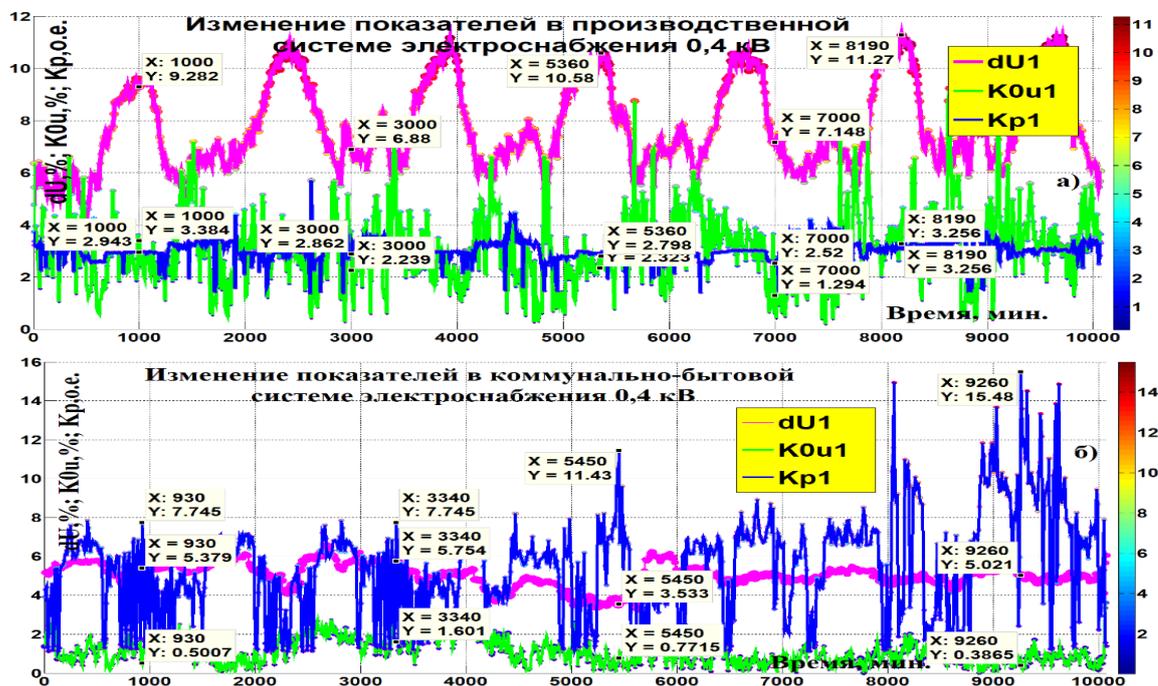


Рисунок 1 – Временные диаграммы изменения исследуемых показателей в СЭС 0,4 кВ, питающих производственные (а) и коммунально-бытовые потребители (б)

Примеры изменения указанных показателей в действующих системах 0,4кВ приведены на рисунке 1.

Анализ указанных зависимостей (рис. 1), а также многочисленных исследований, проведенных на кафедре «Электроснабжения и электротехники» Иркутского ГАУ показал, что исследуемые показатели могут изменяться в широких пределах (K_{0u} до 8 %, K_p до 370 %, δU до 11 %), что в значительной степени превышает нормы, установленные государственным стандартом.

Для улучшения качества электроэнергии и снижения дополнительных потерь мощности, рассмотрены способы, технические средства и произведена их классификация.

На основании проведенного анализа предложены новые схемные и технические решения симметрирования режима работы указанных СЭС. Предлагаемое устройство (рис. 2) является схемным решением симметричного электропотребления за счет перехода с трехфазной на однофазную систему напряжений. Использование такого схемного решения исключает возможность возникновения дополнительных составляющих токов обратной и нулевой последовательностей, которые искажают систему напряжений и создают дополнительные потери мощности.

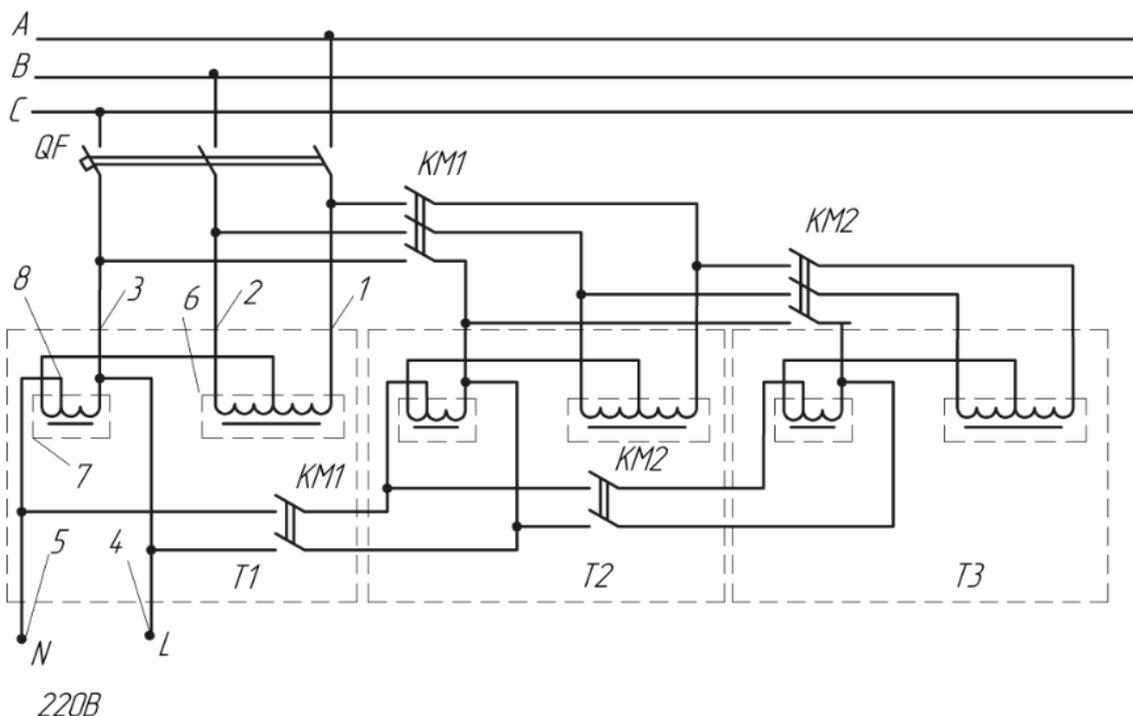


Рисунок 2 – Устройство для преобразования фаз с регулируемой мощностью

В качестве технического устройства для снижения несимметрии предлагается устройство, которое позволяет снизить несимметрию токов и напряжений в трехфазных СЭС с нулевым проводом за счет саморегулирования индуктивности при изменении тока нулевой последовательности (рис. 3).

