

На правах рукописи



ЛЫУ КУОК КЫОНГ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 0,4
КВ ЗА СЧЁТ СИММЕТРИРОВАНИЯ ФАЗНЫХ НАГРУЗОК**

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань – 2024

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» на кафедре «Электроэнергетические системы и сети».

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Маклецов Александр Михайлович

Официальные оппоненты: Янченко Сергей Александрович,
доктор технических наук,
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, кафедра
«Электроснабжение промышленных предприятий и электротехнологий», профессор.

Куделина Дарья Васильевна,
кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-
Западный государственный университет», г. Курск,
кафедра инфраструктурных энергетических систем,
доцент.

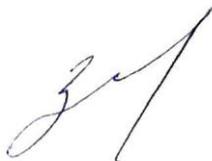
Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Марийский государственный университет», г. Йошкар-Ола.

Защита диссертации состоится 24 сентября 2024 г. в 14 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.310.02 при ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» по адресу: 420066 г. Казань, ул. Красносельская, 51, ауд. Д- 224, тел./факс (843) 519-42-55.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, с указанием контактных данных и заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 420066 г. Казань, ул. Красносельская, 51, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.310.02. С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» и на официальном сайте КГЭУ <https://kgeu.ru/Diss/Dissertant/273?idDiss=154>.

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Зиганшин Шамиль Гаязович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень её разработанности.

Основными приоритетами развития и эффективности функционирования электрических сетей являются внедрение энергосберегающих технологий, а также повышение надежности и безопасности электроснабжения потребителей. В настоящее время потери электроэнергии в электрических сетях РФ составляют около 7%, причем существенная часть этих потерь приходится на сети 10- 0,4 кВ. Так, в « » 10-0,4 2022 . 58% .

Значительную часть потерь электроэнергии в сетях 0,4 кВ (до 50%) составляют потери от несимметрии фазных нагрузок. Несимметрия нагрузок велика в сетях, имеющих в своем составе однофазные потребители, что характерно для коммунально-бытовых нагрузок. Причем, в сельской местности эти нагрузки распределены вдоль линий 0,4 кВ, и, как правило, неравномерно.

Несимметрия фазных нагрузок может вызвать недопустимое нарушение показателей качества электроэнергии, регламентируемых ГОСТ 321144-2013. Так, несимметрия нагрузок может привести к недопустимому снижению напряжения сильно нагруженных фаз.

Кроме снижения потерь электроэнергии и повышения ее качества необходимость симметрирования электрических сетей 0,4 кВ обуславливается также повышенной опасностью эксплуатации несимметричных сетей при обрыве нулевого провода. При несимметричной нагрузке и обрыве нулевого провода напряжения отдельных фаз могут существенно превышать допустимые, что может вызвать выход из строя электроприемников потребителей и дополнительные финансовые риски электроснабжающих организаций. Величина фазных перенапряжений зависит от степени несимметрии ее нагрузки и может достигать практически линейного напряжения. Появление опасных перенапряжений, кроме выхода из строя электроприемников потребителей, может привести к пожарам и поражения людей электрическим током, т.е. оказывает существенное влияние на обеспечение безопасности жизнедеятельности населения и эксплуатационного персонала сетевых предприятий.

Осуществляемая в настоящее время замена голых проводников ВЛ 0,4 кВ на самонесущие изолированные провода (СИП) резко снижает вероятность обрыва нулевого провода на участках ВЛ, однако по-прежнему не исключается возможность обрыва этого провода на шинах ТП. Кроме того, к настоящему времени остается в эксплуатации большое количество ЛЭП 0,4 кВ с неизолированными проводами. Так, в электрических сетях РТ, после 35 лет внедрения СИП ВЛ с неизолированными проводами составляют более половины всех ВЛ 0,4 кВ.

До внедрения интеллектуальных устройств измерения, передачи и обработки информации о параметрах режима электрических сетей информацию о несимметрии нагрузок эксплуатационный персонал электроснабжающих организаций получал, как правило, 2 раза в год в дни контрольных замеров (один день в июне и один день в декабре), что приводило к редкому, часто несвоевременному и неправильному симметрированию нагрузок. Контрольные замеры проводятся в голове ЛЭП, что не всегда позволяет сделать однозначный вывод о необходимости симметрирования нагрузок. В результате ручное симметрирование (переключения фазных нагрузок в

точках отпуска электроэнергии на опорах ВЛ) до настоящего времени производится, в основном, только по жалобам потребителей.

Проблеме оценки степени несимметрии и снижения потерь электроэнергии в электрических сетях 0,4 кВ посвящено значительное количество исследований, которые отражены в работах многих авторов (Воротницкий В.Э., Жежеленко И.В., Железко Ю.С., Закарюкин В.П., Карташев И.И., Косоухов Ф.Д., Наумов И.В., Попов Н.М., Троицкий А.И., Шидловский А.К., Дед А.В. и др.).

Однако результаты исследований несимметричных режимов сетей 0,4 кВ из-за недостатка измерений параметров режима всех распределенных вдоль длины ЛЭП нагрузок до настоящего времени имели оценочный характер, а применяемые методы и нормативные документы для оценки влияния несимметрии нагрузок на потери электроэнергии не позволяли осуществлять эту оценку корректно.

28 декабря 2018 года вступил в силу Федеральный закон от 27.12.2018 № 522-ФЗ «О внесении изменений в отдельные законодательные акты РФ в связи с развитием систем учета электрической энергии (мощности)». Кроме того, 19 июня 2020 г. правительством РФ принято постановление №890 «О порядке предоставления доступа к минимальному набору функций интеллектуальных систем учета электрической энергии (мощности)». Согласно вышеуказанным документам, субъекты электроэнергетики обязаны переходить на интеллектуальные системы учёта электроэнергии с 2020 года. Такой переход с регистрацией и передачей данных о параметрах режима всех узлов нагрузок в режиме реального времени открывает новые возможности для оценки степени несимметрии сетей и выработки рекомендаций для ее симметрирования.

Объектом исследования являются четырехпроводные электрические сети 0,4 кВ с трансформаторами со схемой соединения вторичной обмотки «звезда с нулем» и ЛЭП при распределенной вдоль их длины нагрузке.

Предметом исследования являются методы определения дополнительных потерь мощности (электроэнергии) и перенапряжения в сетях 0,4 кВ, вызванные наличием несимметричной нагрузки.

Целью диссертационной работы является снижение потерь электроэнергии в электрических сетях 0,4 кВ, а также повышение безопасности их эксплуатации за счет симметрирования фазных нагрузок

Основные задачи работы заключаются в следующем:

1. Анализ существующих подходов учета несимметрии нагрузок при расчетах режимов работы сетей 0,4 кВ.
2. Анализ существующих подходов учета характера распределения нагрузок вдоль ЛЭП в электрических сетях 0,4 кВ.
3. Определение целесообразного способа задания нагрузок при расчетах режимов четырехпроводных электрических сетей с распределенной воль линии нагрузкой в режиме реального времени.
4. Разработка методики, алгоритма и программы для определения в режиме реального времени возможных перенапряжений электроприемников при обрыве нулевого провода.
5. Разработка методики, алгоритма и программы для определения оптимальных схем симметрирования по критерию минимума потерь мощности.
6. Разработка алгоритма симметрирующих переключений для ручных или автоматических переключателей фаз по критерию минимума потерь электроэнергии.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Определен целесообразный способ задания исходной информации для расчетов режимов работы электрических сетей 0,4 кВ с распределенной вдоль длины ЛЭП нагрузкой в реальном времени по данным показаний интеллектуальных счетчиков электроэнергии.
2. Разработана методика расчета режимов ЛЭП при обрыве проводов, отличающаяся использованием информации о распределенных вдоль ЛЭП фазных нагрузках.
3. Разработана методика оптимального симметрирования с помощью метода «Роя частиц» по критерию минимума потерь мощности.

