

На правах рукописи



ГРИЩЕНКО ДМИТРИЙ НИКОЛАЕВИЧ

**АЛГОРИТМЫ ИЗМЕНЕНИЯ ТОПОЛОГИИ СЕЛЬСКИХ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 6–10 КВ, СНИЖАЮЩЕЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

Специальность: 4.3.2 – Электротехнологии, электрооборудование и
энергоснабжение агропромышленного комплекса (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидат технических наук

Краснодар – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина» (ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ)

Научный руководитель:

Богдан Александр Владимирович
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Виноградов Александр Владимирович,
доктор технический наук, доцент, ФГБОУ
ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева,
кафедра электроснабжения и теплоэнергетики
имени академика И.А. Будзко, профессор
(г. Москва)

Исупова Александра Михайловна, кандидат
технических наук, доцент, ФГБОУ
ВО Ставропольский ГАУ, кафедра электроснабжения
и эксплуатации электрооборудования, доцент
(г. Ставрополь)

Ведущая организация:

**ФГАОУ ВО «Омский государственный
технический университет»**

Защита диссертации состоится «15» апреля 2026 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 35.2.019.03 при ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ по адресу: 350044, г. Краснодар, ул. Калинина, 13 (корпус факультета энергетики, ауд. 110).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ <https://kubsau.ru/>.

Автореферат разослан «18» февраля 2026 г., размещен на официальном сайте ВАК РФ <https://vak.gisnauka.ru/> и на сайте ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ <https://kubsau.ru/>.

Ученый секретарь диссертационного совета, кандидат технических наук, доцент



Самурганов Евгений
Ерманекосович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Протяженность сельскохозяйственных распределительных сетей 6–10 кВ может исчисляться десятками километров, а потери электроэнергии, которые в ряде случаев могут превышать величину 15–20 % от общего количества передаваемой электрической энергии, дополнительно возлагаются на сельскохозяйственные предприятия.

Для снижения уровня технологических потерь электрической энергии в распределительных сетях используются такие капиталоемкие методы как: замена существующих линий электропередач проводниками большего сечения, установка силовых трансформаторов большей мощности, использование установок компенсации реактивной мощности и т.д. К менее капиталоемким способам относят изменение топологии сети.

Определение топологии распределительной сети с минимальными технологическими потерями является оптимизационной задачей, для решения которой широко используются как методы оптимизации, так и алгоритмы поиска минимального остовного дерева в теории графов.

Вследствие того, что в энергосистеме распределительные сети 6–10 кВ являются весьма протяженными и разветвленными, а также имеет место большое количество потребителей электрической энергии, из-за этого задача оптимизации является сложной и комплексной. С учетом сложности проблемы ее решение рассматривается как система задач. На первом этапе решается задача изменения топологии распределительной сети с использованием модернизированного алгоритма обратного удаления и метода численной оптимизации. На втором – задача поиска вариантов топологии распределительной сети с целью их использования совместно с распределительной сетью, имеющей более эффективную топологию.

Работа выполнена по плану НИР Кубанского ГАУ ГР № 121031700099-1 (2021–2025 г.).

Степень разработанности темы. Вопросами минимизации технологических потерь электроэнергии в распределительных сетях занимались многие российские и зарубежные исследователи, а именно: Арзамасцев Д.А., Богдан А.В., Виноградов А.В., Григораш О.В., Железко Ю.С., Исупова А.М., Липес А.В., Оськин С.В., Поспелов Г.Е., Тропин В.В., Хорольский В.Я., Цыгулев Н.И., Юндин М.А., и многие другие. В работах перечисленных ученых описываются методы и

мероприятия по снижению технологических потерь, структура и виды потерь в распределительных сетях, а также методы их расчета.

Проблема состоит в следующем: существует большое количество методов и средств снижения величины технологических потерь, но они не позволяют получать варианты топологии с наименьшими потерями электроэнергии в сельских электрических сетях большой протяженности и с большим количеством разветвлений.

Научная гипотеза заключается в том, что можно изменить топологию сельской электрической сети 6–10 кВ для обеспечения минимума технологических потерь, за счет комбинированного использования модернизированного алгоритма обратного удаления и алгоритма роя частиц.

Целью работы является обоснование алгоритмов изменения топологии сельских электрических сетей 6–10 кВ для снижения технологических потерь электроэнергии.

Для достижения поставленной цели были определены следующие **задачи исследования**:

- сформулировать целевую функцию задачи оптимизации схемы сельской распределительной сети 6–10 кВ;
- модернизировать классический алгоритм обратного удаления для сокращения времени его работы и снижения величины асимптотической сложности;
- обосновать комбинированный алгоритм, позволяющий изменять топологию электрической сети путем определения мест размыкания в сельской электрической сети 6–10 кВ для снижения величины технологических потерь;
- разработать алгоритм определения вариантов топологии сельской распределительной сети 6–10 кВ;
- произвести экспериментальное исследование использования алгоритмов изменения топологии сельской электрической сети и сопоставить с теоретическими результатами;
- произвести расчет экономической эффективности использования разработанных алгоритмов.

Объектом исследования являются сельские электрические распределительные сети напряжением 6–10 кВ.

Предметами исследования являются алгоритмы изменения топологии путем определения мест размыкания сельских

электрических сетей 6–10 кВ для снижения технологических потерь электроэнергии.

Методы исследования. В процессе разработки алгоритмов были использованы основные положения теории вероятностей, системного анализа, методов эвристического моделирования и программирования, специальных методов оптимизации на графах, а также современных алгоритмов оптимизационного поиска. Для определения количественных величин параметров, необходимых для расчета значения целевой функции в работе также использованы основные положения теоретической электротехники, аппарата математического анализа, линейной алгебры, аналитической методики исследования функциональных зависимостей.