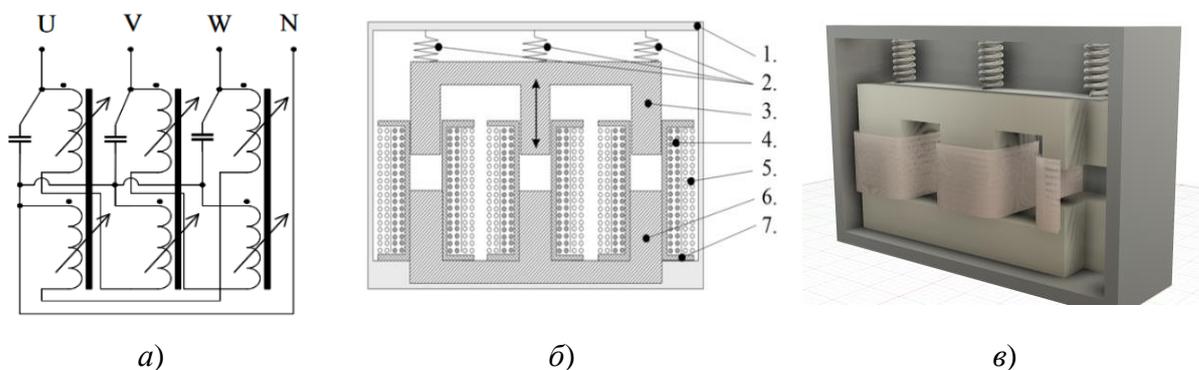


Рисунок 3 – Симметрирующее устройство: а) – электрическая схема; б) – разрез устройства; в) – 3D модель

Во второй главе рассматриваются методы расчета показателей несимметрии токов и напряжений в СЭС, питающих сосредоточенную и распределённую нагрузки потребителей. Представленные алгоритмы расчета позволяют выполнить расчеты коэффициентов K_{2i} , K_{0i} , K_{2U} , K_{0U} и K_p в компонентах СЭС 0,4кВ при отсутствии и подключении симметрирующего устройства (СУ).

Для определения искомых показателей составляется схема замещения участка системы 0,4 кВ с распределенной (либо сосредоточенной) нагрузкой

и СУ (рис. 4 – 5).

Для схемы замещения (рис. 5) составлены системы уравнений симметричных составляющих токов и напряжений:

$$\begin{cases} \underline{I}_{\rightarrow\alpha 1\gamma 2} = \underline{U}_{\gamma 2} \underline{Y}_{\beta\rightarrow\alpha 1}^3 / \underline{Y}_t^3 \\ \underline{I}_{\rightarrow\alpha 2\gamma 2} = \underline{U}_{\gamma 2} \underline{Y}_{p\rightarrow\alpha 2}^3 / \underline{Y}_t^3 \\ \underline{I}_{\rightarrow\alpha 0\gamma 2} = \underline{U}_{\gamma 2} \underline{Y}_{\psi\rightarrow\alpha 0}^3 / \underline{Y}_t^3 \end{cases} \quad \begin{cases} \underline{U}_{\rightarrow\alpha 1\gamma 2} = \underline{U}_{\rightarrow\alpha 1\gamma 1} (\underline{t}_1 \underline{Y}_t^3 - \underline{Y}_\beta^3) / \underline{Y}_t^3 \\ \underline{U}_{\rightarrow\alpha 2\gamma 2} = \underline{U}_{\rightarrow\alpha 1\gamma 1} (\underline{t}_2 \underline{Y}_t^3 - \underline{Y}_p^3) / \underline{Y}_t^3 \\ \underline{U}_{\rightarrow\alpha 1\gamma 2} = \underline{U}_{\rightarrow\alpha 0\gamma 1} (\underline{t}_0 \underline{Y}_t^3 - \underline{Y}_\psi^3) / \underline{Y}_t^3 \end{cases} \quad (3)$$

Совместное решение систем (3) позволяет получить выражения для определения показателей несимметрии токов на участке 1 – 2 линии ($K_{i2(1-2)}, K_{i0(1-2)}$) и показатели несимметрии напряжений в узле (K_{u2}, K_{u0}):

$$\begin{aligned} K_{i2(1-2)} &= \frac{I_{2L}}{I_{1L}} = \frac{\underline{Y}_p^3 \underline{Y}_{\alpha 2\gamma 2} + (\underline{t}_2 \underline{Y}_t^3 - \underline{Y}_p^3)(\underline{Y}_{сн2} + \underline{Y}_{с\gamma 2})}{\underline{Y}_\beta^3 \underline{Y}_{\alpha 1\gamma 2} + (\underline{t}_1 \underline{Y}_t^3 - \underline{Y}_\beta^3)(\underline{Y}_{сн1} + \underline{Y}_{с\gamma 1})} \\ K_{i0(1-2)} &= \frac{I_{0L}}{I_{1L}} = \frac{\underline{Y}_\psi^3 \underline{Y}_{\alpha 0\gamma 2} + (\underline{t}_0 \underline{Y}_t^3 - \underline{Y}_\psi^3) \underline{Y}_{с\gamma 0}}{\underline{Y}_\beta^3 \underline{Y}_{\alpha 1\gamma 2} + (\underline{t}_1 \underline{Y}_t^3 - \underline{Y}_\beta^3)(\underline{Y}_{сн1} + \underline{Y}_{с\gamma 1})}; \end{aligned} \quad (4)$$

$$K_{u2} = \frac{U_{\alpha 2\gamma 2}}{U_{\alpha 1\gamma 2}} = \frac{\underline{t}_2 \underline{Y}_t^3 - \underline{Y}_p^3}{\underline{t}_1 \underline{Y}_t^3 - \underline{Y}_\beta^3},$$

$$K_{u0} = \frac{U_{\alpha 0\gamma 2}}{U_{\alpha 1\gamma 2}} = \frac{\underline{t}_0 \underline{Y}_t^3 - \underline{Y}_\psi^3}{\underline{t}_1 \underline{Y}_t^3 - \underline{Y}_\beta^3},$$

где $\underline{t}_1 = \underline{Y}_{\alpha 1\lambda} / (\underline{Y}_{\alpha 1\lambda} + \underline{Y}_{\alpha 1})$,

$\underline{t}_2 = K_{u2(1)} \underline{Y}_{\alpha 2\lambda} / (\underline{Y}_{\alpha 2\lambda} + \underline{Y}_{\alpha 2})$,

$\underline{t}_0 = K_{u0(1)} \underline{Y}_{\alpha 0\lambda} / (\underline{Y}_{\alpha 0\lambda} + \underline{Y}_{\alpha 0})$,

$\underline{Y}_\beta^3 = \underline{t}_1 \underline{Y}_{H1}^3 + \underline{t}_2 \underline{Y}_{\alpha 2\gamma 2} \underline{Y}_f^2 + \underline{t}_0 \underline{Y}_{\alpha 0\gamma 2} \underline{Y}_a^2$;

$\underline{Y}_p^3 = \underline{t}_2 \underline{Y}_{H2}^3 + \underline{t}_1 \underline{Y}_{\alpha 1\gamma 2} \underline{Y}_k^2 + \underline{t}_0 \underline{Y}_{\alpha 0\gamma 2} \underline{Y}_r^2$; $\underline{Y}_\psi^3 = \underline{t}_0 \underline{Y}_{H0}^3 + \underline{t}_1 \underline{Y}_{\alpha 1\gamma 2} \underline{Y}_l^2 + \underline{t}_2 \underline{Y}_{\alpha 2\gamma 2} \underline{Y}_t^2$.