Теоретическая значимость результатов работы состоит в развитии методов расчета режимов электрических сетей 0,4 кВ и оптимизации симметрирующих переключений с использованием интеллектуальной системы измерений параметров режима.

Практическая ценность и внедрение результатов работы

Получен новый подход к расчетам режимов четырехпроводных электрических сетей 0,4 кВ на основе использования в качестве исходной информации показаний интеллектуальных счетчиков электроэнергии, позволяющий производить корректные расчеты потерь мощности в ЛЭП и оптимизировать симметрирующие переключения.

Кроме того, необходимость симметрирования может определяться по критерию недопустимых перенапряжений при обрыве нулевого провода. В конечном итоге, использование результатов работы позволит уменьшить величину потерь электроэнергии в электрических сетях и повысить безопасность жизнедеятельности населения и эксплуатационного персонала электрических сетей.

Результаты работы используются в ГУП РТ «Электрические сети» при формировании интеллектуальных систем учета и измерений.

Методология и методы исследования:

В работе используются методы и средства модели и средства математического моделирования режимов сетей 0,4 кВ. Для выбора оптимального порядка симметрирующих переключений применен метод «Роя частиц». Алгоритмы реализованы программными комплексами Microsoft Excel, Matlab.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты оценки существующих подходов к определению дополнительных потерь электроэнергии от несимметрии фазных нагрузок в сетях 0,4 кВ и способов уменьшения этих потерь.
2. Обоснование выбора способа задания нагрузок при расчетах режимов четырехпроводных электрических сетей в реальном времени при использовании информации от интеллектуальных счетчиков электроэнергии.
3. Методика, алгоритм и программа для определения в режиме реального времени возможных перенапряжений электроприемников при обрыве нулевого провода и определения места его обрыва.
4. Методика, алгоритмы и программа для оптимального симметрирования фазных нагрузок по критерию минимума потерь мощности.

Степень достоверности результатов.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием общепринятых методов исследований, а также повторяемостью полученных результатов.

Апробация работы.

Результаты, полученные в ходе научных исследований, и основные тезисы диссертационной работы представлялись на обсуждение и получили одобрение на:

- Международной молодежной научной конференции Тинчуринские чтения – 2019. г. Казань
- Международной молодежной научной конференции Тинчуринские чтения – 2022. г. Казань
- Третьей Республиканской научно-практической конференции «Современные технологии в электроэнергетике и промышленности» –2022. г. Хунжанд.

Публикации: По теме диссертации опубликовано 6 печатных работ, из них 3 статьи в журналах перечня ВАК и получено одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора:

Автору работы принадлежит постановка научно-исследовательской задачи определения подхода к определению режимов сетей на основе показаний интеллектуальных счетчиков электроэнергии, разработка методики оптимизации симметрирования на основе метода «Роя частиц», а также разработка алгоритмов и программ в средах Microsoft Excel и Matlab. Им сформулированы основные выводы по работе. Вклад автора в каждую из опубликованных в соавторстве работ составляет не менее 50%.

Соответствие темы диссертации паспорту научной специальности.

Диссертационная работа соответствует следующим областям исследования паспорта научной специальности 2.4.2. «Электротехнические комплексы и системы»:

П.1. «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, анализ системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем...». В диссертационной работе представлены результаты математического моделирования четырехпроводной ЛЭП с распределенной вдоль ее длины нагрузкой. Модели ЛЭП реализованы в компьютерных программах **REG** и **ROI** для расчетов режимов и оптимизации симметрирующих переключений в электрических сетях 0,4 кВ.

П.3. «Разработка, структурный и параметрический синтез, оптимизация электротехнических комплексов, систем и их компонентов, разработка алгоритмов эффективного управления». В диссертации представлены разработанные алгоритмы и программы для оптимизации симметрирующих переключений в целях снижения потерь электроэнергии и повышения безопасности эксплуатации электрических сетей 0,4 кВ.

Структура и объем диссертации.

Диссертация включает в себя введение, четыре главы содержащий основной текст, заключение, библиографический список и приложения. Основной объем диссертации представлен на 113 страницах, содержащих 45 рисунков и 15 таблиц. Библиографический список состоит из 92 наименования. В приложениях приведены блок-схемы, коды разработанных программ и справка о внедрении результатов работы. Объем приложений составляет 14 стр.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, определены цели и задачи диссертационной работы, сформулирована её научная новизна, теоретическая и практическая значимость, выносимые на защиту научные положения, достоверность и обоснованность результатов и выводов, приведены сведения о научных публикациях и апробации работы.

В первой главе приведен анализ существующих методов оценки степени несимметрии сетей 0,4 кВ и способов снижения дополнительных потерь от несимметрии фазных нагрузок. В настоящее время из-за недостатка исходной информации разработанные методы расчета потерь мощности и энергии в сетях 0,4 кВ носят оценочный характер, не позволяющий корректно определить дополнительные потери мощности от несимметрии нагрузок. Отсутствует широкое внедрение симметрирующих устройств из-за сложности оценки их эффективности при существующей степени наблюдаемости электрических сетей 0,4 кВ.

Существующие методы расчета дополнительных потерь электроэнергии от несимметрии фазных нагрузок из-за недостаточной наблюдаемости сельских и пригородных электрических сетей не могут быть использованы для решения задач оптимального симметрирования.

Во второй главе определен состав исходной информация для решения задачи энергосберегающего симметрирования нагрузок. Существующие подходы к расчетам режимов 4-х проводных электрических сетей с распределенными нагрузками вдоль ЛЭП из-за недостатка исходной информации о топологии и характере нагрузок характеризуются значительными погрешностями.

При оценке дополнительных потерь мощности от несимметрии распределенных вдоль ЛЭП нагрузок в настоящее время приходится решать две усложняющие задачу проблемы: неопределенность характера распределения нагрузки вдоль ЛЭП и наличие измерений параметров режима только в начале этой ЛЭП.

В настоящее время для расчета нагрузочных потерь мощности в сетях с преимущественно с коммунально-бытовой нагрузкой принято считать нагрузку, равномерно распределенной вдоль длины ЛЭП. По разработанной в рамках диссертации программе проведены сравнительные расчеты потерь мощности при равномерно распределенной и относительно сосредоточенной нагрузке по длине ЛЭП.

Расчеты проводились для ЛЭП с 20 узлами потребления (опорами ЛЭП), упрощенная схема которой приведена на рисунке 1. В качестве исходной информации использовались параметры ЛЭП и нагрузки каждого из 20 узлов. Результаты расчетов приведены на рисунках 2 и 3, из которых видно, что вне зависимости от величины суммарно передаваемой по ЛЭП величины мощности ($S_{\text{сум}}$) и кратности нагрузки наиболее нагруженной опоры, допущение о равномерности распределения нагрузки справедливо, когда наиболее нагруженные узлы сосредоточены вблизи середины ЛЭП (в рассматриваемом случае – это опора №10).

