

На правах рукописи



Ткаченко Всеволод Андреевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ ОПТИМИЗАЦИИ
СХЕМНО-РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
СИСТЕМ, ВКЛЮЧАЯ МИНИГРИД**

Специальность 2.4.3. Электроэнергетика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ханты-Мансийск — 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Югорский государственный университет».

Научный руководитель: **Осипов Дмитрий Сергеевич**
доктор технических наук

Официальные оппоненты: **Суслов Константин Витальевич**,
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (г. Москва), Кафедра гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии, профессор;

Третьяков Евгений Александрович,
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Омский государственный университет путей сообщения» (г. Омск), кафедра Подвижной состав электрических железных дорог, профессор;

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Барнаул

Защита диссертации состоится 25 декабря 2023 г. в 12:00 на заседании диссертационного совета 24.2.350.04, созданного на базе Омского государственного технического университета по адресу: 644050, г. Омск, проспект Мира, 11, Главный корпус, П-202.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет» и на сайте <http://omgtu.ru>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2023 г.

Учёный секретарь
диссертационного совет,
канд. техн. наук



Гиршин Станислав Сергеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время энергетические проекты Российской Федерации направлены на преобразование приоритетных отраслей экономики и социальной сферы. Отдельное внимание уделяется развитию Дальнего Востока, Восточной Сибири, Арктической зоны, Крымского полуострова и Калининградской области, содержащих в своём составе энергоёмкие производства нефтегазовой и минерально-сырьевой отраслей. Для удовлетворения растущего объёма производства сформулирована задача объединения разрозненных автономных пунктов в единые электрические сети небольшой мощности (мини- и микрогрид), охватывающие в том числе населённые пункты малочисленных коренных народов Севера, Сибири и Дальнего Востока с целью развития малых производств и повышения общего уровня жизни населения.

Развитие инфраструктуры России регламентируются следующими нормативными документами: Указом Президента «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» № 204 от 7 мая 2018 г.; Постановлением Российской Федерации «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие энергетики»» № 321 от 15 апреля 2014 г.. Также локальными нормативными документами, например, Постановлением Правительства Ханты-Мансийского автономного округа – Югры «О мерах по реализации государственной программы Ханты-Мансийского автономного округа – Югры «Жилищно-коммунальный комплекс и городская среда» № 635-п от 30 декабря 2021 г. Данные документы направлены на развитие здравоохранения, образования, промышленности, сельского хозяйства и др, что невозможно без увеличения электроэнергетической инфраструктуры регионов.

Объединение децентрализованных районов в локальные энергосистемы небольшой мощности является логистической задачей, которую решают на этапе проектирования.

С повсеместным внедрением цифровых технологий и платформенных решений в сферы народного хозяйства, растёт спрос на разработку специализированных программных продуктов, с заложенными в них инновационными методами расчета, позволяющих производить поиск оптимальных вариантов электрических сетей для дальнейшей разработки.

К настоящему времени большинство программ, позволяющих производить проектирование электрических сетей, не используют (или используют не в полной мере) геоинформационные системы, позволяющие решать задачи трассировки линий электропередачи, а также задачи размещения источников питания.

В контексте данной проблемы в диссертационной работе разработан новый метод определения оптимальной структуры сети с учетом эксплуатационных параметров (уровни напряжений, уровни потерь мощности и энергии, токи в линиях, в том числе учитывается вопросы категорийности электроснабжения электроприемников потребителей) и географических

особенностей района размещения. Для этого были модернизированы алгоритмы поиска по графу, алгоритм определения минимального оставного дерева, а также реализована задача поиска оптимальных решений с использованием популяционно-ориентированных алгоритмов.