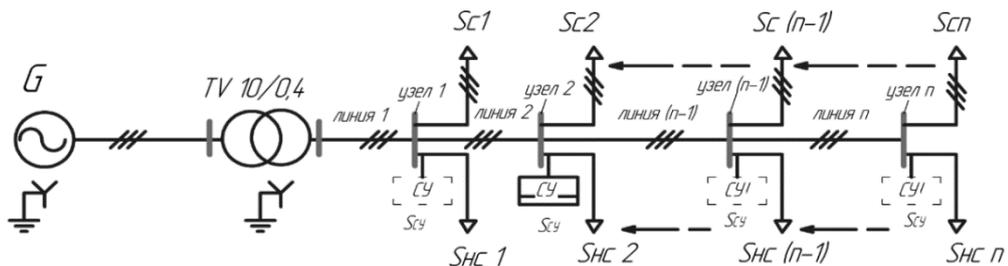


Рисунок 4 – Схема компонента системы электроснабжения 0,4 кВ с распределенной нагрузкой

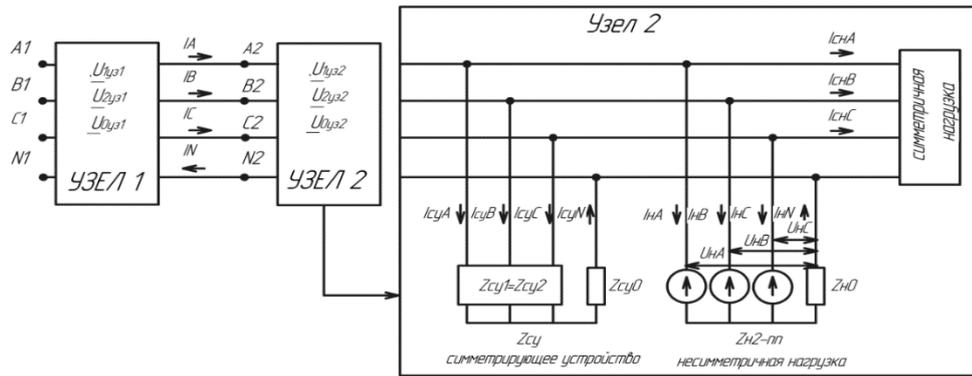


Рисунок 5 – Схема компонента СЭС 0,4 кВ с системой симметричных составляющих напряжений узла 1 и приведенной к узлу 2 распределенной нагрузкой на участке линии 2- п

В этой же главе предложен метод расчёта параметров симметрирующего устройства в зависимости от изменяющихся показателей несимметрии токов и напряжений. Исходными данными для расчета являются токи в фазах $I_A, I_B, I_C, I_{BC}, I_N$, фазные и междуфазные напряжения $U_A, U_B, U_C, U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}$, на основании которых в соответствии с модульным методом расчета определяется симметричные составляющие токов и напряжений. Далее для предлагаемой модели устройства (рис. 3) составляется система уравнений:

$$\begin{cases} \underline{U}_A = \underline{I}_A (2r + (4/3)j\omega L) - \underline{I}_B (2/3)j\omega L - \underline{I}_C (2/3)j\omega L \\ \underline{U}_B = -\underline{I}_A (2/3)j\omega L + \underline{I}_B (2r + (4/3)j\omega L) - \underline{I}_C (2/3)j\omega L \\ \underline{U}_C = -\underline{I}_A (2/3)j\omega L - \underline{I}_B (2/3)j\omega L + \underline{I}_C (2r + (4/3)j\omega L) \end{cases} \quad (5)$$

Дальнейшие преобразования этих выражений, с учетом токов прямой, обратной и нулевой последовательностей СУ, позволило получить выражения для проводимостей:

$$\begin{cases} Y_{cy1} = 1/(2 \cdot U_{h1}/I_{h1} \cdot 7,0714) \\ Y_{cy2} = Y_{cy1} \\ Y_{cy0} = 2 \cdot (3 \cdot I_{h0}/U_{h0}). \end{cases} \quad (6)$$

Произведенные расчеты показали, что значения параметров СУ для конкретного компонента СЭС должны обеспечивать такое его сопротивление нулевой последовательности, при котором будет выдержано требуемое качество электрической энергии при минимальной мощности СУ.

Для реализации моделирования несимметричных режимов и их расчетов разработана программа «Программа по моделированию и расчету несимметричных режимов работы систем 0,4 кВ с распределенной нагрузкой и симметрирующим устройством», написанная на объектно-ориентированном языке программирования «C Sharp» (C#) (рис. 6).

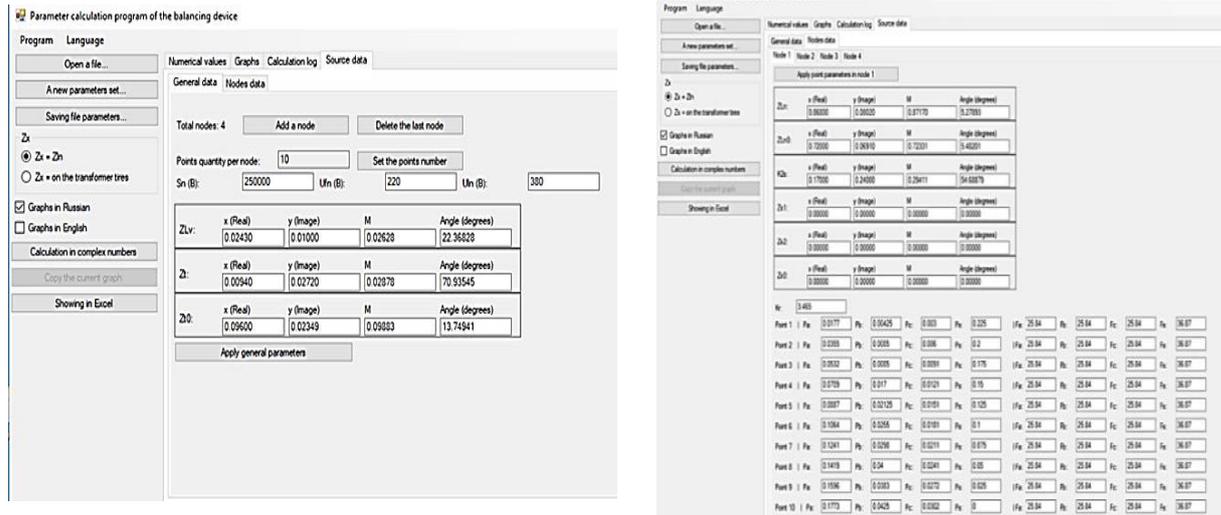


Рисунок 6 – Окна ввода исходных данных программы

Архитектура разработанной программы позволяет осуществлять объектно-ориентированное управление разработанными классами ввода исходных данных, расчета и визуализации искомым показателей.