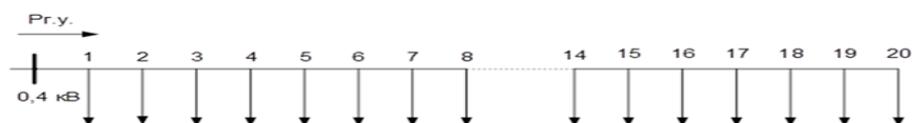


Рис. 1. – Упрощенная схема ЛЭП 0,4 кВ

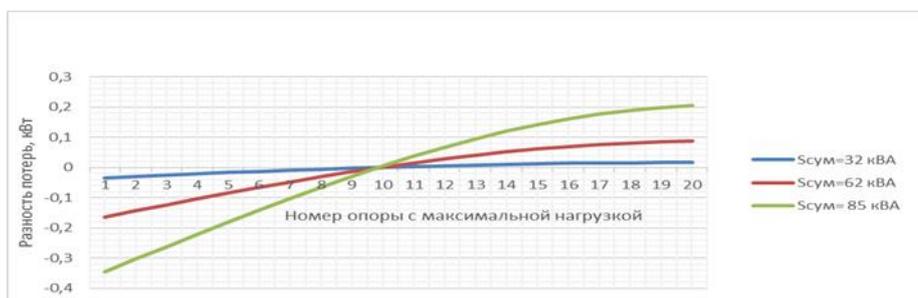


Рис.2. – Разность потерь мощности в ЛЭП 0,4 кВ при двухкратной нагрузке одного из узлов по сравнению с равномерно распределенной нагрузке

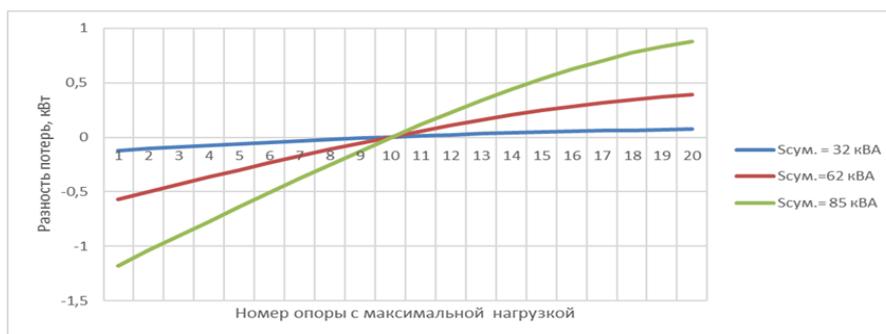


Рис.3.– Разность потерь мощности в ЛЭП 0,4 кВ при пятикратной нагрузке одного из узлов по сравнению с равномерно распределенной нагрузке

Если предположить, что максимальная нагрузка сосредоточена между серединой ЛЭП и ее концом (например, в районе опоры №14), то потери мощности в ЛЭП составят 3,95 кВт и будут превышать расчетные по условиям равномерности распределения на 0,5 кВт (см. рис. 3). В этом случае недоучтенные потери мощности составят 12,65 % ($0,5 \cdot 100 / 3,95 = 12,65$ %) суммарных потерь. При размещении максимальных нагрузок ближе к началу ЛЭП ввиду нелинейности характеристик потерь мощности погрешность расчетов будет еще выше. И только при наличии информации о нагрузках всех узлов результаты расчетов могут быть корректными.

Вторая из указанных выше проблем-наличие измерений параметров режима только в начале ЛЭП также может приводить к значительным погрешностям расчетов потерь мощности при несимметричной нагрузке. Увеличение потерь мощности из-за несимметрии фазных нагрузок учитывают с помощью коэффициента $K_{нн}$:

$$K_{нн} = \frac{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2}{3I_{ср}^2} * \left(1 + 1,5 \frac{R_H}{R_\phi} \right) - 1,5 \frac{R_H}{R_\phi}, \quad (1)$$

где: I_a, I_b, I_c – измеренные токи фаз; $I_{ср}$ – средний ток трех фаз; R_H, R_ϕ – сопротивления нулевого и фазных проводов.

Тогда потери мощности при несимметричном режиме

$$\Delta P_{нс} = \Delta P_c * K_{нн}, \quad (2)$$

где ΔP_c – потери мощности в той же сети и при симметричной нагрузке с условием потребления той же мощности.

Следует отметить, что приведенные формулы не учитывают характер распределения нагрузки вдоль ЛЭП, в том числе коэффициенты $K_{нн}$ на различных участках ЛЭП из-за отсутствия информации о топологии и характере конкретных потребителей. С помощью указанных формул однозначно определяются потери

мощности при сосредоточенной нагрузке. В то же время при распределенной нагрузке степень несимметрии измеренных токов в начале ЛЭП может отличаться от несимметрии токов на отдельных участках этой ЛЭП, что может привести к существенным погрешностям определения потерь мощности. Ниже приведена оценка такой погрешности для простейшего примера схемы с двумя нагрузочными узлами (рис. 4).

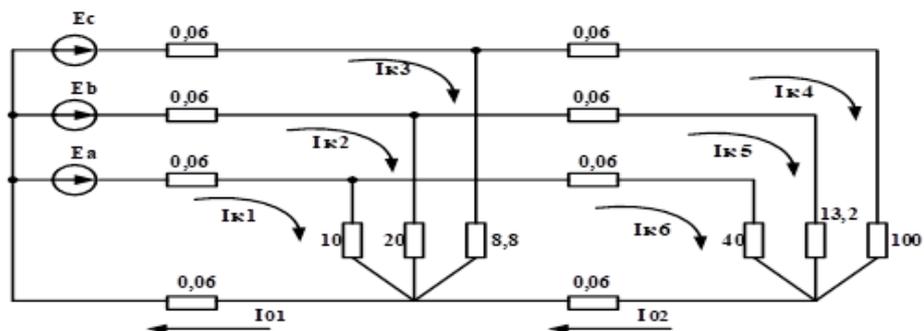


Рис. 4.– Электрическая схема сети с двумя нагрузочными узлами

На приведенной схеме сопротивления линии (фазные и нулевой провод) представлены активными сопротивлениями, Ом. Фазные несимметричные нагрузки (поперечные сопротивления) также представлены активными сопротивлениями. Представленные на схеме исходные данные соответствуют двум участкам ЛЭП длиной по 100 м. с проводами А-50 и суммарной активной нагрузкой около 20 кВт. Нагрузки узлов несимметричны и на втором участке сети однозначно имеются дополнительные потери от несимметрии этих нагрузок. Однако, после эквивалентирования схема оказывается симметричной (рис. 5), что и покажут результаты измерения параметров режима в начале ЛЭП.

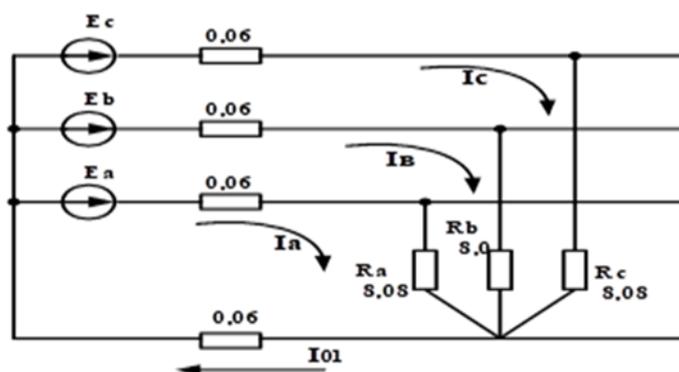


Рис. 5. – Эквивалентная схема исходной сети

Таким образом, эквивалентная схема получилась симметричной. При этом суммарные потери мощности, определенные по формуле (2) с учетом формулы (1) составили 146,37 Вт.

Расчет сети, представленной на рис. 4, производился также методом контурных токов, при этом суммарные потери в линии оказались равными 163,6 Вт.