Научную новизну работы составляют:

- сформулированная целевая функция задачи оптимизации схемы сельской распределительной сети 6–10 кВ по критерию минимума технологических потерь электроэнергии;
- модернизированный алгоритм обратного удаления, имеющий сниженную асимптотическую сложность;
- комбинированный алгоритм, позволяющий определять места размыкания в схеме распределительной сети 6–10 кВ для снижения величины технологических потерь электрической энергии;
- алгоритм определения вариантов топологии сельской распределительной сети 6–10 кВ.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается:

- в целевой функции, позволяющей оптимизировать схему сельской распределительной сети 6–10 кВ по критерию величины технологических потерь электроэнергии;
- в комбинированном алгоритме, который позволяет снизить технологические потери электроэнергии в сельской распределительной сети 6–10 кВ, за счет изменения ее топологии;
- в алгоритме определения вариантов топологии распределительной сети 6–10 кВ, которые могут быть использованы при ее изменении в процессе эксплуатации;
- в полученных результатах исследований, позволяющих использовать алгоритмы для решения оптимизационных задач, возникающих при проектировании новых сельскохозяйственных распределительных сетей 6–10 кВ и реконструкции существующих.

Реализация результатов исследований. Результаты исследований внедрены в производственный процесс АО ОПХ «Центральное» (г. Краснодар), что подтверждается актом о внедрении результатов исследования от 11.03.2024, а также используются в филиале АО «Россети Кубань» (г. Усть-Лабинск), что подтверждается актом о внедрении результатов исследования от 28.02.2025.

Апробация работы. Основные положения исследовательской работы докладывались и обсуждались в материалах следующих научно-технических, научно-практических, Всероссийских и Международных конференций: XLIV Международная научно-техническая конференция «Кибернетика энергетических систем» 8 – 10 ноября 2022 года в г. Новочеркасск; ежегодная научно-практическая конференция преподавателей по итогам НИР за 2022 г. «Точки научного роста: на старте десятилетия науки и технологии» 12 мая 2023 года в г. Краснодар; XLI Международная научно-техническая конференция «Кибернетика энергетических систем» 15 – 17 октября 2019 года в г. Новочеркасск; XLII Международная научно-техническая конференция «Кибернетика энергетических систем» 24 – 26 ноября 2020 года в г. Новочеркасск; III Международная конференция «Институциональные преобразования АПК России в условиях глобальных вызовов» 10 – 11 апреля 2019 года в г. Краснодар; Всероссийская (национальная) конференция «Научное обеспечение агропромышленного комплекса» 19 декабря 2019 года в г. Краснодар; XLVI международная научно-техническая конференция «Кибернетика энергетических систем» 19 – 21 ноября 2024 года в г. Новочеркасск.

На защиту выносятся следующие основные положения:

- целевая функция задачи оптимизации схемы сельской распределительной сети 6–10 кВ;
- модернизированный алгоритм обратного удаления;
- комбинированный алгоритм;
- алгоритм определения вариантов топологии сельской электрической сети 6–10 кВ;
- результаты экспериментального исследования использования разработанных алгоритмов и их сопоставление с расчетными данными.

Публикации. Основное содержание работы отражено в 12 научных работах, в том числе: 2 статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК России, 2 публикации в наукометрической базе Scopus и 8 статей – в прочих изданиях.

Объем и структура работы. Диссертационная работа изложена на 130 страницах и состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и приложения. Она включает в себя 32 рисунка, 14 таблиц. Список литературы содержит 121 источник.

Во введении изложены актуальность исследований, цель работы, задачи исследования, научная новизна, практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ величин и характера потерь электрической энергии в сельскохозяйственных распределительных сетях напряжением 6–10 кВ и их влияние на рентабельность агропромышленных предприятий. Установлено, что для рассматриваемого муниципального образования Краснодарского края за последние пять лет средние показатели по потерям электроэнергии составили 12,68 %. Средний объем электрической энергии, поставленной от вышестоящих сетевых организаций, составляет порядка 1022 ГВт·ч, а величина потерь электроэнергии — 132 ГВт·ч. В то же время, за прошедший 2023 год общий объем электрической энергии, поставленной от вышестоящих сетевых организаций, составил порядка 1090 ГВт·ч, а потери - 134 ГВт·ч, такая величина потерь эквивалентна 12,01 %.

Определено, что основными мероприятиями, применяемыми для снижения потерь электрической энергии в распределительных сетях, являются:

- улучшение режимов электрических сетей;
- реконструкция электрических сетей;
- совершенствование системы учета электроэнергии;
- снижение хищений электрической энергии.

Последние три группы обладают большей капиталоемкостью, нежели первая. В таком случае, предпочтительными являются мероприятия по улучшению режимов электрических сетей. Изменением топологии электрической сети 6–10 кВ для улучшения режима работы, достигается цель снижения величины технологических потерь электрической энергии.

Проводимые в настоящее время исследования направлены на исследования существующих алгоритмов и методов изменения топологии распределительных сетей, в частности, по их улучшению. На основе этих исследований установлено, что наиболее эффективным алгоритмом поиска минимального остовного дерева является алгоритм

обратного удаления и для достижения поставленной цели необходимо использовать методы численной оптимизации, однако им характерны следующие недостатки. Для алгоритма обратного удаления это большая часть выполняемых вычислений, которая является избыточной, по этой причине работа алгоритма на схемах большой протяженности и с большим количеством разветвлений, характерных для сельских распределительных сетей 6–10 кВ, не может быть выполнена. А для методов численной оптимизации это отсутствие функционала использования промежуточных результатов вычислений целевой функции оптимизации, хотя они могут отличаться от оптимального результата на доли процентов.

Сформулирована цель работы и задачи исследования.