В качестве примера показаны диаграммы изменения исследуемых коэффициентов при отсутствии и включении СУ в узлах отбора мощности моделируемой системы электроснабжения 0,4 кВ (рисунки 7–8).

В модели предусматривается ввод реальных соотношений значений для трехфазной симметричной и несимметричной нагрузок, а также специализированного СУ.

На основании проведенных *имитационных* исследований установлена эффективность применения разработанной модели СУ, а также определено наиболее целесообразное место включения СУ, которым является первый узел отбора мощности от источника питания.

Для оценки последствий несимметричных режимов разработана программа «Unbalance-2». Эта программа предназначена для определения показателей несимметрии токов и напряжений, коэффициента потерь мощности, обусловленных несимметрией токов в *действующих* СЭС 0,4 кВ с сосредоточенной нагрузкой без симметрирующего устройства и при его включении.

Чаще всего в действующих системах 0,4 кВ число отходящих линий 0,4 кВ от шин трансформаторной подстанции 10/0,4 кВ достигает 4 – 6, которые имеют различный уровень электропотребления. При этом нейтральная точка силового трансформатора, от которой отходит нейтральный провод, может недопустимо перегреваться, что может привести либо к отпайке нейтрального провода от нейтрали трансформатора, либо к пожару непосредственно на шинах 0,4 кВ. Токи нулевой последовательности, суммируясь в нейтральном проводнике, могут достигать больших величин. Особенно в проводниках совре-

менных линий электропередачи 0,4 кВ, выполненных изолированными самонесущими проводами. В этом случае процесс теплопередачи от нагретой нейтральной жилы провода в окружающую среду во многом зависит от тепловых характеристик изоляции.

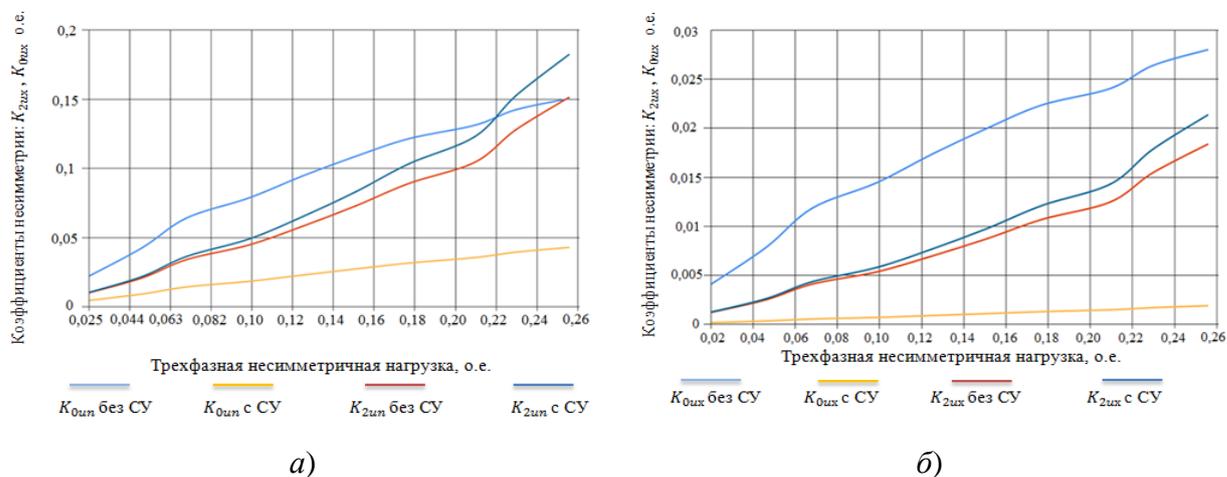


Рисунок 7– Нагрузочные диаграммы изменения коэффициентов K_{2U} и K_{0U} : а) – в 1 узле нагрузок; б) –на шинах силового трансформатора при изменении нагрузки в 1узле

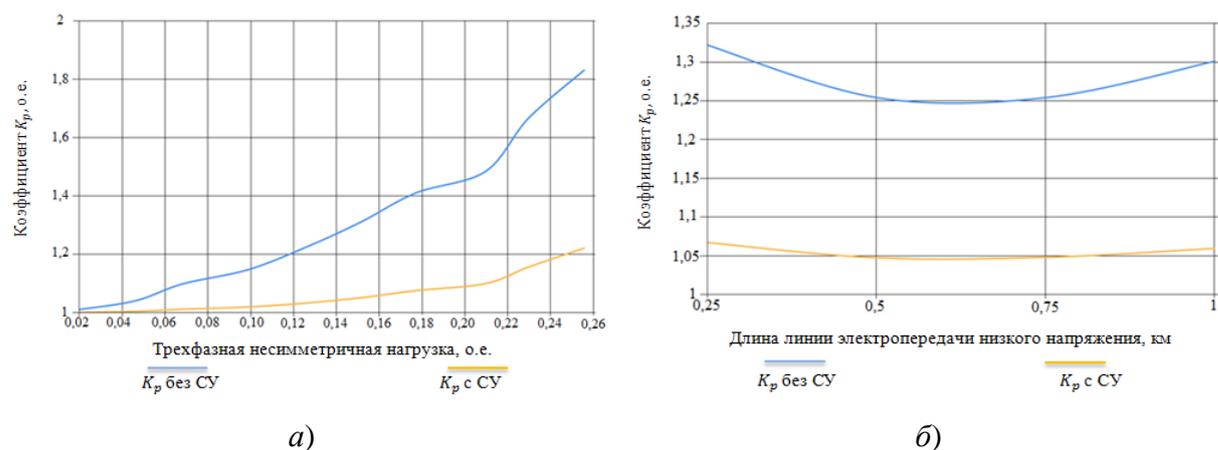


Рисунок 8 – Диаграммы изменения K_p в первом узле нагрузок (а) и его изменение по длине линии 0,4 кВ (б)

В соответствии с этим в работе предложена методика и программа расчета предельных значений тока нулевой последовательности для различных сечений трёхфазных четырехпроводных изолированных проводников, используемых для электропередачи в СЭС с несбалансированным электропотреблением.