Таким образом, недоучтенные потери при расчете по формулам (2) и методом контурных токов составят 10,5%.

Широкое внедрение интеллектуальных счетчиков с возможностью мониторинга параметров режима позволит производить более точные расчеты потерь мощности и электроэнергии для коррекции этих режимов в реальном времени. Измеряемые и

регистрируемые параметры режима (токи, мощности, напряжения) доступны для считывания по имеющимся интерфейсам (протокол обмена соответствует стандарту СПОДЭС ПАО «Россети», DLMS/COSEM) и поддерживаются в ПО ИВК «Пирамида-сети».

Проведенный анализ способов задания информации о нагрузках узлов показал, что при наличии измерений, полученных от интеллектуальных счетчиков электроэнергии, нагрузки узлов для оценки потерь электроэнергии целесообразно задавать усредненными (за неделю, за сезон) графиками изменения активных и реактивных сопротивлений узлов. Суточные графики однозначно определяются по результатам мониторинга интеллектуальных счетчиков (рис. 6 и рис. 7).

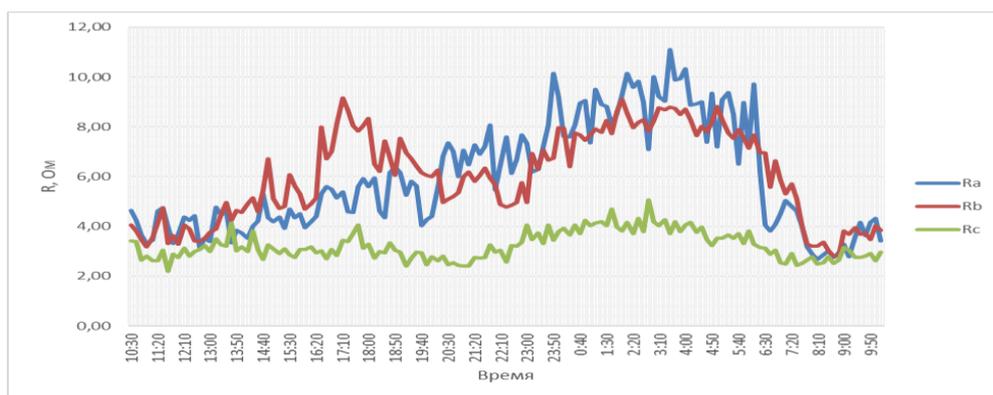


Рис. 6.– Эквивалентные активные сопротивления ЛЭП

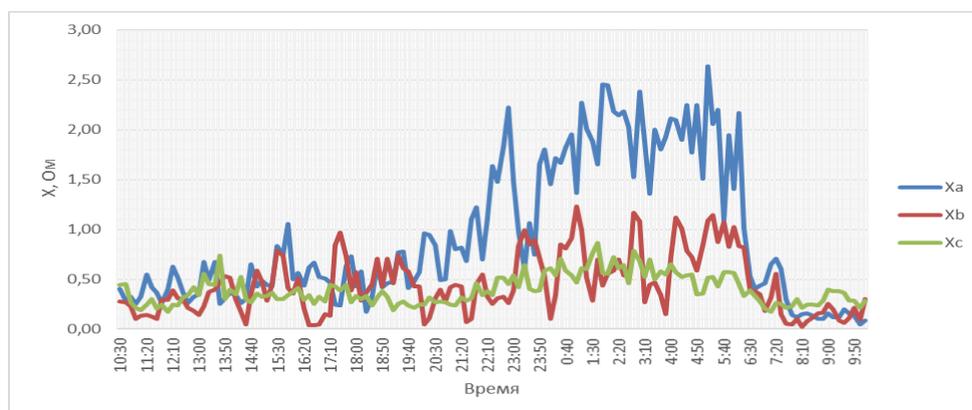


Рис.7. – Эквивалентные реактивные сопротивления ЛЭП

При использовании в качестве исходных данных для расчетов режимов сети с распределенной вдоль ЛЭП нагрузками активных и реактивных сопротивлений узлов система уравнений установившегося режима сети имеет линейный характер, что существенно уменьшает время решения. Кроме того, задание нагрузок сопротивлениями автоматически учитывает зависимость потребляемой мощности от напряжений узлов (статические характеристики нагрузок)

Третья глава диссертации посвящена обрывам проводов ЛЭП при несимметричных нагрузках. Обрывы фазных проводов и падения их на землю не всегда приводят к немедленному отключению линии из-за наличия переходного сопротивления замыкания. Указанная ситуация оказывается очень опасной, так как на земле оказывается провод, находящийся под напряжением. Повышение безопасности

людей при обрыве фазных проводов осуществляется за счет совершенствования устройств релейной защиты и в данной работе не рассматривается. Других последствий, кроме недоотпуска электроэнергии потребителям, подключенным к оборвавшемуся проводу как при симметричных, так и несимметричных нагрузках, обрыв фазных проводов не вызывает.

Обрыв нулевого провода при несимметричных нагрузках в определенных случаях приводит к значительному перекосу фазных напряжений. При этом напряжение некоторых фаз могут оказаться значительно выше номинальных, а некоторых фаз – значительно меньше номинальных. Ниже приведен предлагаемый для расчета напряжений в критических точках метод расчета напряжений для сетей с распределенной и несимметричной нагрузкой при обрыве нулевого провода. При этом нагрузки моделируются комплексными сопротивлениями.

На первом этапе производится эквивалентирование схемы до точки обрыва и после нее. Начинать необходимо с конца сети. Например, для схемы, приведенной на рисунке 8, необходимо последовательно сложить комплексные сопротивления 1, 2, 3, а затем результат этого сложения сложить параллельно с 4 и т.д.

В результате получается схема, показанная на рис. 9. Так как до места обрыва схема работает в обычном несимметричном режиме, то критическими оказываются напряжения в узлах после обрыва (точки 13, 14, 15).

Для расчета предлагается использовать метод контурных токов. Выбор метода обоснован простым алгоритмом составления контурных уравнений, так как контурные токи замыкаются через узловые нагрузки. А для эквивалентированной схемы (рис. 9) всегда решается система только 5-ти линейных контурных уравнений

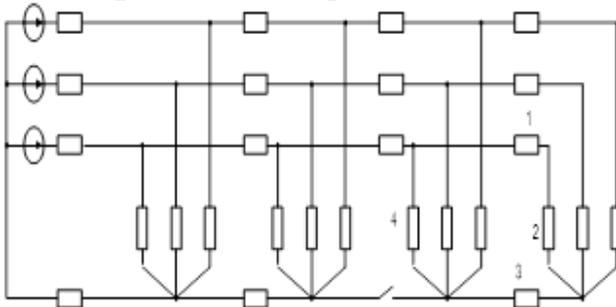


Рис.8.– Пример схемы с обрывом нулевого провода на участке ЛЭП

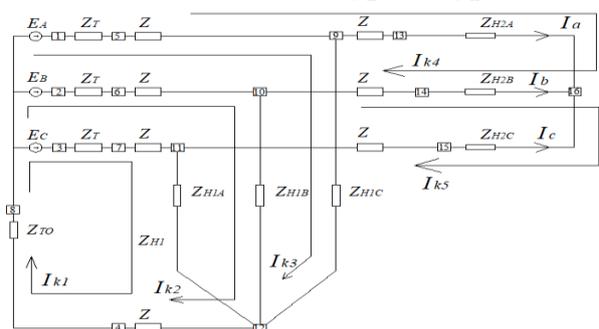


Рис.9. – Эквивалентная схема с обрывом нулевого провода на участке ЛЭП

Система 5-ти линейных контурных уравнений:

$$\begin{cases} I_{k1}(Z_T + 2Z + Z_{H1A} + Z_{T0}) + I_{k2}(Z + Z_{T0}) + I_{k3}(Z + Z_{T0}) - I_{k5}(Z_T + Z) = E_C \\ I_{k2}(Z_T + 2Z + Z_{H1B} + Z_{T0}) + I_{k1}(Z + Z_{T0}) + I_{k3}(Z + Z_{T0}) - I_{k4}(Z_T + Z) = E_B \\ I_{k3}(Z_T + 2Z + Z_{H1C} + Z_{T0}) + I_{k1}(Z + Z_{T0}) + I_{k2}(Z + Z_{T0}) + I_{k4}(Z_T + Z) = E_A \\ I_{k4}(2Z_T + 4Z + Z_{H2A} + Z_{H2B}) - I_{k2}(Z + Z_T) = E_A - E_B \\ I_{k5}(2Z_T + 4Z + Z_{H2B} + Z_{H2C}) - I_{k1}(Z + Z_T) = E_B - E_C \end{cases} \quad (3)$$