Степень разработанности темы исследования. Размещение объектов электроэнергетики, определение структуры электрической сети напрямую влияет на режимы её работы. Следовательно, решение данной задачи имеет существенное значение при проектировании новых электрических сетей и реконфигурации старых. Значительный вклад в развитие методов размещения объектов электроэнергетики, оптимизации электрических сетей с использованием информационных технологий внесли отечественные и зарубежные ученые: Афанасьев А.П., Веников В.А., Воропай Н.И., Воротницкий В.Э., Гадалов А.Б., Гринкруг М.С., Домышев А.В., Ефимов Н.Н., Забудский Г.Г., Идельчик В.И., Илюшин П.В., Косяков С.В., Негадаев В.А., Одинабеков М.З., Осинцев А.А., Панасецкий Д.А., Подковальников С.В., Пупасов-Максимов А.М., Суслов К.В., Усов И.Ю., Федосеев А.В., Федчишин В.В., Фишов А.Г., Фурсанов М.И., Ali Abbas Kazmi S., Bajpai P., Bintoudi A.D., Cañizares C., Garcia Marquez F.P., Han B., Koponen K., Li Z., Mendes de Lima R., Pirnia M., Shahidehpour M., Shu J., Vera E.G., Wang J., Wu L., Yan R., Zhang L. и многие другие. Подход к выбору методов, а также оптимизируемых параметров определяются режимом работы электрической сети, объёмом капиталовложений, окружающей средой, ландшафтом, геополитическими, экологическими и прочими условиями.

Построение связей между объектами генерации и потребления электрической энергии с использованием информационных технологий позволяет повысить эксплуатационные параметры сети. Методы используемые при проектировании линий электропередачи позволяют значительно быстрее исследовать многообразие возможных структур электрических сетей для поиска оптимального варианта. Большой вклад в развитие этих методов внесли ученые Каргашин П.Е., Карпачевский А.М., Косяков С.В., Кубарьков Ю.П., Наумов И.В., Новаковский Б.А., Садыков А.М., Сизова Л.Н., Смирнов С.В., Ткаченко М.А., Трипутина В.В., Хомченко В.Г., Fischetti M., Gonçalves V.M., Liu X., Wang Yu. и многие другие.

Целью диссертационной работы является разработка методов и алгоритмов поиска оптимальных вариантов распределительной электрической сети малой мощности (минирид) для задач планирования и принятия решений с учётом многокритериальности.

Задачи исследования:

1. Произвести анализ современного состояния проблемы определения оптимальной структуры сети с учётом эксплуатационных параметров и географических особенностей района размещения.
2. Разработать метод синтеза варианта структуры минирид с учётом структурной надёжности электроэнергетических систем и географических особенностей района размещения.

3. Разработать метод многокритериального поиска оптимальных вариантов структур электрических сетей мини- и микрогрид с учётом эксплуатационных параметров и географических особенностей района размещения.

4. Модернизировать метод прогнозирования временного ряда энергопотребления минигрид с помощью экстраполяции линии тренда, полученной с помощью вейвлет-преобразования суточного графика нагрузок.

5. Исследовать преимущества предлагаемого автором метода поиска оптимальных структур электрической сети с учетом эксплуатационных параметров и географических особенностей района размещения по сравнению с существующими методами.

Объект исследования: электрические сети децентрализованных районов (минигрид).

Предмет исследования: методы оптимизации структуры сети с учётом эксплуатационных параметров сети (уровни напряжений, уровни потерь мощности и энергии, токи в линиях, в том числе учитывается вопросы категоричности электроснабжения электроприемников потребителей) и географических особенностей района размещения.

Научная новизна работы. На основании выполненного исследования:

1. Модернизирован алгоритм оптимального построения трасс воздушных линий электропередачи 6-35 кВ. Отличием алгоритма от ранее известных является учёт равновесных вариантов трасс и последующая их обработка в соответствии с техническими и технологическими требованиями.

2. Разработана методика синтеза варианта структуры минигрид с учетом структурной надежности электрической сети и географических особенностей района размещения. Элементом научной новизны является адаптация алгоритма Прима для задачи определения достаточной схемы электрической связи.

3. Модернизирован метод прогнозирования энергопотребления минигрид путем поиска линии тренда графика электрических нагрузок с помощью вейвлет-преобразования с дальнейшей её экстраполяцией.