Блок-схема алгоритма расчета представлена на рисунке 9. Расчет, произведенный по указанной программе, позволил получить предельно-допустимые значения для тока в нейтральном проводе для проводников разных сечений из меди и алюминия (рис. 10, табл. 1).

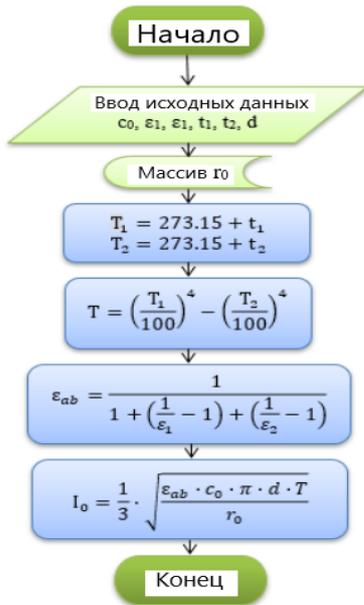


Рисунок 9 – Блок-схема алгоритма расчета допустимого тока нулевой последовательности

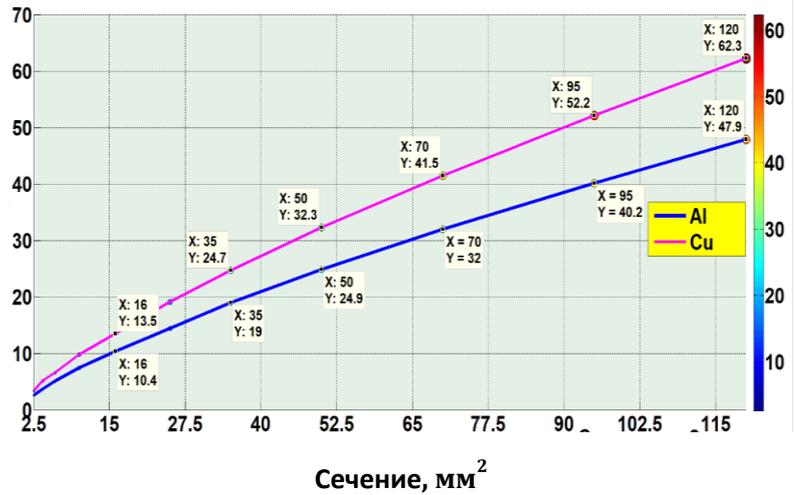


Рисунок 10 – Зависимость предельной величины потока нулевой последовательности в нейтральном проводнике от его сечения

Таблица 1 – Предельные значения тока нейтрального проводника

Вид проводника	Сечение, мм ²	Предельно-допустимое значение тока (А) при значениях температуры окружающей среды, в нейтральном проводе (°С)											
		-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30	35
Al	2,5	3,30	3,23	3,17	3,09	3,02	2,93	2,84	2,74	2,63	2,50	2,37	2,22
	4	4,70	4,61	4,52	4,41	4,30	4,18	4,05	3,90	3,74	3,57	3,38	3,16
	6	6,36	6,24	6,11	5,97	5,82	5,66	5,48	5,28	5,07	4,83	4,57	4,28
	10	9,37	9,20	9,01	8,80	8,58	8,33	8,07	7,78	7,47	7,12	6,73	6,30
	16	13,12	12,87	12,60	12,31	12,00	11,66	11,29	10,89	10,45	9,96	9,42	8,82
	25	18,19	17,85	17,48	17,08	16,64	16,17	15,66	15,10	14,49	13,82	13,07	12,24
	35	23,80	23,35	22,87	22,35	21,78	21,16	20,49	19,76	18,96	18,08	17,10	16,01
	50	31,21	30,62	29,99	29,30	28,55	27,75	26,87	25,91	24,86	23,70	22,42	20,99
	70	40,14	39,38	38,56	37,68	36,72	35,68	34,55	33,32	31,97	30,48	28,84	27,00
	95	50,50	49,55	48,52	47,41	46,21	44,90	43,48	41,92	40,22	38,35	36,28	33,97
120	60,10	58,97	57,75	56,43	54,99	53,44	51,74	49,90	47,87	45,65	43,18	40,43	
Cu	2,5	4,25	4,17	4,09	3,99	3,89	3,78	3,66	3,53	3,39	3,23	3,06	2,86
	4	6,48	6,36	6,23	6,09	5,93	5,77	5,58	5,38	5,16	4,92	4,66	4,36
	6	8,24	8,09	7,92	7,74	7,54	7,33	7,09	6,84	6,56	6,26	5,92	5,54
	10	12,30	12,07	11,82	11,55	11,25	10,94	10,59	10,21	9,80	9,34	8,84	8,27
	16	16,93	16,61	16,27	15,90	15,49	15,05	14,58	14,06	13,49	12,86	12,16	11,39
	25	24,11	23,66	23,17	22,64	22,06	21,44	20,76	20,02	19,21	18,31	17,32	16,22
	35	31,01	30,42	29,79	29,11	28,37	27,57	26,69	25,74	24,70	23,55	22,28	20,86
	50	40,56	39,80	38,97	38,08	37,11	36,06	34,92	33,67	32,31	30,80	29,14	27,28
	70	52,13	51,15	50,09	48,94	47,70	46,35	44,88	43,27	41,52	39,59	37,45	35,07
	95	65,60	64,36	63,03	61,58	60,02	58,32	56,47	54,46	52,25	49,82	47,13	44,13
120	78,24	76,77	75,18	73,46	71,59	69,57	67,36	64,96	62,32	59,42	56,22	52,63	

Использование данных таблицы 1 позволяет установить предельное значение тока в нейтральном проводе и для наружных электрических сетей 0,4 кВ в различных диапазонах температур окружающей среды.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований. Эксперимент проводили для трех видов несимметричной нагрузки (трехфазная, двухфазная и однофазная). Несимметричный режим работы модели системы 0,4 кВ создавался при помощи ламп накаливания EL1 – EL12.

Модель линии 0,4 кВ состоит из участков различной длины (Z_{L1} – 123 м, Z_{L2} – 120 м, Z_{L3} – 133 м, Z_{L4} – 120 м). Схема экспериментальной установки показана на рисунке 11.