Так как величина фазных напряжений в узлах ЛЭП, расположенных после места обрыва нулевого провода, существенно зависит от степени несимметрии части ЛЭП, расположенной после обрыва, то выявление наибольших перенапряжений возможно лишь после поочередных расчетов режимов при обрывах нулевого провода на всех участках линии. На рис. 10 представлены результаты расчета фазных напряжений при

обрыве нулевого провода . Расчет произведен программой «**OBRW**», написанной в среде Matlab.

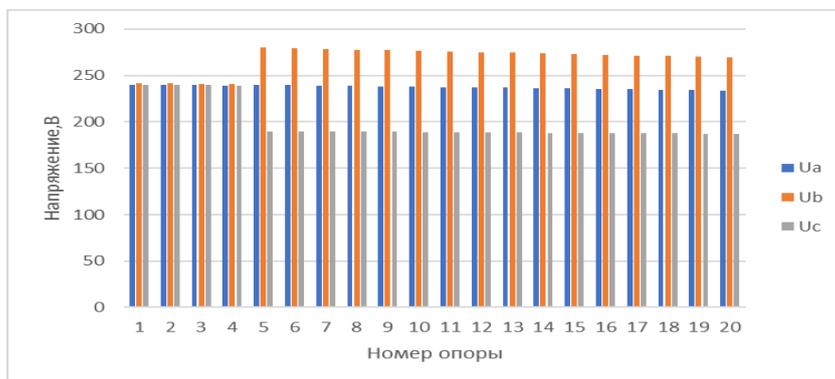


Рис.10. – Напряжения фаз при обрыве нулевого провода перед опорой №5

На рис. 11 показаны суточные (с часовым интервалом) графики фазных напряжений на опоре №1 при обрыве нулевого провода в начале ЛЭП

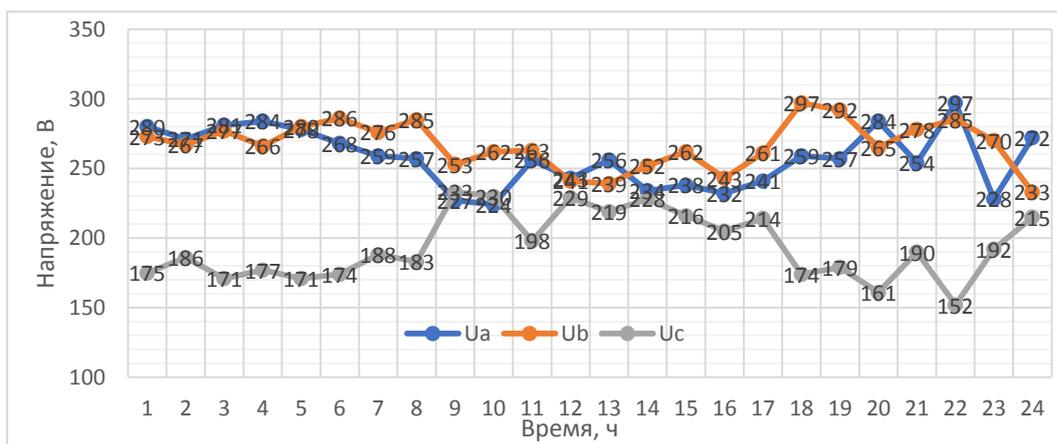


Рис. 11. –Суточный график возможных напряжений при обрыве нулевого провода

Как видно из рисунка 11, при обрыве нулевого провода возможные перенапряжения существенно изменяются во времени. Поэтому, для определения максимально возможных перенапряжений необходимо производить расчеты фазных напряжений при обрыве нулевого провода на каждом участке ЛЭП с принятой частотой опроса измерений интеллектуальных счетчиков. Следует подчеркнуть, что предлагаемая методика при каждом расчете требует решения системы только 5-ти линейных контурных уравнений.

Четвертая глава посвящена методике определения оптимальных симметрирующих переключений по результатам расчетов потерь мощности в ЛЭП для текущего режима и режима, получаемого после предлагаемого симметрирования.

В качестве исходных данных для расчетов используются параметры сети (активные и реактивные сопротивления трансформатора и участков ЛЭП) и нагрузок, которые также задаются активными и реактивными сопротивлениями. Как было показано выше, при указанном способе задания нагрузок уравнения установившегося

режима сети становятся линейными. Как и для расчетов последствий обрывов проводов при определении режима сети используется известный метод контурных токов. При этом приходится решать полную систему линейных контурных уравнений (для рассматриваемой схемы с 15 узлами нагрузки – 45 уравнений), которые имеют вид:

$$I_k * Z_k = E_k \quad (4)$$

где: I_k – матрица контурных е.д.с; Z_k – матрица контурных сопротивлений; E_k – матрица контурных е.д.с.

Расчеты режимов проводились с помощью разработанной в среде Matlab программы «REG».

На рисунках 12 и 13 представлены результаты расчетов напряжений в узлах сети и потерь мощности.

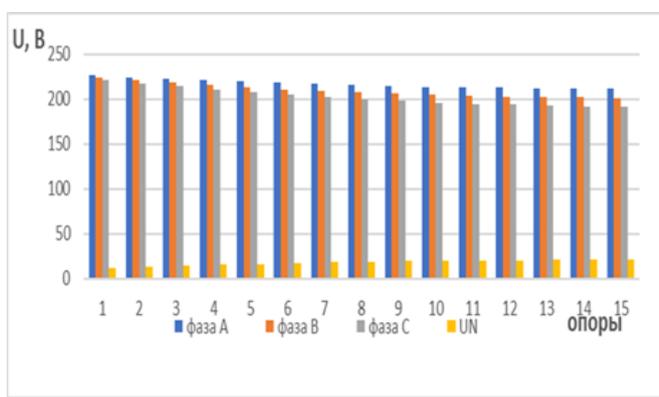


Рис. 12.– Фазные напряжения в узлах сети при несимметричной нагрузке при $K_{нс} = 1.1328$

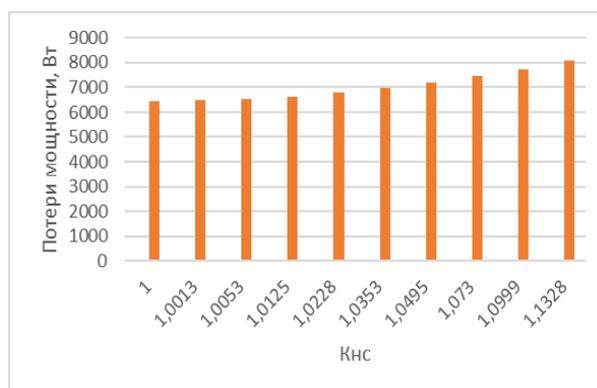


Рис.13. – Зависимость потерь мощности от степени несимметрии.