Во второй главе для формулировки задачи оптимизации схемы сельской распределительной сети 6–10 кВ сформулирована целевая функция оптимизации схемы распределительной сети 6–10 кВ и соответствующие ограничения:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta P_{\text{ср}} = \sum_{j=1}^E \Delta P_{\text{ср},j}(I_{\text{ср},j}, R_j) \rightarrow \min, j \in (1, E); \\ \Delta U = \frac{U_{\text{ном}} - U_{\text{мин}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\% \leq 10\%; \\ \left\{ \begin{array}{l} \forall (V_{\text{ист}}, V_{k,f}) \in V \exists S(V_{\text{ист}}, V_{k,f}), f > 2; \\ \{S(V_{\text{ист}}, V_{k,f})\} \cap \{S(V_{\text{ист}}, V_{k,f})\} = V_{k,f}, f \leq 2; \\ S - \text{путь}, f \in (1, 3), k \in (1, V). \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (1)$$

Первое выражение под фигурной скобкой представляет собой целевую функцию оптимизации « $\Delta P_{\text{ср}}$ », где в качестве параметров используются значения сопротивлений ветвей схемы « R_j » и величины протекающих по соответствующим ветвям токов « $I_{\text{ср},j}$ ». Необходимо определить минимальное значение средних потерь мощности « $\min \Delta P_{\text{ср}}$ », выражающееся в сумме средних потерь мощности « $\sum \Delta P_{\text{ср},j}$ » для каждой j -ой ветви в диапазоне $(1; E)$, где « E » – количество ветвей в схеме. Одним из ограничений целевой функции является максимальное отклонение напряжения у конечных потребителей электрической энергии « ΔU ». Максимальная величина отклонения напряжения « $U_{\text{мин}}$ » у каждого конечного потребителя не должна превышать величины 10 % от номинального значения напряжения источника электрической энергии « $U_{\text{ном}}$ ». Еще одним ограничением целевой функции

оптимизации является тот факт, что связность схемы не должна быть нарушена. А дополнительным ограничением является учет категорийности потребителей электрической энергии. Совокупность выражений внутри вложенной фигурной скобки описывают последние ограничения. Во-первых, для любой пары ($V_{ист}$, $V_{k,f}$) узлов «V», где «V» – количество узлов в схеме, на интервале $k \in (1; V)$, а $V_{ист}$ – источник ЭЭ; существует путь «S», соединяющий их между собой. А во-вторых, результатом пересечения (« \cap ») двух множеств узлов, образованных из узлов, соединяющих потребителя (« $V_{k,f}$ ») с источником (« $V_{ист}$ »), является узел, соответствующий потребителю (« $V_{k,f}$ »), имеющему категорию надежности выше третьей, где f – параметр, указывающий на категорию надежности $f \in (1; 3)$. Кроме того, к дополнительным ограничениям (допущениям) относится: отсутствие силовых трансформаторов, имеющих разные группы соединения обмоток и одинаковый уровень напряжения на шинах понизительных станций для всех источников питания. Помимо подвода к потребителю питания от двух независимых источников, категорийность энергопринимающих устройств реализуется одним из двух способов: ввода перманентного нормального разрыва в заданном месте сети или накладывания ограничения на возможность исключения ветви из схемы. Такой параметр целевой функции, как сопротивление ветвей « R_j » задается в качестве входных данных. Для определения величины протекающего по ветвям тока « $I_{ср,j}$ », который также является параметром целевой функции, необходимо рассчитать параметры сети, воспользовавшись методом узловых потенциалов.

Такой параметр целевой функции, как сопротивление ветвей « R_j » задается в качестве входных данных. Для определения величины протекающего по ветвям тока « $I_{ср,j}$ », который также является параметром целевой функции, необходимо рассчитать параметры сети, воспользовавшись методом узловых потенциалов:

$$\varphi \sum_{i=1}^n Y_i - \sum_{i=1}^n \varphi_i Y_i = \sum_{i=1}^n (\varepsilon_i Y_i + J_i), \quad (2)$$

где φ – узловой потенциал рассматриваемого узла, В; Y_i – проводимость i -ой ветви, См; φ_i – узловой потенциал i -го узла, В; ε_i – ЭДС источника питания, В; J_i – величина источника тока, А.

Зачастую для реальных распределительных сетей получают системы уравнений с большим количеством переменных, тогда для

метода узловых потенциалов удобнее использовать матричную форму записи:

$$A \cdot Y \cdot A^t \cdot U = -A \cdot (J + Y \cdot \varepsilon), \quad (3)$$

где A – матрица связностей; Y – диагональная матрица проводимостей; A^t – транспонированная матрица связностей; U – матрица-столбец узловых потенциалов; J – матрица-столбец источников тока; ε – матрица-столбец источников ЭДС.

Максвеллом было установлено, что распределение токов в электрической цепи всегда происходит так, что тепловая функция системы имеет минимальное значение. Известно, что для сетей с высокой неоднородностью естественное потокораспределение не совпадает с «экономическим», т.е. не соответствует наименьшим потерям мощности, но сельские сети 6–10 кВ можно считать однородными. Именно на основании данного факта, а также утверждения Максвелла о минимуме тепловой функции системы, в качестве целевой функции оптимизации принимается величина $\Delta P_{\text{ср}}$, а не ΔS и расчет по R-схеме.

После того как сформулирована целевая функцию, был модернизирован алгоритм обратного удаления с целью сокращения времени его работы и снижения величины асимптотической сложности. Блок-схема модернизированного алгоритма обратного удаления представлена на рисунке 1. Модернизациями алгоритма обратного удаления (выделены салатовым цветом) являются:

- предварительный расчет количества ветвей необходимых для исключения из сети;
- исключение из отсортированного списка 25 % ветвей от общего количества, имеющих наибольшие значения токов;
- использование механизма «рулетки» при выборе очередной ветви для исключения из схемы.

Для оценки эффективности предложенных модернизаций алгоритма обратного удаления произведен расчет количественных показателей, отражающих асимптотическую сложность вычислений. На рисунке 2 представлены графики асимптотических сложностей для классического (красный цвет) и модернизированного алгоритмов обратного удаления (синий цвет), построенные на основании результатов расчета. График модернизированного алгоритма более пологий, что свидетельствует о меньшей величине асимптотической сложности.