4. Разработан метод решения задачи размещения компонентов электрической системы малой мощности, базирующийся на многокритериальном поиске и включающий в себя разработанный метод синтеза варианта структуры минигрид.

Теоретическая и практическая значимость заключается в следующем:

– для построения трасс линий электропередачи 6-35 кВ на резко неоднородном ландшафте эффективно использован алгоритм поиска равнозначных решений с последующей их фильтрацией для задач проектирования с учетом протяженности, количества поворотов, перепада высот;

– произведена модернизация метода прогнозирования потребляемой мощности минигрид с помощью экстраполяции линии тренда, полученной на основе вейвлет-преобразования графика нагрузок;

– доказана методика определения оптимальной структуры электрической системы, а также расширены границы применения алгоритма Прима для построения схемы электрических соединений с учётом режимных параметров и географических особенностей региона размещения;

– разработан метод по определению точки размещения генерирующего оборудования, а также структуры сети в условиях распределенного потребления для достижения оптимальных режимных параметров электроэнергетических систем, включая минигрид;

– разработаны и внедрены две программы для оптимизации оптимальной структуры сети с учетом эксплуатационных параметров сети и географических особенностей района размещения.

Методология и методы исследования. При выполнении работы использовались: элементы теории электрических цепей и теории графов, методы популяционно-ориентированной оптимизации. Математическое моделирование проводилось с использованием высокоуровневого языка программирования общего назначения Python. Проверка полученных результатов проводилась с использованием программного комплекса RastrWin3, а также с пакетом прикладных программ для технических вычислений MATLAB.

Положения, выносимые на защиту. В диссертационной работе изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения, связанные с поиском оптимальных вариантов распределительной электрической сети для задач планирования и принятия решений при проектировании с учётом Методических указаний по технологическому проектированию линий электропередачи классом напряжения 35-750 кВ¹, а именно:

1. Алгоритм оптимального построения трасс линий электропередачи с учётом технических и технологических ограничений.

2. Методика и алгоритм синтеза вариантов структуры электрических сетей 6-35 кВ, в том числе минигрид, с учётом категорий надежности электроприемников и географических особенностей района размещения.

3. Модернизированный метод прогнозирования потребляемой мощности минигрид с помощью экстраполяции линии тренда, полученной с помощью вейвлет-преобразования графика нагрузок.

4. Метод автоматизированного поиска оптимальных вариантов структур электрических сетей минигрид с учётом схемно-режимных параметров на основе популяционно-ориентированных алгоритмов.

Степень достоверности и апробация результатов. Теория построена на известных проверяемых данных математических методов в логистике, теории графов, в частности, алгоритмы поиска по графу, определение минимального оставного дерева, а также биологически обусловленные и популяционно-ориентированные подходы к искусственному интеллекту.

Основные материалы диссертации докладывались и обсуждались на конференциях: «Пространственное социально-экономическое развитие территорий: формирование комфортной среды и повышение качества жизни населения»: Всероссийской научно-практической конференции с международным участием в рамках XIV Международный IT-Форума с участием стран БРИКС и ШОС. – Ханты-Мансийск: ЮГУ, 2023; IV Международной научно-практической

1 Методические указания по технологическому проектированию линий электропередачи классом напряжения 35-750 кВ: утв. Минэнерго России от 31.08.2022 г. № 884 // Зарегистрировано в Министерстве юстиции Российской Федерации № 71451 от 12.12.2022.

конференции «Проблемы электроэнергетики и телекоммуникаций Севера России». – Сургут: СурГУ, 2023; International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – Сочи, 2023; The International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon 2023). – Магнитогорск: МГТУ, 2023; «Учёные Омска – региону»: V Региональная научно-техническая конференция – Омск: ОмГТУ, 2020; «Актуальные вопросы энергетики»: Всеросс. научно-практическая конференция с международным участием. – Омск: ОмГТУ, 2018.