Результаты расчета показывают существенную зависимость как напряжений, так и потерь мощности от степени несимметрии фазных нагрузок.

Для выбора оптимального порядка симметрирующих переключений в диссертации используется подход, основанный на методе оптимизации роя частиц (Particle Swarm Optimization, PSO). Идея метода базируется на использовании анализа поведения коллективного интеллекта роя частиц, например, стаи птиц. При движении в стае каждая птица может видеть несколько мест кормления. Среди этих мест она может выделить наилучшее (локальный максимум). Птицы общаются друг с другом и путем сравнения они могут найти наилучшее из локальных максимумов всех птиц (наилучшее глобальное решение). Затем каждая птица стаи корректирует свое движение в сторону глобального максимума. При этом каждая птица постоянно ищет новые локальные максимумы, стая определяет новый глобальный максимум и так далее, пока не будет выполнен критерий останова. При решении задачи определяется минимум функции $f(X)$, где: $X_i = [x_1^i, x_2^i, \dots, x_N^i]$ – аргументы функции (текущее положение каждой i -ой частицы); N – размерность задачи; $i = \overline{1, Z}$, Z – количество частиц роя. При этом частица имеет текущую скорость $V_i = [v_1^i, v_2^i, \dots, v_N^i]$, а ее положение на t -м шаге алгоритма определяется как

$$X_i^t = X_i^{(t-1)} + V_i^{(t-1)}. \quad (6)$$

Самым сложным в представленном алгоритме является определение скорости каждой частицы на каждой итерации. Способ определения этой скорости зависит от

характера решаемой задачи, при этом, как правило, вводятся настроечные параметры, учитывающие движения частиц по инерции, а также движение к локальному и глобальному экстремумам.

В рассматриваемой задаче оптимизации схемы подключения однофазных нагрузок к 3-х фазной ЛЭП понятие скорости частицы теряет смысл, так как в трехмерной задаче ($N=3$) положение каждой частицы описывается двумя цифрами: 0 или 1, что соответствует отключенному, или подключенному положению потребителя к одной из 3-х фаз. Задачи подобного рода относятся к классу дискретных, в которых скорость частиц кодируется в виде матрицы вероятностей, определяющей переход двоичных значений от 0 к 1 и наоборот. Для решения задачи оптимального симметрирования в диссертации предложена модификация метода «Роя частиц» – алгоритм SPD-PSO (Рис. 14).

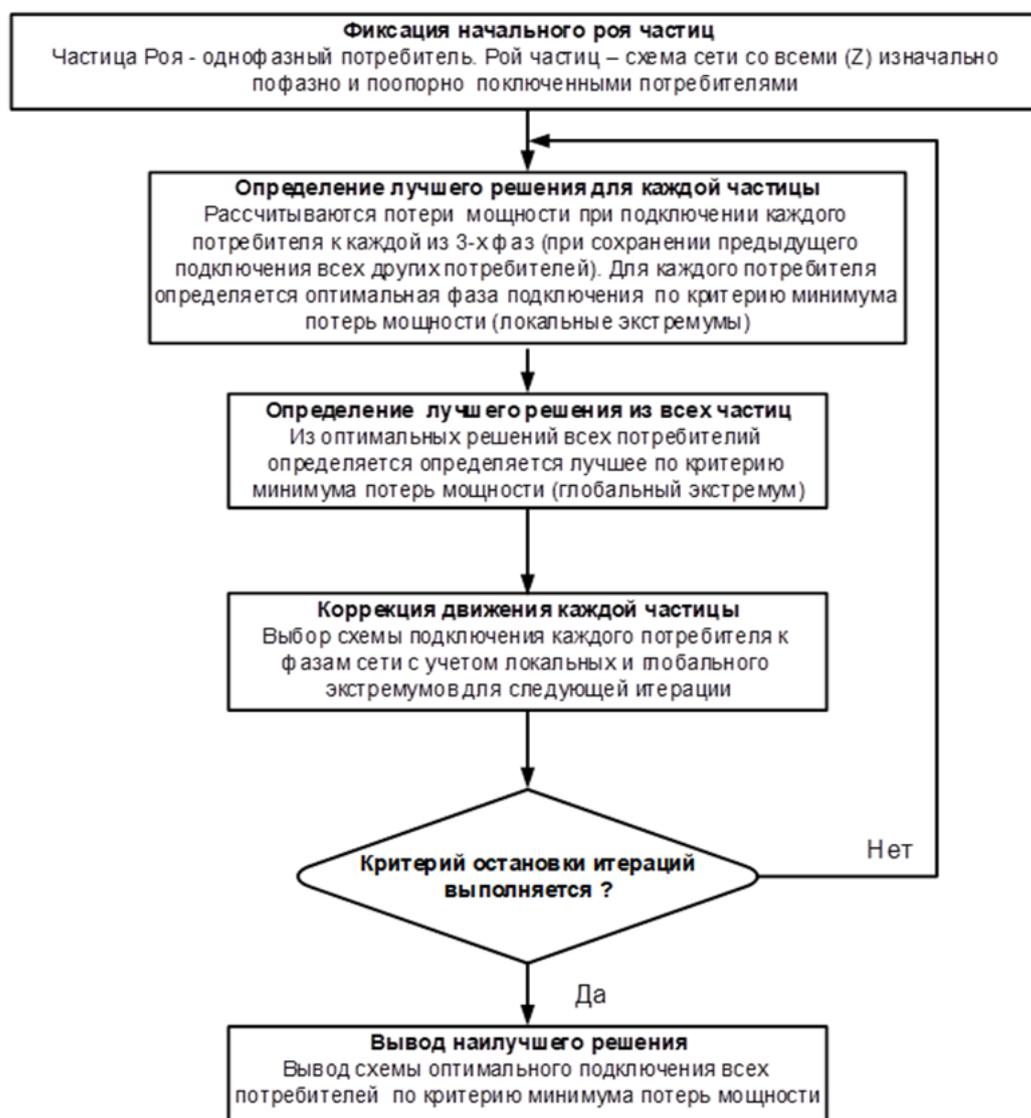


Рис. 14. – Блок-схема алгоритма решения задачи оптимального симметрирования методом Роя частиц

Порядок решения задачи ниже иллюстрируется на примере схемы, приведенной на рис. 15 и таблицы 1.

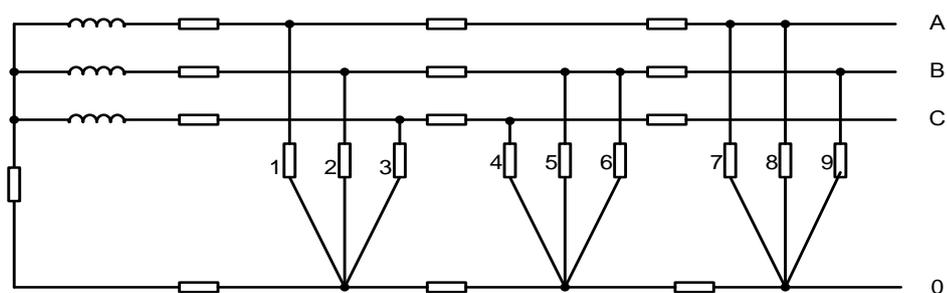


Рис. 15. – Схема сети с однофазными потребителями (цифрами обозначены номера потребителей)

Таблица 1. Параметры расчетной схемы

№ потр.	Нагрузка, Ом		Фаза подключения		
	R	X	A	B	C
1	48,40	161,33	1	0	0
2	24,20	80,67	0	1	0
3	16,13	53,78	0	0	1
4	12,10	40,33	0	0	1
5	9,68	32,27	0	1	0
6	8,07	26,89	0	1	0
7	6,91	23,05	1	0	0
8	6,05	20,17	1	0	0
9	5,38	17,93	0	0	1

Положение роя частиц на итерации $t = 1$ (начальная схема подключения нагрузок) описывается матрицей состояния размером $k \times 3$, где k – количество частиц роя (потребителей):

$$X_k^t = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

Расчетные потери мощности начальной схемы определяются таблицей 2.