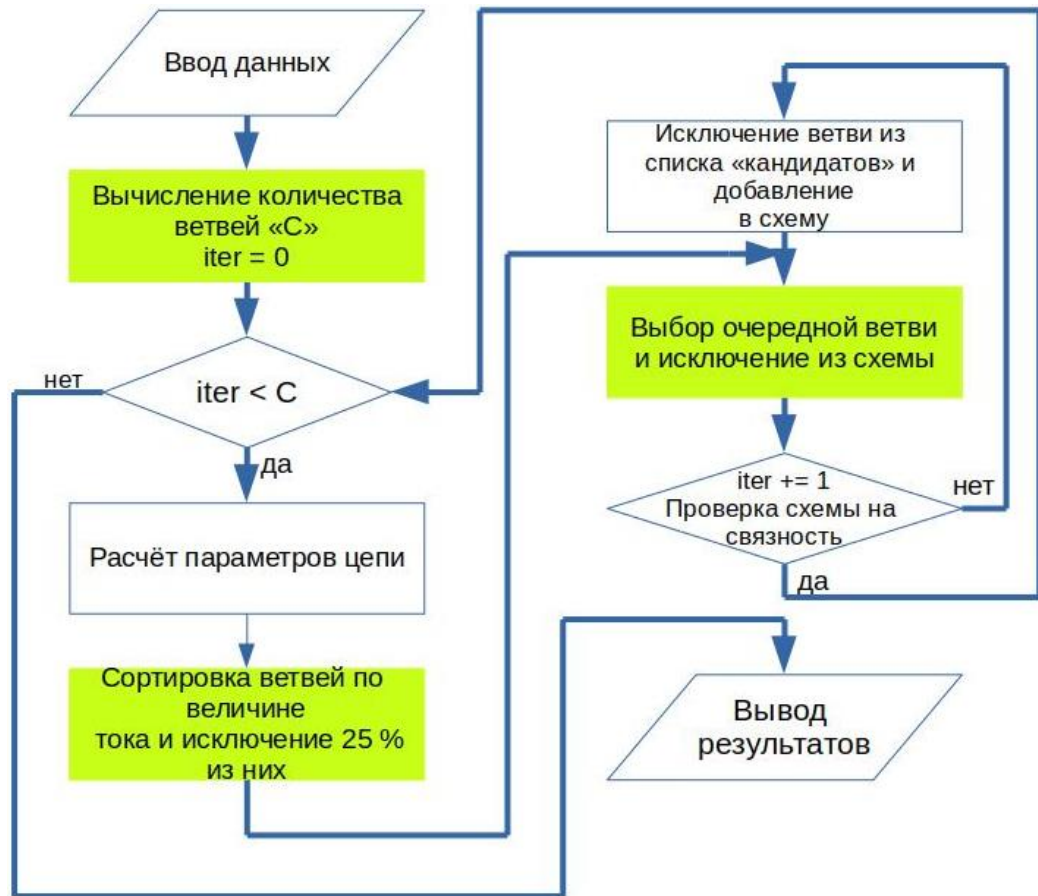


Рисунок 1 – Блок-схема модернизированного алгоритма обратного удаления

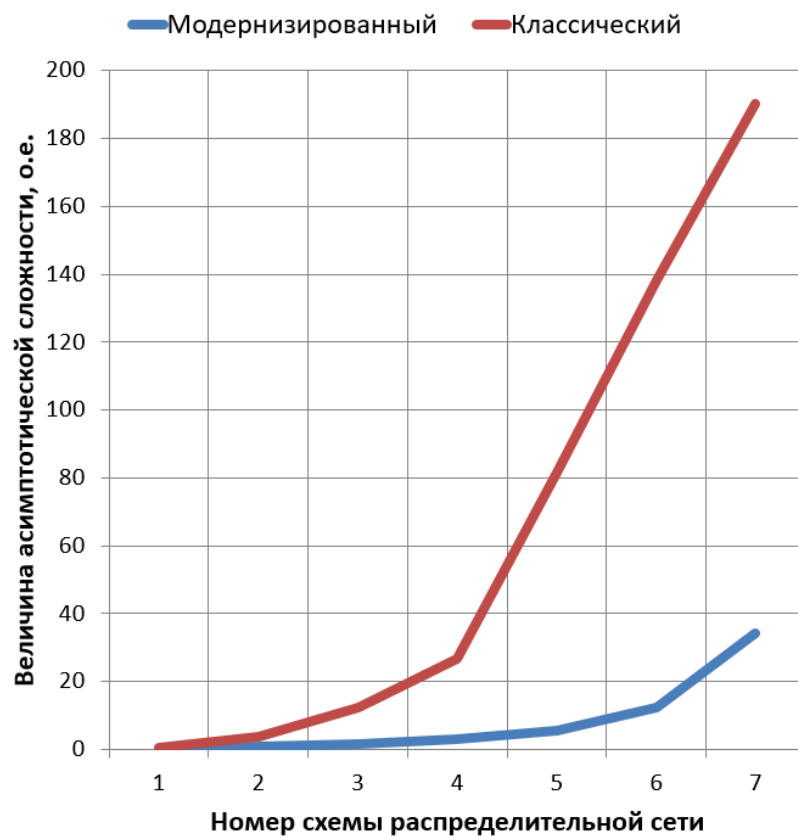


Рисунок 2 – Графики асимптотических сложностей

В работе определено, что в случае если распределительная сеть имеет большое количество линий электропередач и потребителей электрической энергии, используя только модернизированный алгоритм обратного удаления, глобальный экстремум целевой функции может быть не найден. Тогда, комбинированное использование алгоритма роя частиц и модернизированного алгоритма обратного удаления, позволяет значительно повысить вероятность нахождения глобального экстремума целевой функции. Блок-схема комбинированного алгоритма представлена на рисунке 3 (а), где столбец блоков слева является алгоритмом роя частиц, а столбец блоков справа – модернизированным алгоритмом обратного удаления.