Реализация результатов работы. Результаты проведенных в работе исследований по разработке методов и алгоритмов оптимизации схемно-режимных параметров электрических систем используются в филиале ПАО «Россети Сибирь» – «Омскэнерго», а также применяются в научно-исследовательской работе и учебном процессе Югорского государственного университета (ЮГУ) при подготовке бакалавров, магистров ЮГУ по таким дисциплинам как Электрические сети и системы, Математические задачи в энергетике, Компьютерные, сетевые и информационные технологии в электроэнергетике.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Диссертационное исследование соответствует паспорту научной специальности

2.4.3. Электроэнергетика:

П.9. Оптимизация структуры, параметров и схем электрических соединений электростанций, подстанций и электрических сетей энергосистем, мини- и микрогрид.

П.14. Разработка методов расчета и моделирования установившихся режимов, переходных процессов и устойчивости электроэнергетических систем и сетей, включая технико-экономическое обоснование технических решений, разработка методов управления режимами их работы

П.20. Разработка методов использования информационных и телекоммуникационных технологий и систем, искусственного интеллекта в электроэнергетике, включая проблемы разработки и применения информационно-измерительных, геоинформационных и управляющих систем для оперативного и ретроспективного мониторинга, анализа, прогнозирования и управления электропотреблением, режимами, надежностью, уровнем потерь энергии и качеством электроэнергии.

Личный вклад соискателя. Соискателю принадлежит разработка методов, анализ результатов, программная реализация алгоритмов, проверка достоверности исследований. Научные и практические результаты, выносимые на защиту, разработанные и полученные автором.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 работ, из них 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК, 5 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 166 наименования и 5 приложений.

Благодарности. Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема "Разработка моделей вейвлет анализа нестационарных режимов электрических сетей для

повышения надежности и эффективности электроснабжения потребителей”, код темы: FENG-2023-0005).

ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Алгоритм оптимального построения трасс линий электропередачи с учётом технических и технологических ограничений

В качестве исходного алгоритма как инструмента для поиска трассы линии электропередачи (ЛЭП) был принят алгоритм Дейкстры (АД) (рисунок 1).

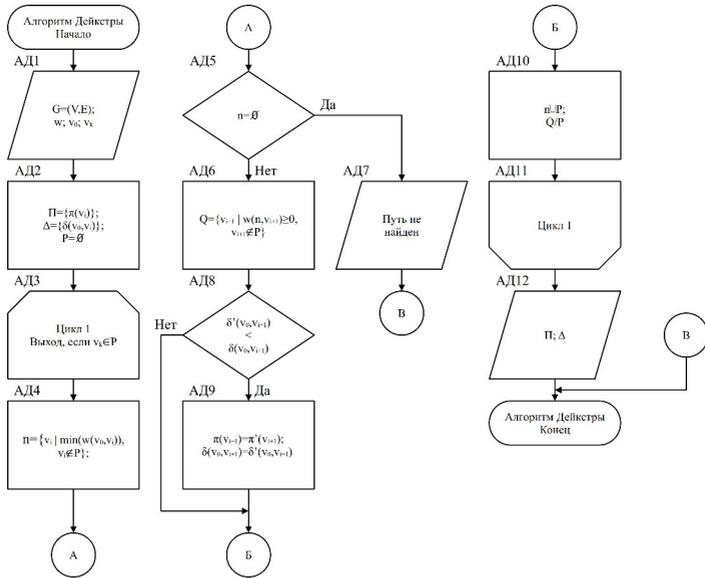


Рисунок 1 — Блок-схема алгоритма Дейкстры

На рисунке 1 $G=(V, E)$ — ориентированный взвешенный граф, представляющий собой территории, где планируется строительство ЛЭП; V — множество вершин графа, т. е. участков территории; E — множество ребер графа, отражающих возможность перехода между смежными вершинами, в частности электрического соединения соседних участков территории; w — искомый путь (трасса ЛЭП); v_0, v_i, v_k — вершины графа начала пути, рассматриваемой i -й вершины, конечной вершины пути соответственно; Δ, δ — множество наименьших суммарных весов путей до вершин V , вес смежного перехода между вершинами соответственно (стоимости строительства ЛЭП); Π, π — множество, элемент множества предшественников (указатели движения); n — текущий исследуемая вершина графа; P, Q — множество посещенных вершин и очередь на посещение соответственно; δ', π' — новые значения соответствующих переменных.