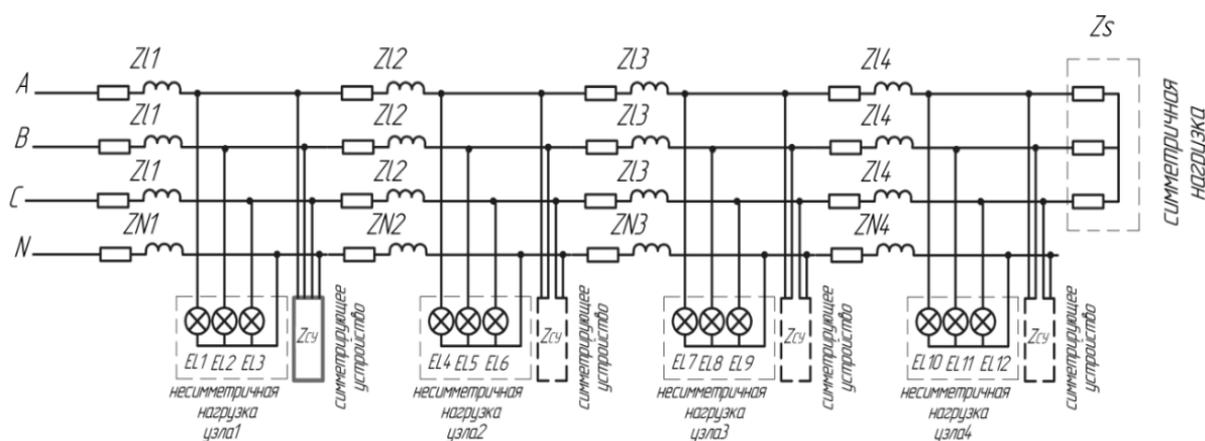


Рисунок 11 – Схема экспериментальной установки

Лабораторная установка для определения показателей несимметрии токов и напряжений и коэффициента потерь мощности на физической модели компонента системы электроснабжения 0,4 кВ представлена на рисунке 12. Активные сопротивления элементов имитировались при помощи резисторов, а реактивные – катушками индуктивности.



Рисунок 12 – Лабораторная установка

В качестве основного измерительного прибора использовался регистратор напряжения и тока «Парма РК 6 05М» (рисунок 13,*а*). Устройство для симметрирования токов и напряжений с саморегулируемой индуктивностью представляет собой трехфазный электромагнитный аппарат, представленный на рис. 3. Общий вид физической модели устройства для симметрирования токов и напряжений в трехфазной системе электроснабжения с саморегулируемой индуктивностью показан на рисунке 13,*б*.



а)

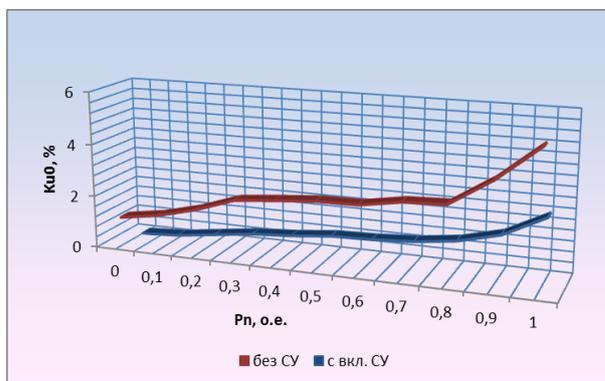


б)

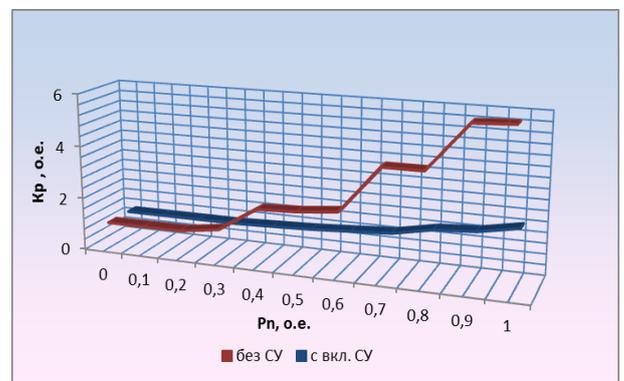


Рисунок 13 – Общий вид измерительного прибора (*а*); физической модели устройства (*б*)

На рисунке 14,*а* представлены зависимости K_{0u} от мощности трехфазной несимметричной нагрузки.



а)



б)

Рисунок 14 – Нагрузочные диаграммы зависимости изменения исследуемых показателей:

а) коэффициента нулевой последовательности напряжения,

б) коэффициента потерь мощности

В четвертой главе приведена оценка экономической эффективности установки предлагаемой модели СУ в системе электроснабжения на территории Иркутской области.

Исследования производились на шинах 0,4 кВ силового трансформатора КТП № 3214, 630-10/0,4 кВ в период с 22 февраля по 1 марта 2022 г. (рис. 15).

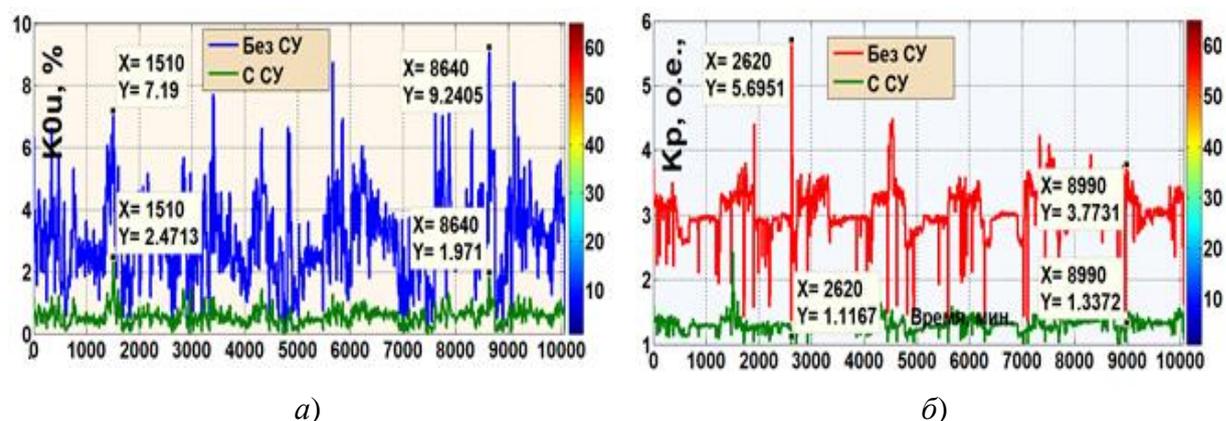


Рисунок 15 – Нагрузочные диаграммы изменения исследуемых показателей в действующей электрической сети 0,4 кВ: коэффициента нулевой последовательности напряжения (а); коэффициента потерь мощности (б)

Произведенные исследования использования разработанной модели СУ в действующем компоненте системы электроснабжения подтверждают результаты теоретических имитационных и экспериментальных лабораторных исследований. Применение разработанной модели устройства для исследуемой действующей СЭС 0,4 кВ позволяют сэкономить 186259,6 кВт·ч электроэнергии в год. Срок окупаемости СУ составляет 0,118 года, а годовой экономический эффект от внедрения устройства (с учетом его стоимости и потерь в нем) – 163632,8 руб.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. В результате произведенного анализа режимов работы действующих систем электроснабжения напряжением 0,4 кВ установлено, что несбалансированное электропотребление нагрузкой в трехфазной системе напряжения электропитания приводит к значительной несимметрии фазных токов и напряжений. В результате этого ухудшаются показатели качества электрической энергии, превышая установленные стандартом значения более чем на 50%, а также почти вдвое увеличивая потери электрической энергии.