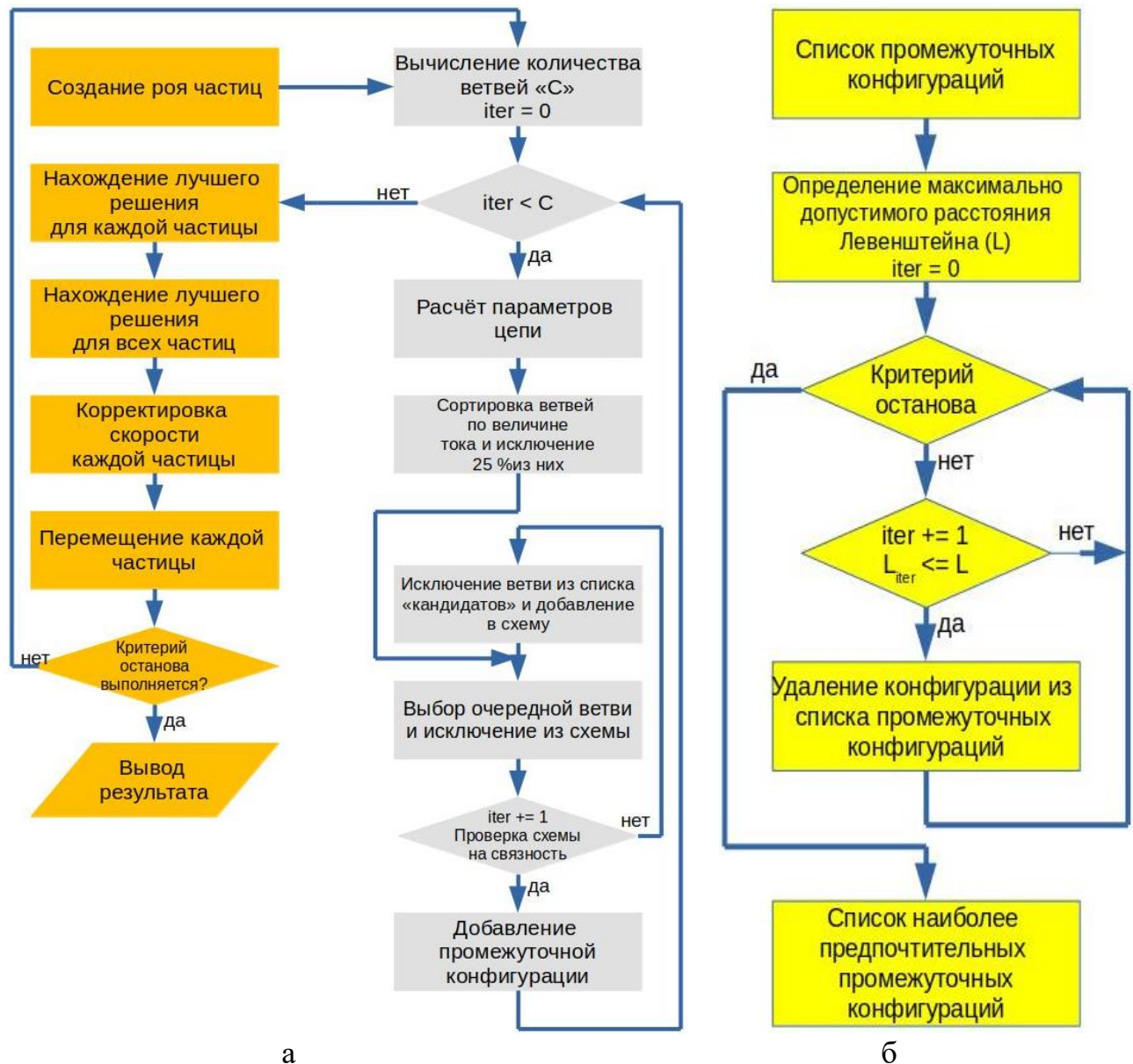


Рисунок 3 - Блок-схемы разработанных алгоритмов: комбинированный алгоритм (а); алгоритм определения вариантов топологии распределительной сети (б)

В процессе работы комбинированного алгоритма формируются варианты топологии распределительной сети, отличающиеся от конечного результата по величине технологических потерь. Таким образом разработан алгоритм определения вариантов топологии распределительной сети 6–10 кВ, блок-схема которого представлена на рисунке 3 (б).

В третьей главе экспериментально определена точность расчета технологических потерь электроэнергии в линиях электропередач распределительной сети. В качестве экспериментальной схемы использовалась распределительная сеть фидеров подстанций «Геймановская» и «Алексеевская» Усть-Лабинского района (Краснодарский край). На основе замеров суточных графиков нагрузок фидеров, проведенных в режимный день 19.06.2024 г., построены графики, представленные на рисунке 4. Коэффициент заполнения графиков составляет 0,7.

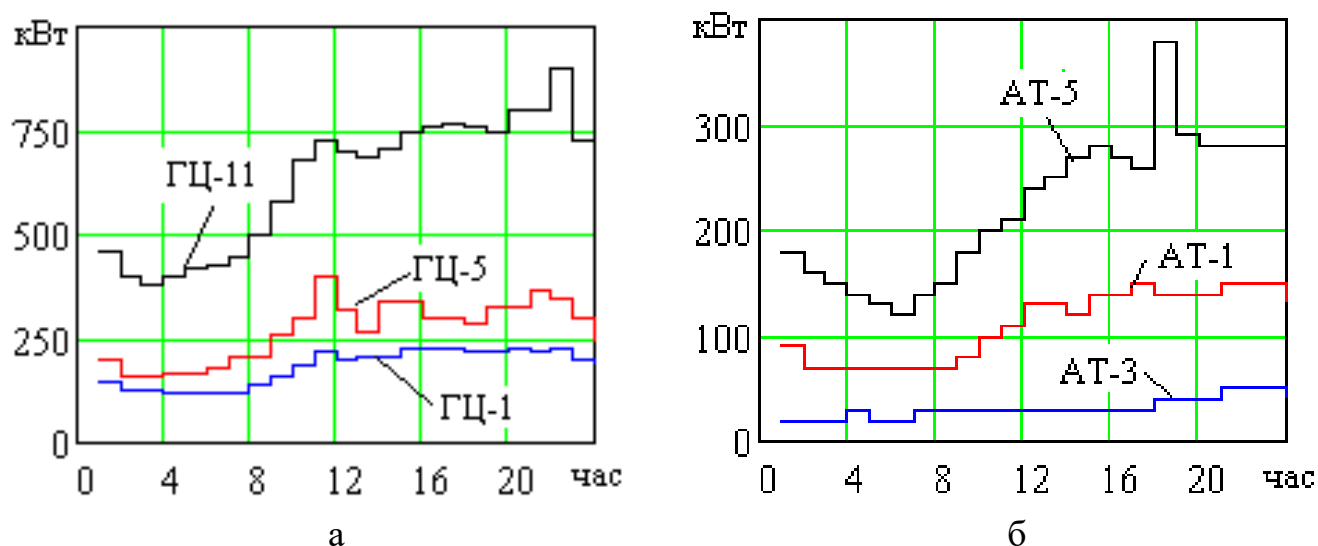


Рисунок 4 – Суточные графики активных нагрузок питающих фидеров: ПС «Геймановская» (а); ПС «Алексеевская» (б)

Экспериментальные исследования по определению изменения технологических потерь электроэнергии в линиях электропередач распределительной сети напряжением 10 кВ проводилось на основе предварительных расчетов согласно вышеописанным алгоритмам. Для измерений использовались приборы учета, установленные на фидере ГЦ–11 питающего центра, и имеющие в своем функционале возможность для фиксации получасовых профилей изменения нагрузки. Также использовался специализированный прибор – «Определитель ампер-квадрат-часов» (АкЧ-В-1(м) – 5А АС).