В качестве элемента модернизации данного алгоритма автором работы выступает в первую очередь множество предшественников Π как множество, состоящее из подмножеств Π_v , содержащих информацию о равнозначных связях с соседними вершинами, если таковые имеются (выражение (1)). Массив

предшественников необходим для последующей процедуры восстановления последовательности связанных территорий, предназначенных для строительства ЛЭП (рисунок 2). Таким образом, вместо одного искомого пути w производится поиск множества равновесных путей W (выражение (2)).

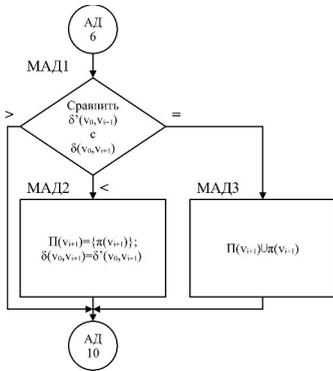


Рисунок 2 — Блок-схема модернизированного алгоритма Дейкстры

$$\Pi = \begin{bmatrix} \Pi(v_0) \\ \dots \\ \Pi(v_k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\pi_1(v_0) \dots \pi_m(v_0)] \\ \dots \\ [\pi_1(v_k) \dots \pi_m(v_k)] \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$W = \begin{bmatrix} w_0 \\ \dots \\ w_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [v_0 \dots v_k] \\ \dots \\ [v_0 \dots v_k] \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где m — количество равновесных путей, соединяющих вершины графа v_0 и v_k .

Однако стоимость ЛЭП также зависит от конфигурации трассы (рисунок 3). Ценность вариантов трасс ЛЭП, содержащихся в W необходимо дополнительно проверить.

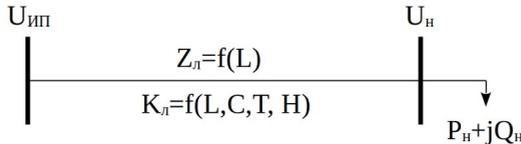


Рисунок 3 — Пример электрической сети с одной линией электропередачи

На рисунке 3: напряжение источника питания и узла нагрузки имеют величины $U_{ИП}$ и $U_н$ соответственно. Величина полной мощности нагрузки определяется активной $P_н$ и реактивной $Q_н$ составляющими; L , C , T , H — протяженность, стоимостные коэффициенты строительства, количество поворотов, перепад высот по трассе ЛЭП соответственно, зависящие непосредственно от трассы w ; $Z_л$ — полное сопротивление линии; $K_л$ — объём капиталовложений на строительство ЛЭП.

Для проверки ценности варианта автором предложено дополнить алгоритм построения трассы фильтрацией результатов по ряду критериев: протяженность ЛЭП (выражение (3)), количество поворотов (выражение (4)), перепады высот по трассе (выражение (5)).

$$\min_w (L(w)), \quad (3)$$

$$\min_w (T(w)), \quad (4)$$

$$\min_w (H(w)), \quad (5)$$

Учёт данных критериев позволяет уменьшить количество анкерных опор, как следствие, уменьшить конечную стоимость ЛЭП.

Пример одного из трех разработанных автором алгоритмов фильтров представлен на рисунке 4.