Таблица 2. Расчетные потери мощности

Участок сети	Фаза А			Фаза В			Фаза С			Нулевой провод	
	U(В)	I(А)	ΔP (Вт)	U(В)	I(А)	ΔP (Вт)	U(В)	I(А)	ΔP (Вт)	I(А)	ΔP (Вт)
1	228.3	77,75	111.2	227.6	106.9	210.3	229.2	34.58	22	63.1	73.4
2	226.7	72,83	97.59	225.5	97.1	173.5	228.8	19.74	7.17	68.57	86.5
3	225.1	72,83	97.59	224.5	43.59	34.96	228.8	0	0	63.43	74.04
Потери на фазах ΔP (Вт)			306.4			418.8			29.2		233.9
Суммарные потери активной мощности ΔP (Вт) всей сети										988	

На рис.16 приведена новая схема подключения потребителей к фазам сети, где переключившиеся фазы на рисунке выделены цветом.

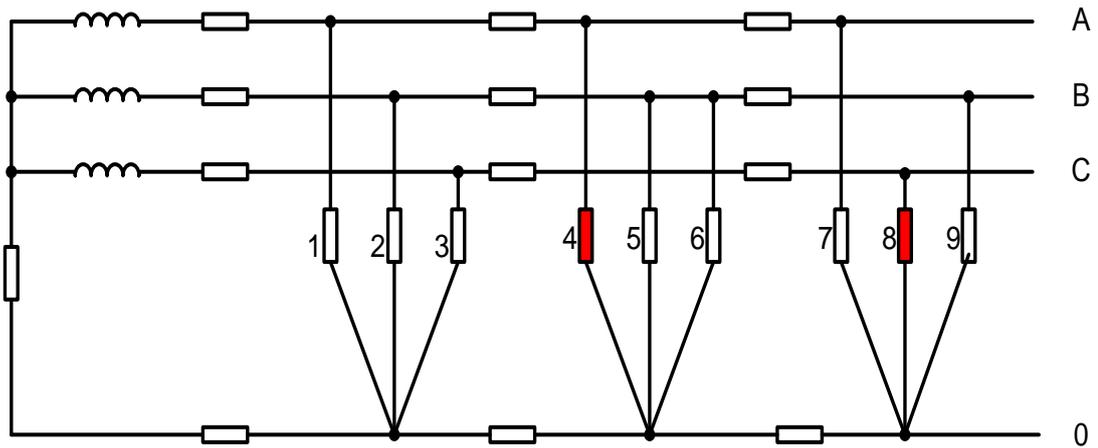


Рис. 16. – Схема сети после первой итерации

Расчет потерь мощности ΔP для нового положения роя частиц (новой схемы распределения потребителей по фазам) дает следующие результаты (табл. 3):

Таблица 3. Результаты расчета после первой итерации.

№ участка	Фаза А			Фаза В			Фаза С			Нулевой провод	
	U(В)	I(А)	ΔP (Вт)	U(В)	I(А)	ΔP (Вт)	U(В)	I(А)	ΔP (Вт)	I(А)	ΔP (Вт)
1	228.7	58.8	63.63	227.6	106.9	210.3	228.8	53.99	53.64	50.69	47.28
2	227.5	53.87	53.4	225.5	97.1	173.5	227.9	39.19	28.26	52.06	49.87
3	226.8	34.24	21.57	224.5	43.59	34.96	227.1	39.19	28.26	8.22	1.24
Потери на фазах ΔP (Вт)			138.6			418.8			110.2		98.39
Суммарные потери активной мощности ΔP (Вт) всей сети										765	

Как видно из таблиц 2 и 3 алгоритм SPD-PSO уже при первой итерации дает существенное снижение потерь мощности.

Рис. 17 иллюстрирует результаты оптимизационных расчетов по разработанной в среде Matlab программе **ROI** для ЛЭП 0,4 кВ, питающей 45 однофазных потребителей. До оптимизации потери мощности были равны 8297,76 Вт, но после расчета 500 итераций потери снизились до 6421,26. Снижение потерь за счет оптимального симметрирования нагрузок составило 1876 Вт (22,6%). Оптимальный вариант подключения фазных нагрузок требует переключения этих нагрузок на 12 опорах из имеющихся 15. Переключенные фазные нагрузки выделены цветом (рис. 18).

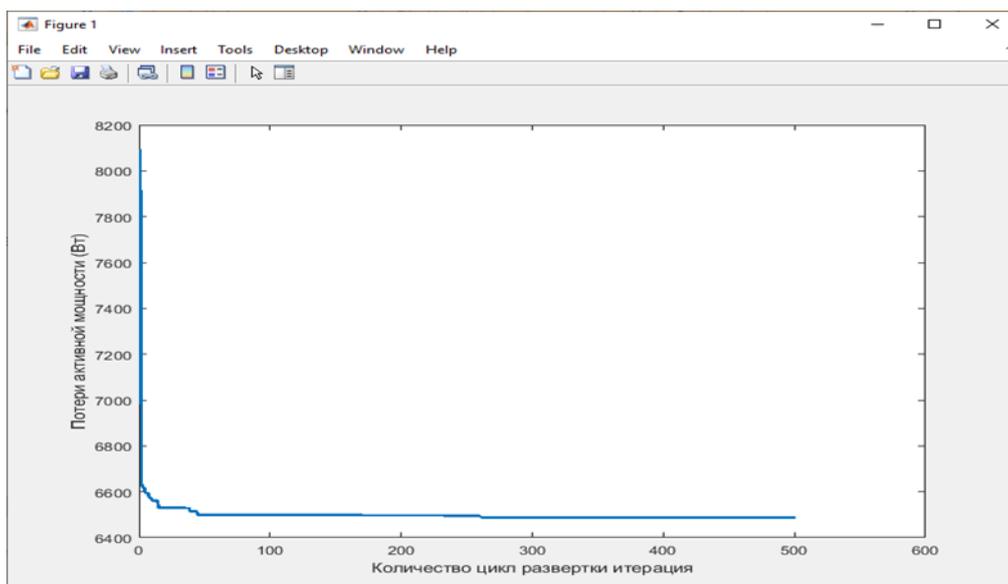


Рис. 17. – Результаты вычислений потерь мощности по программе «ROI»