Для участка линии длиной 0,35 км и сечением 50 мм², выполненного неизолированным проводом АС-50, по результатам экспериментальных измерений суммы квадратов тока (I^2) за пять суток по трем фазам питающего фидера согласно определителю ампер-квadrat-часов, величина потерь составила 109,82 кВт·ч.

Результаты расчета показали, что при полном расчетном токе 50,73 А технологические потери электрической энергии в головном участке линии фидера ГЦ-11 за пять суток составили 103,71 кВт·ч.

Абсолютная и относительная погрешности расчета величины технологических потерь электрической энергии в участке линии в сравнении с измеренными значениями составили 6,11 кВт·ч и 5,9 % соответственно.

Таким образом, установлено, что расчетные технологические потери несколько меньше чем фактические, однако они могут использоваться при решении задачи оптимизации схемы сети.

Разработанные алгоритмы применялись для изменения топологии в типовой распределительной сети IEEE 33 bus, предложенной международным стандартом.

С помощью комбинированного алгоритма для типовой схемы IEEE 33 bus получена эффективная топология, при учете допущения, что расчет осуществляется при постоянных сопротивлениях эквивалентных заданным нагрузкам. Данная топология совпадает с топологией, получаемой конкурентными алгоритмами других ученых, но определяется в среднем в несколько раз быстрее. Получены варианты топологии типовой схемы IEEE 33 bus.

Произведен расчет потерь в сельскохозяйственной распределительной сети. Изменение топологии на эффективную, позволило снизить величину потерь более чем на 10 %, в сравнении с рабочей топологией.

Используя алгоритм определения вариантов топологии для сельскохозяйственной распределительной сети 6–10 кВ получены конфигурации, имеющие меньшие значения потерь мощности, чем в рабочей. Разница в потерях между различными вариантами топологии представлена на рисунке 5.

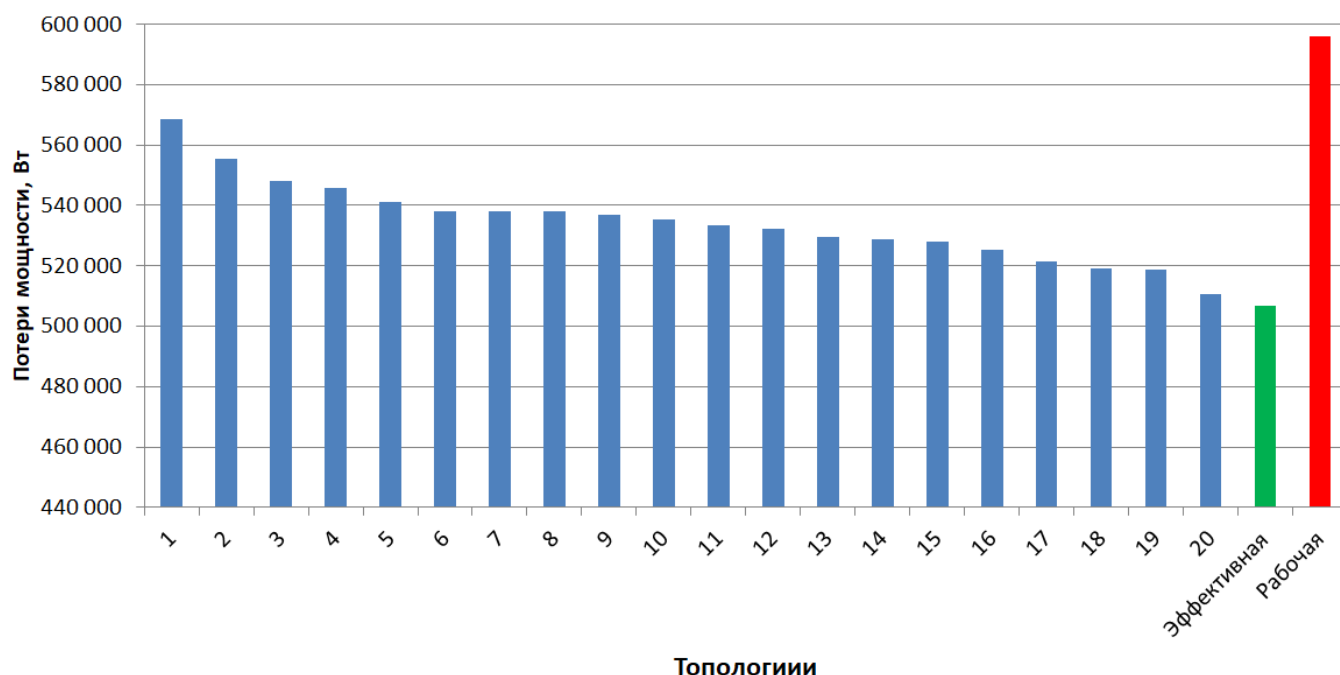


Рисунок 5 – Величины потерь мощности промежуточных (синий цвет), эффективной (зеленый цвет) и рабочей (красный цвет) топологий распределительной сети

В работе произведен расчет параметров сети по программе «РЭТП 6–10» и получены значения технологических потерь (рисунок 6) для полученной на основе разработанных алгоритмов эффективной топологии (рисунок 7), на котором потребители окрашены в цвет соответствующего питающего фидера.