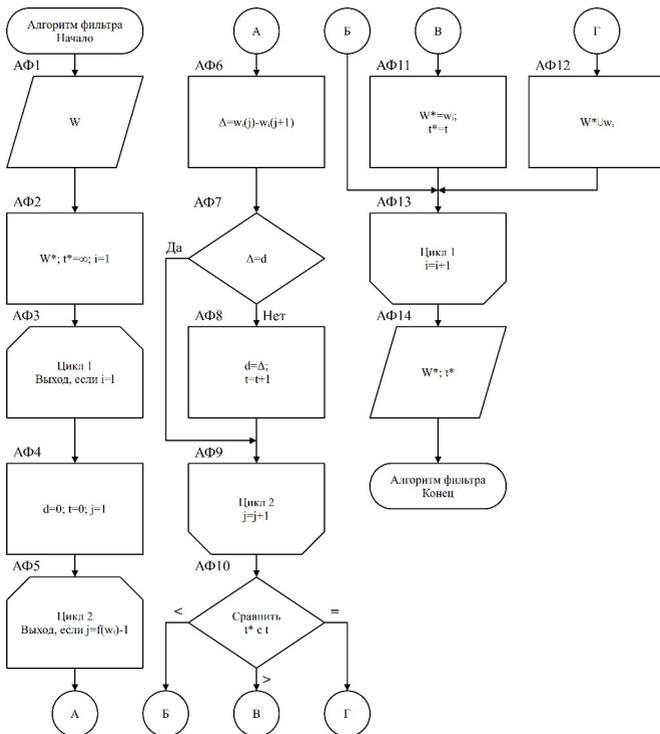


Рисунок 4 — Блок-схема алгоритма фильтра по количеству поворотов

На рисунке 4: t , t^* — первоначальное и новое значение количества поворотов; Δ , d — параметры отслеживающие факт поворота; W^* — новое отфильтрованное множество путей.

Корректность работы модернизированного алгоритма Дейкстры с фильтрацией (МАД) подтверждается корректностью работы классического алгоритма Дейкстры, а также гарантией как минимум одного варианта трассы в качестве результата алгоритма фильтрации.

С помощью МАД автором предложено производить поиск оптимальных трасс ЛЭП между точками генерации, потребления и распределения электрической энергии. Результаты сравнения АД с МАД представлены в таблице 1.

Таблица 1 — Сравнение результатов АД и МАД

	АД		МАД						
	(перв.)	(посл.)	(L, T, H)	(L)	(T)	(H)	(L, T)	(L, H)	(T, H)
L, км	30,22								
T	10	13	10	13	10	11	10	10	10
C, о. е.	79,96								
Кол-во путей	1	1	3	896	3	560	3	560	3

2. Методика и алгоритм синтеза вариантов структуры электрических сетей 6-35 кВ, в том числе минигрид, с учётом категорий надёжности электроприемников и географических особенностей района размещения

При рассмотрении предполагаемой трассы линии электропередачи между двумя точками пространства достаточно использовать МАД для нахождения оптимального пути. Однако если точек, которые необходимо соединить линиями электропередачи, три и более, то количество возможных комбинаций объединения пунктов в единую энергосеть возрастает. Следовательно, из множества вариантов необходимо найти те, которые удовлетворяют требованию максимальной экономичности при достаточных требованиях к надёжности электроснабжения.

Методика, разработанная автором для синтеза варианта структуры сети, состоящей из n , узлов заключается в следующем (рисунок 5):

1. Начиная с узла $i=1$ до n , необходимо построить трассы линий электропередачи, связывающие узел i с остальными с применением МАД.

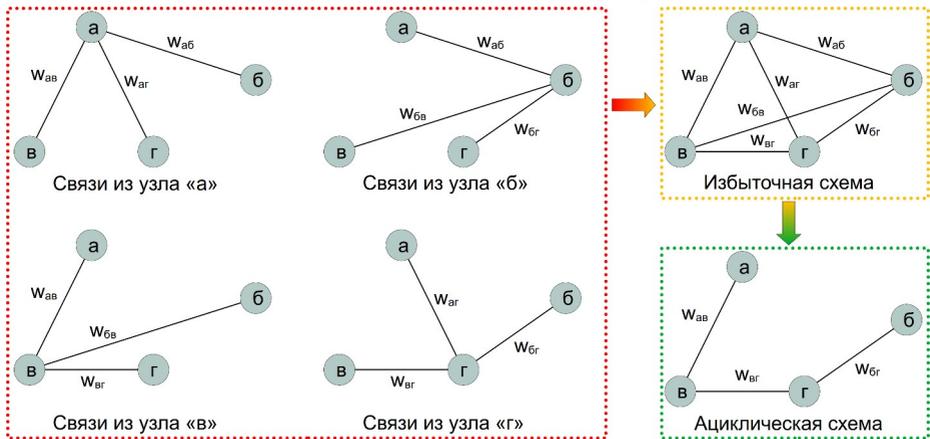


Рисунок 5 — Пример синтеза варианта структуры электрической сети

2. Переход от оценки ЛЭП по стоимости к оценке по протяженности.