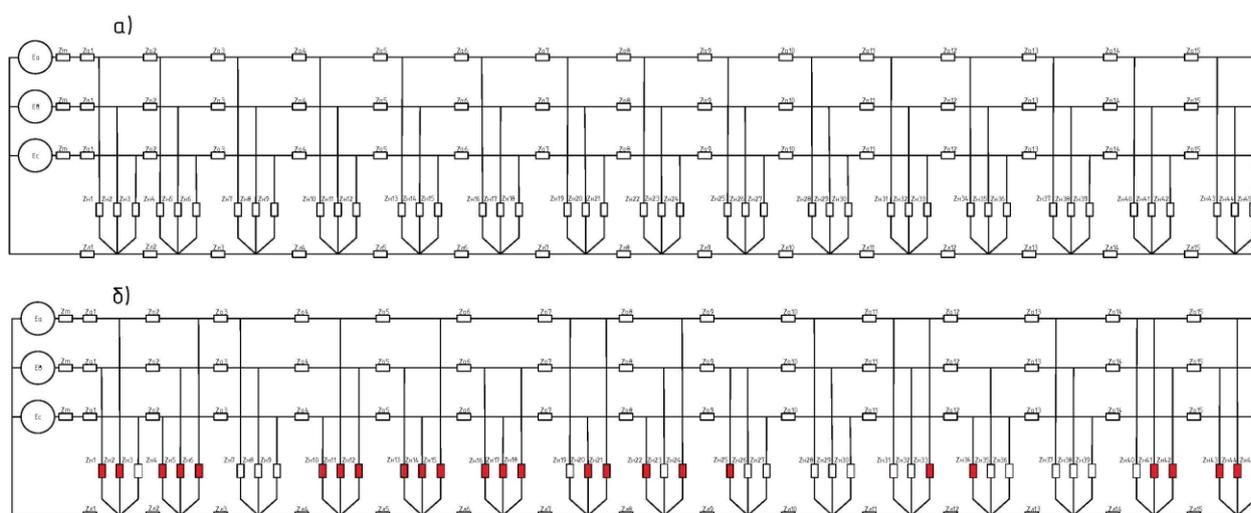


Рис. 18. – Подключения однофазных нагрузок до (а) и после (б) предлагаемого оптимального симметрирования

Заключение

В ходе выполнения работы получены следующие результаты:

1. Установлено, то существующие методы расчета дополнительных потерь электроэнергии от несимметрии фазных нагрузок из-за недостаточной наблюдаемости сельских и пригородных электрических сетей носят оценочный характер и задача определения необходимости и порядка симметрирования фазных нагрузок в принципе допускает некорректные решения.

2. Отмечено, что корректное решение задач определения дополнительных потерь электроэнергии от несимметрии фазных нагрузок, связанное с расчетами режимов электрических сетей, не может быть выполнено без наличия значений фазных нагрузок узлов, распределенных вдоль длины ЛЭП. Широкое внедрение

интеллектуальных счетчиков с возможностью мониторинга параметров режима всех потребителей позволит производить более точные прогнозные расчеты потерь мощности и электроэнергии для коррекции этих режимов в реальном времени.

3. Для решения задачи определения целесообразности и оптимизации симметрирования предложено представление нагрузок суточными графиками изменения комплексных сопротивлений всех распределенных вдоль ЛЭП потребителей. При этом автоматически учитываются индивидуальные статические характеристики каждого потребителя.

4. Предложена методика расчета напряжений в критических точках при обрыве нулевого провода для линий с распределенной вдоль ее длины нагрузкой. Методика основана на эквивалентировании схемы сети относительно точки обрыва нулевого провода и последующего решения, в зависимости от места обрыва, максимум 5-ти линейных уравнений контурных токов, что позволяет сократить время контроля возникающих перенапряжений в режиме реального времени.

5. Разработаны алгоритм и программа по оценке возможных перенапряжений в несимметричной сети при обрыве нулевого провода, что дает дополнительное обоснование производства симметрирующих переключений.

Оценить степень снижения финансовых и социальных рисков за счет симметрирования нагрузок в настоящее время не представляется возможным из-за отсутствия корректной статистики по рассматриваемым вопросам.

6. Разработана в среде Matlab и зарегистрирована программа REG для расчета параметров симметричных и несимметричных режимов ЛЭП 0,4 кВ с распределенной вдоль линии нагрузкой.

7. Разработана методика оптимального симметрирования фазных нагрузок на основании метода роя частиц по критерию минимума потерь мощности. Проведенные расчеты показывают снижение потерь мощности за счет оптимального симметрирования на 8-20 % в зависимости от рассматриваемого режима.

8. Разработан алгоритм оптимизации симметрирующих переключений для ручных, или автоматических переключателей фаз по критерию минимума потерь электроэнергии. Программная реализация алгоритма и оценка его экономической эффективности в настоящее время труднореализуема из-за отсутствия информации от интеллектуальных счетчиков о суточных графиках нагрузки обязательно всех поопорно и пофазно привязанных потребителей конкретных ЛЭП 0,4 кВ. Субъекты электроэнергетики переходят на интеллектуальные системы учёта электроэнергии для получения указанной информации с 2020 года.

Список публикаций по теме диссертации

По рассматриваемой в диссертации тематике имеется 6 публикаций автора и получено одно свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ, в том числе:

Статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК:

1. Маклецов А.М. Мониторинг несимметрии нагрузок в электрических сетях 0,4 кВ / Маклецов А.М., Галиев И.Ф., Галиев Р.И., **Льу Куок Кьонг** // Энергетик. – 2019. – № 5. – С. 27-29.

2. **Льу Куок Кьонг**. Разработка алгоритмов симметрирования нагрузок в сетях 0,4 кВ при распределенной нагрузке вдоль линии /Льу Куок Кьонг, Маклецов А.М., В. В. Максимов, А. Альзакар // Известия высших учебных заведений. Проблемы

энергетики – 2022. – Том 24, № 2. – С. 87 – 97.

3. **Лыу Куок Кыонг**. Оптимальное симметрирование фазных нагрузок ЛЭП 0,4 кВ с использованием интеллектуальной системы измерений / Лыу Куок Кыонг, Казка М.В., Маклецов А.М., Максимов В.В., Гизатуллин А.Р. Вестник Казанского государственного энергетического университета.– 2023.– Т. 15, №3 (59). –С. 31-44.

Публикации в материалах докладов международных и всероссийских научных конференциях:

4. **Лыу Куок Кыонг**. Мониторинг сетей 0,4 кВ /Лыу Куок Кыонг, Маклецов А.М. // В сборнике материалов XIV Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» Казань, КГЭУ, апреля 2019 г. Том 2 - С. 98-101.

5. **Лыу Куок Кыонг**. Расчет четырехпроводной сети методом узловых потенциалов с помощью Матлаба /Лыу Куок Кыонг, Тамсир Анн, Маклецов А.М. // В сборнике материалов XVII Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения».– Казань: КГЭУ, 2022.– Том 2 - С. 89-92.

6. Казка М.В. Симметрирование фазных токов и напряжений в сетях 0,4 кВ./ Казка М.В., Маклецов А.М, **Лыу Куок Кыонг** // Материалы третьей Республиканской научно-практической конференции «Современные технологии в электроэнергетике и промышленности» – Хунджанд (Таджикистан): ХПИТТУ, 2022. – С. 90-93.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

7. Свидетельство № 2022619532 Российская Федерация. Свидетельство о официальной государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа оптимизации работы трехфазной четырехпроводной электрической сети / Маклецов А.М., Максимов В.В., Куракина О.Е. (RU), **Лыу Куок Кыонг**, Нгуен Дык Хоан (VN), Казка М.В (KG). - № 2022619532; заявл. 06.05.2022; опубли. 23.05.2022. Реестр программ для ЭВМ. –1 с.

Подписано в печать 02.07.2024. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 1,25. Тираж 100. Заказ № 0107/2.

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии «Вестфалика» (ИП Колесов В.Н.)
420111, г. Казань, ул. Московская, 22. Тел.: 292-98-92
e-mail: westfalika@inbox.ru