Общие результаты расчета			
Расчетный режим Оптимальная схема Найдены оптимальные разрывы		Потери за период, всего, кВтч 57533,13 5, %	
		Стоимость потерь 333692 руб.	
Потребление 1149,66 тыс.кВтч	Период 30 дней	Потери в нагрузочные	19542,89 1,7 %
Мощность тр-ов 78363 кВА	Длина вкл. линий, км	Потери в линиях, кВтч	19858,9
Мощность КУСН 531 квар	ВЛ	изоляция ВЛ	20,58 0,002 %
Мощность КУНН 0 квар	КЛ	изоляция КЛ	295,39 0,026 %
	104,16 0,2	Линия с макс потерями Потери, кВтч 1148,17	
ТП с мин напряж СН ГЦ-1-310	Тангенс (fi) 0,52	Фидер ГЦ-1	Узлы 796 806
Мин напряжение СН 10010,3 В, 100,1 %		№ 766	F, мм2= 50 L, км = 5,48
ТП с мин напряж НН ГЦ-11-330		Потери в транс-обмотках	7564,84 0,66 %
Мин напряжение НН 227,1 В, 98,23 %		форматорах, кВтч	29653,4 2,58 %
		шин	456 0,04 %
			37674,3

Рисунок 6 –Скриншот программы с параметрами сети и величинами технологических потерь электроэнергии в эффективной топологии сети

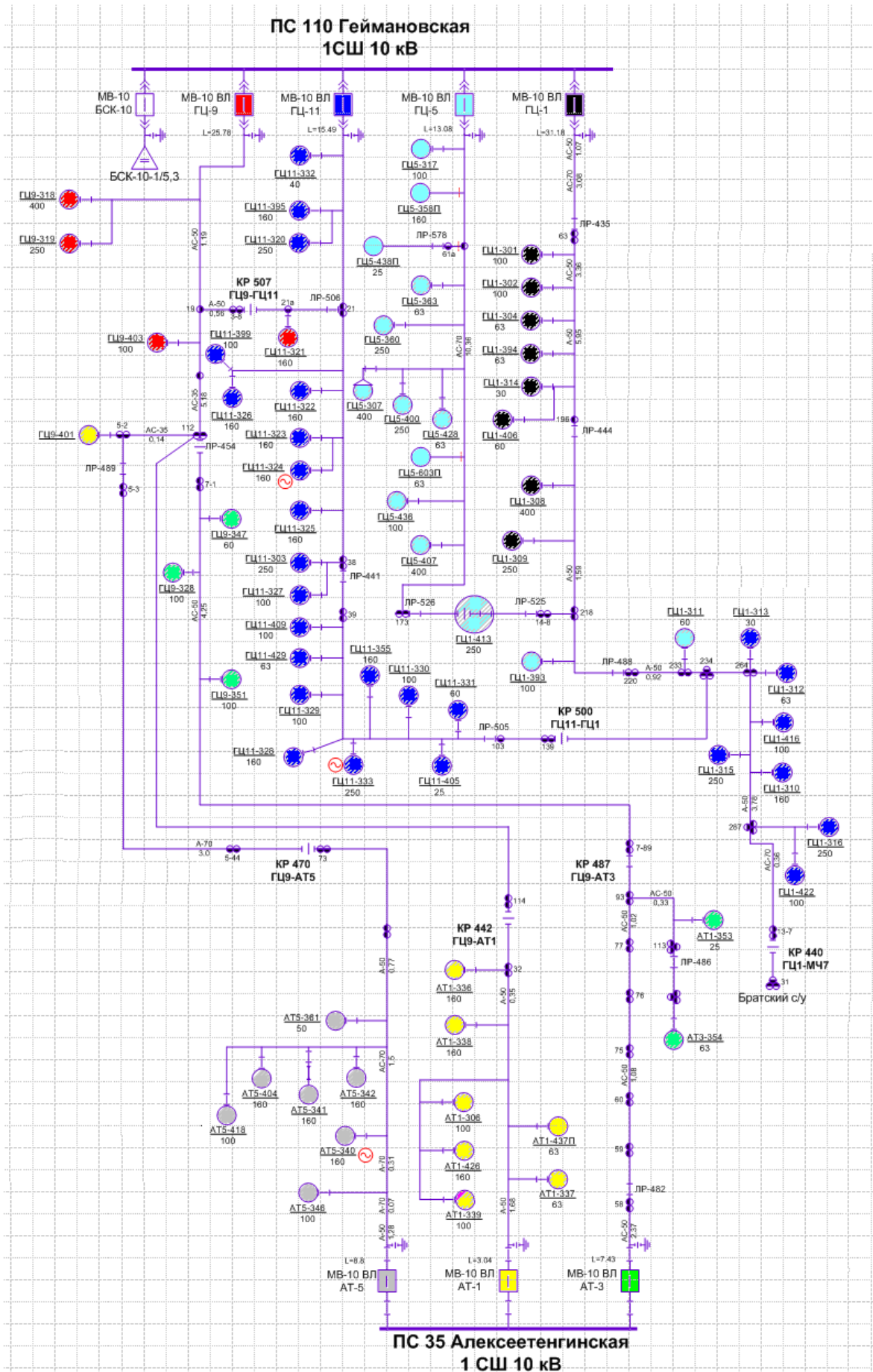


Рисунок 7 – Эффективная топология электрической сети

В работе выполнено сравнение результатов расчета потерь электрической энергии фактической, рациональной (получена с использованием классического алгоритма обратного удаления) и эффективной топологий.

В четвертой главе произведен расчет потерь электроэнергии в распределительной сети Усть-Лабинского района. В результате использования эффективной топологии, несмотря на то, что для ее изменения в первоначальный момент времени необходимо увеличить эксплуатационные издержки, связанные с привлечением персонала, эксплуатации спец. техники и приобретением линейного разъединителя, в течении года потери электроэнергии снизились на 60 тыс. кВт·ч. Расчет потерь электроэнергии в сельскохозяйственной распределительной сети (АО ОПХ «Центральное») показал, что использование эффективной топологии распределительной сети позволит за год снизить величину потерь электрической энергии более чем на 40 тыс. кВт·ч.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования

1. Сформулирована целевая функция задачи оптимизации схемы сельской распределительной сети 6–10 кВ по критерию минимума технологических потерь электроэнергии. Ограничениями целевой функции являются два условия: максимальное отклонения напряжения на любом из участков электрической цепи не должно превышать 10 % от номинального напряжения источника электроэнергии и связность источника электрической энергии с энергопринимающими устройствами, с учетом требований по надежности электроснабжения, не должна быть нарушена.