2. Произведенным анализом установлено, что наиболее эффективным техническим решением, исключающим возможность возникновения несимметричных режимов, является предложенное новое схемное решение преоб-

разования трёхфазной системы напряжения электропитания в зданиях и сооружениях с небольшим электропотреблением в однофазную систему, имеющую несколько ступеней мощности однофазной нагрузки.

3. На основании произведенного анализа предложено новое симметрирующее устройство с саморегулируемой индуктивностью, автоматически изменяющее свою мощность в соответствии с уровнем несбалансированного электропотребления, позволяющее повысить значения показателей, характеризующих качество электрической энергии к до 80% и снизить дополнительные потери электроэнергии, обусловленные несимметрией токов, до 60%.

3. Впервые предложен метод выбора сечения нейтральных проводников внутренних и внешних компонентов низковольтных систем электроснабжения в зависимости от уровня несимметричного электропотребления. Произведен расчет допустимых сечений этого проводника в зависимости от величины токов нулевой последовательности. Использование предложенной методики позволяет снизить опасность возникновения пожаров в зданиях и сооружениях.

4. Создан метод расчета показателей несимметрии токов и напряжений с симметрирующим устройством, динамично изменяющим свои параметры в зависимости от уровня несбалансированного электропотребления, на основании которого предложены программные комплексы для персонального компьютера, позволяющие осуществлять как имитационное моделирование разноразовного электропотребления в различных компонентах моделей систем электроснабжения, так и производить исследование реальных несимметричных режимов в действующих низковольтных системах электроснабжения с возможностью интеграции в эти системы разработанной модели симметрирующего устройства.

5. На основании разработанного метода определения параметров симметрирующего устройства произведен расчет и создана его физическая модель с саморегулируемой индуктивностью, эффективность которой доказана при проведении экспериментальных исследований в лабораторных условиях.

6. На основании измерений параметров электрической энергии в действующей системе электроснабжения 0,4 кВ произведен расчет параметров симметрирующего устройства и определена его экономическая эффективность по минимизации последствий несимметричных режимов. При том годовой экономический эффект от внедрения одного устройства составил 163632,8 руб., срок окупаемости – 0,118 года, а ежегодная экономия электроэнергии за счет снижения энергетических потерь – 184328,6 кВтч.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы. Разработанные методы расчета в виде программ для ЭВМ и устройства для симмет-

рирования токов и напряжений с саморегулируемой индуктивностью рекомендуется использовать в системах электроснабжения в условиях изменяющегося качества электрической энергии. Это позволит повысить эффективность использования электрической энергии. Перспективы дальнейшей разработки темы диссертационного исследования заключаются в усовершенствовании методов расчёта потерь электрической энергии от несимметрии токов в трехфазных системах с несимметричной и нелинейной нагрузками в условиях несимметрично-несинусоидальных режимов, вызванных несимметричной и нелинейной нагрузками потребителей.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Исследование загрузки силовых трансформаторов в системах сельского электроснабжения / И. В. Наумов, Д. Н. Карамов, **Э.С. Федорина** [и др.]. – DOI: <https://doi.org/10.24223/1999-5555-2020-13-4-282-289>. – Текст: электронный // Надежность и безопасность энергетики. – 2020. – Т. 13, № 4. – С. 282-289. – URL: <https://www.sigma08.ru/jour/article/view/729>.

2. Наумов И.В., **Федорина Э.С.**, Якупова М.А. Устройство для управления несимметричными режимами в компонентах низковольтных систем электроснабжения // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2023. 16(2). 601–612.. – Текст: электронный // eLIBRARY.RU: научная электронная библиотека. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50385738>.

3. Наумов, И. В. Минимизация последствий искажения качества электрической энергии при несимметрично-несинусоидальном электропотреблении / И. В. Наумов, **Э. С. Федорина**, М. А. Якупова // Промышленная энергетика. – 2023. – № 3. – С. 52-61. – DOI 10.34831/EP.2023.56.49.007. – Текст: электронный // eLIBRARY.RU: научная электронная библиотека. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50443380>.

в международных наукометрических базах Scopus:

4. Additional electric loss in rural distribution networks 0.38 kV / I. Naumov, D. Karamov, **E. Fedorinova** [et al.]. – DOI 10.1051/e3sconf/202020907007. – Text: electronic // E3S Web of Conferences. – Irkutsk, 2020. – Vol. 209: ENERGY-21 - Sustainable Development & Smart Management. – Irkutsk, 2020. – URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2020/69/e3sconf_energy212020_07007/e3sconf_energy-212020_07007.html.

5. Asymmetric power consumption in rural electric networks / I. V. Naumov, D. N. Karamov, **E. S. Fedorinova** [et al.]. – DOI 10.1088/1755-1315/677/3/032088. – Text: electronic // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – Krasnoyarsk, 2021. – Vol. 677: IV International Scientific Conference: AGRITECH-IV-2020: Agribusiness, Environmental Engineering and Biotechnologies. – Krasnoyarsk, 2020. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/677/3/032088>.
6. The 0.38 kV electrical networks unbalancing operating modes optimization / I. V. Naumov, S. V. Podyachikh, **E. S. Fedorinova** [и др.]. – DOI: 10.1088/1755-1315/990/1/012069. – Text: electronic // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2022. – Vol. 990: IV International scientific and practical conference "Actual problems of the energy complex: physical processes, mining, production, transmission, processing and environmental protection", (24.11.2021-26.11.2021). – Ст. 012069. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/990/1/012069/pdf>.
7. The calculating asymmetric modes in 0.38 kV electric networks program networks / I. V. Naumov, S. V. Podyachikh, D. A. Ivanov, M. A. Yakupova, **E. S. Fedorinova**. – DOI: 10.1063/5.0105330. – Text: electronic // Conference: VIII international annual conference “industrial technologies and engineering” (ICITE 2021) November 2022 AIP Conference Proceedings 2650 (1): 030021. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/365664812>.
8. Methodological Bases of the Fire Hazard Reduction in Internal and External 0.38 kV Electrical Networks with Unbalancing Power Consumption / I. V. Naumov, S. V. Podyachikh, M. A. Yakupova, **E. S. Fedorinova**. – DOI: 10.1088/1755-1315/1045/1/012145 // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: II International scientific and practical conference "Ensuring sustainable development in the context of agriculture, green energy, ecology and earth science", Smolensk, Russian Federation, 23-27 января 2022 года. Vol. 1045. – Smolensk, Russian Federation: IOP Publishing Ltd, 2022. – P. 012145. – Text: electronic // eLIBRARY.RU: научная электронная библиотека. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49993252>
9. Modeling of Unbalanced Operating Modes in Low-Voltage Distribution Networks / I. V. Naumov, S. V. Podyachikh, **E. S. Fedorinova** [и др.]. – DOI: 10.1007/978-3-030-93244-2_57. – Text: electronic // Imitation Market Modeling in Digital Economy: Game Theoretic Approaches: conference proceedings International Scientific and Practical Conference "New Behaviors of Market Players in the Digital Economy", (Moscow, 08 июля 2021 года). Сер. "Lecture Notes in Networks and Systems" 2022. – Moscow, 2022. – Vol. 368. – С. 516-525. – URL: [NAUMOV_I.V._MODELING.pdf](#).

10. Power quality and losses in 0.38 kV rural distribution networks / I. Naumov, A. Tretiakov, **E. Fedorinova** [et al.]. – DOI: 10.1051/epjconf/201921701012. – Text: electronic // EPJ Web of Conferences. – Irkutsk, 2019. – Vol. 217: International Workshop on Flexibility and Resiliency Problems of Electric Power Systems (FREPS 2019). – URL: https://www.epjconfereces.org/articles/epjconf/abs/2019/22/epjconf_freps18_01012/epjconf_freps18_01012.html.

патенты РФ на изобретение:

11. Патент на изобретение (19) RU (11) 2 788 078 (13) С1. Устройство для преобразования фаз с регулируемой мощностью: опубл. 16.01.2023 / И. В. Наумов, **Э. С. Федоринова**, М. А. Якупова, С. В. Подъячих; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского".

12. Патент на изобретение (19) RU (11) 2 796 074 (13) С1 от 16.01.2023. Опубликовано 16.05.2023. Бюл. № 14 / И.В. Наумов, **Э.С. Федоринова**, М. А. Якупова, С.В. Подъячих; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского".

свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ:

13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022662841 Российская Федерация. Unbalance-1: № 2022662841: заявл. 29.06.2022: зарег. 07.07.2022/ И. В. Наумов, **Э. С. Федоринова**, М. А. Якупова, С.В. Подъячих; правообладатель Иркутский национальный исследовательский технический университет. – 1 с.

14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021667376 Российская Федерация. Программа по моделированию и расчету несимметричных режимов работы электрической сети 0,38 кВ с распределенной нагрузкой и симметрирующим устройством: № 2021666649: заявл. 25.10.2021: зарег. 28.10.2021 / И. В. Наумов, А. А. Митягин, **Э. С. Федоринова**, М. А. Якупова; правообладатель Иркутский национальный исследовательский технический университет. – 1 с.

15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022610925 Российская Федерация. Unbalance-2: № 2022610925: заявл. 11.01.2022: зарег. 18.01.2022/ И. В. Наумов, **Э. С. Федоринова**, М. А. Якупова; правообладатель Иркутский национальный исследовательский технический университет. – 1 с.

в других изданиях:

16. Андриевский, Д. М. Несимметрия напряжений и токов в электрических распределительных сетях объектов АПК / Д. М. Андриевский; науч.

рук. **Э. С. Федоринова** // Значение научных студенческих кружков в инновационном развитии агропромышленного комплекса региона: сборник научных тезисов студентов. – Молодежный, 2021. – С. 167-168. – Текст: электронный // Электронная библиотека ИрГАУ. – URL: http://195.206.39.221/fulltext/i_033011.pdf.

17. К вопросу о повышении уровня управляемости сельскими распределительными электрическими сетями напряжением 0,38 кВ / И. В. Наумов, М. А. Якупова, **Э. С. Федоринова**, Е. С. Карпова // Научные исследования студентов в решении актуальных проблем АПК : материалы всерос. науч.-практ. конф., (14-15 марта 2019 г.) : в 4 т. – Молодежный, 2019. – Т. 2. – С. 146-154. – Текст: электронный // Электронная библиотека ИрГАУ. – URL: http://195.206.39.221/fulltext/i_030914.pdf (дата обращения: 15.12.2022). – Режим доступа: для авторизир. пользователей.

18. **Федоринова, Э. С.** Применение программируемого логического реле в качестве системы автоматического управления симметрирующим устройством / Э. С. Федоринова, Д. С. Ермолаев // Научные исследования и разработки к внедрению в АПК : материалы Международной научно-практической конференции молодых ученых 17-18 марта 2022 г. – Молодежный, 2022. – С. 322-327. – Текст: электронный // Электронная библиотека ИрГАУ. – URL: http://195.206.39.221/fulltext/i_033377.pdf.

19. **Федоринова, Э. С.** Методы измерения показателей качества электрической энергии / Э. С. Федоринова; науч. рук. И. В. Наумов // Значение научных студенческих кружков в инновационном развитии агропромышленного комплекса региона: Сборник научных тезисов студентов, п. Молодежный, (13-14 октября 2022 года). – п. Молодежный: Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского, 2022. – С. 453-454. – Текст: электронный // Электронная библиотека Иркутского ГАУ. – URL: http://195.206.39.221/fulltext/i_033444.pdf.

20. Экспериментальное исследование показателей качества электрической энергии в лабораторных условиях / И. В. Наумов, **Э. С. Федоринова**, М. А. Якупова, А. А. Домарацкий // Актуальные вопросы аграрной науки. – 2023. – № 46. – С. 14-21. – Текст: электронный // eLIBRARY.RU: научная электронная библиотека. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50471513>.

21. Якупова, М. А. К вопросу о дополнительных потерях электрической энергии в сельских распределительных электрических сетях, напряжением 0,38 кВ / М. А. Якупова, **Э. С. Федоринова**, И. В. Наумов // Научные исследования и разработки к внедрению в АПК : материалы международной научно-практической конференции молодых ученых "Научные исследования и разработки к внедрению в АПК" (26-27 марта 2020 г.). – Молодежный, 2020.

– С. 322-329. – Текст: электронный // Электронная библиотека ИрГАУ. – URL: http://195.206.39.221/fulltext/i_032161.pdf.

22. Якупова, М. А. Исследование качества и дополнительных потерь электрической энергии при несимметричном электропотреблении в действующих сельских распределительных электрических сетях напряжением 0,38 кВ / М. А. Якупова, Э. С. Федоринова, И. В. Наумов // Научные исследования и разработки к внедрению в АПК : материалы международной научно-практической конференции молодых ученых "Научные исследования и разработки к внедрению в АПК" (26-27 марта 2020 г.). – Молодежный, 2020. – С. 330-337. – Текст: электронный // Электронная библиотека ИрГАУ. – URL: http://195.206.39.221/fulltext/i_032161.pdf.