2. Модернизирован классический алгоритм обратного удаления, что позволило сократить время работы алгоритма, за счет исключения необходимости выполнения большей части алгебраических вычислений. В зависимости от сложности решаемой задачи модернизированный алгоритм обратного удаления работает до 19 раз быстрее классического, а величина асимптотической сложности модернизированного алгоритма ниже, чем у классического в 20 раз, за счет меньшего количества проверяемых ветвей.

3. Обоснован комбинированный алгоритм, позволяющий изменять топологию электрической сети путем определения мест размыкания в сельской электрической сети 6–10 кВ, что позволит снижать величину

технологических потерь электрической энергии на 3,94–15,16 % в сельских распределительных сетях в сравнении с аналогичными алгоритмами.

4. Разработан алгоритм определения вариантов топологии сельской распределительной сети 6–10 кВ. Полученные варианты отличаются от эффективной топологии, полученной с помощью комбинированного алгоритма, по величине технологических потерь на 3,9–14,3 %.

5. Экспериментальное исследование использования алгоритмов изменения топологии сельской электрической сети проведено в электрических сетях Усть-Лабинского района (Краснодарский край) и Прикубанского округа города Краснодар. В распределительной сети Усть-Лабинского района величина технологических потерь снизится на 7,6 %, а в сети Прикубанского округа на 15 %, кроме того, промежуточные варианты топологии отличаются от эффективной в среднем на 6,5 % и имеют меньшие потери мощности, чем в рабочей, на 10 %. Полученные результаты расчетов величины технологических потерь сопоставлены с теоретическими данными и попадают в соответствующие доверительные интервалы.

6. Произведен расчет экономической эффективности использования разработанных алгоритмов в сельских электрических сетях. В результате использования эффективной топологии распределительной сети Усть-Лабинского района (Краснодарский край) в течение года удалось снизить величину технологических потерь электроэнергии на 60 тыс. кВт·ч, экономический эффект составил 250 тыс. руб. После изменения топологии распределительной сети Прикубанского округа АО ОПХ «Центральное» (г. Краснодар) за год снизит эксплуатационные издержки на сумму 186 тыс. руб., за счет снижения величины технологических потерь электрической энергии более чем на 40 тыс. кВт·ч.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАБОТЫ ОПУБЛИКОВАНЫ

- в изданиях, индексируемых в Scopus:

1. **Grishchenko D.** About Different Applications of Branches in the Distribution Network / D. Grishchenko, A. Bogdan, V. Lozovskiy // Proceedings - 2023 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon 2023). – 2023. – P. 309–313.

2. **Grishchenko D.** About the Joint Use of Algorithms for Finding the Optimal Skeleton of an Electrical Network / D. Grishchenko, A. Bogdan, V. Lozovskiy // Proceedings - 2023 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon 2023). – 2023. – P. 244–249.

- в изданиях, рекомендованных ВАК:

3. Богдан, А.В. Алгоритмы определения схемы сети 6–10 кВ с меньшими технологическими потерями / А.В. Богдан, В.А. Богдан, Д.С. Нетребко, **Д.Н. Грищенко** // Сельский механизатор. – 2022. – № 1. – С. 39–41.

4. **Грищенко, Д.Н.** Алгоритмы построения оптимального остова электрической сети / Д.Н. Грищенко, А.В. Богдан, В.В. Лозовский // Сельский механизатор. – 2023. – № 8. – С. 24–27.

- в прочих изданиях:

5. Богдан, А.В. Использование дополнительных источников энергии для существенного уменьшения потерь в сети / А.В. Богдан, **Д.Н. Грищенко** // Научное обеспечение агропромышленного комплекса : сб. тезисов по материалам Всероссийской (национальной) конференции, 2019. – С. 633–634.

6. Богдан, А.В. Расчет потерь в сети по программе РЭТП 6–10 / А.В. Богдан, **Д.Н. Грищенко**, М.Я. Клецель // Институциональные преобразования АПК России в условиях глобальных вызовов : сб. тезисов по материалам III Международной конференции, 2019. – С. 173.

7. Богдан, А.В. Использование алгоритма пчелиного роя для повышения энергоэффективности распределительной сети / А.В. Богдан, **Д.Н. Грищенко** // Кибернетика энергетических систем : сб. ст. по материалам XLII Международной науч.-техн. конференции, 2020. – С. 26–28.

8. Богдан, А.В. Нейросети в системе электроснабжения / А.В. Богдан, **Д.Н. Грищенко**, В.В. Лозовский // Совершенствование электротехнических установок и систем энергоснабжения в сельском хозяйстве : сб. науч. трудов по материалам Всероссийской (национальной) науч.-практ. конференции. 2021. – С. 13–16.

9. Богдан, А.В. Использование стохастических алгоритмов оптимизации при проектировании сетей электроснабжения / **Грищенко Д.Н.** // Точки научного роста: на старте десятилетия науки и технологии : сб. ст. по материалам науч.-практ. конференции. 2023. – С. 830–831.

10. Григораш, О.В. Энергоэффективные и энергосберегающие автономные системы электроснабжения на ветро-солнечных электростанциях для малых фермерских хозяйств : монография / О.В. Григораш, Е.А. Денисенко, А.В. Квитко, **Д.Н. Грищенко** [и др.]. – Краснодар : КубГАУ, 2023. – 180 с.

11. **Грищенко, Д.Н.** Социальная инженерия и надежность энергосистемы / Д.Н. Грищенко, А.В. Богдан, В.В. Лозовский // Приоритетные направления электрификации и автоматизации сельскохозяйственного производства : сб. науч. трудов по материалам Национальной науч.-практ. конференции, 2022. – С. 17–19.

12. Лозовский, В. Использование алгоритма пчелиного роя для решения задачи оптимального соединения потребителей с источником электроэнергии / В. Лозовский, А. Богдан, **Д. Грищенко** // ИТ-СТАНДАРТ. – 2022. – № 2. – С. 6–9.