3. Построение избыточного графа: вершины графа — узлы генерации, потребления, распределения; ребра графа — возможность перехода из любого узла i в остальные; веса ребер — протяженности соответствующих линий.

4. Поиск минимального оставного дерева по суммарной протяженности ЛЭП с применением алгоритма Прима для получения ациклической схемы (разомкнутой).

5. Учёт требований по надёжности электроснабжения электроприемников потребителей.

Для учёта категорийности (удешевление сети путем изменения количества цепей линий электропередачи) и транзитных узлов автором предлагается следующее решение.

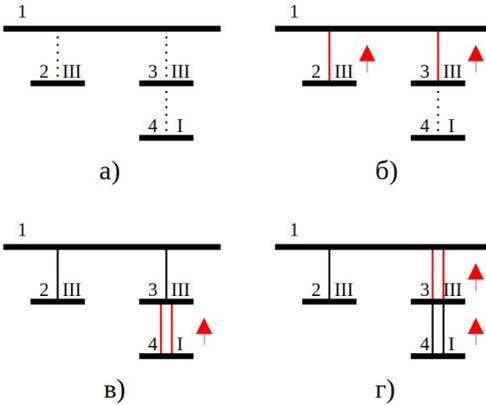


Рисунок 6 — Пример схемы электрических соединений с учётом требований электроснабжения электроприемников по категоричности

Далее аналогично производится определение цепей для II и I категорий (рисунок 6, в, г).

Результатом является ациклическая (разомкнутая) схема электрических связей, соединяющая все узлы электрической системы с наименьшей суммарной протяженностью линий.

3. Модернизированный метод прогнозирования потребляемой мощности минигрид с помощью экстраполяции линии тренда, полученной с помощью вейвлет-преобразования графика нагрузок

С целью учета перспективного изменения потребления мощности и энергии в узлах нагрузок проектируемых электрических сетей необходимо осуществлять среднесрочное прогнозирование электропотребления. Для реализации задачи прогнозирования графика потребляемой мощности узлами нагрузки автором предлагается экстраполяция линии тренда, полученной с помощью вейвлет-преобразования, вместо самого графика.

Для иллюстрации предлагаемого в диссертации подхода на основе вейвлет анализа, примем результаты измерений активной мощности в узле нагрузки за 14 дней (рисунки 7, 8).

Для выявления особенностей представленных графиков и с целью определить линию тренда для дальнейшего прогнозирования применим математический аппарат дискретного вейвлет-преобразования:

$$\hat{F}_{m,n} = a_0^{-\frac{-m}{2}} \cdot \int f(t) \psi(a_0^{-m} t - nb_0) dt, \quad (6)$$

где $\psi_{j,k}(t)$ — функция материнского вейвлета.

Интервал усреднения при построении графиков составляет $\Delta t = 10 \text{ мин.}$, общее время измерения $T = 14 \text{ дней} = 336 \text{ часов}$. Для удобства реализации алгоритма дискретного вейвлет преобразования, методом периодизации, продлим график на 32 точки, тогда $N = 2048$.

Пусть имеется схема электрических соединений (рисунок 6, а), определенная с помощью нахождения минимального оставного дерева графа, содержащая узлы III категории электроснабжения: тупиковый 2 и транзитный 3, а также узел 4 категории I. Сначала производится определение количества цепей для линий, на конце которых узлы с категорией III (рисунок 6, б). Всей цепочке линий от узлов с категорией III до генераторного узла присваивается количество цепей 1.

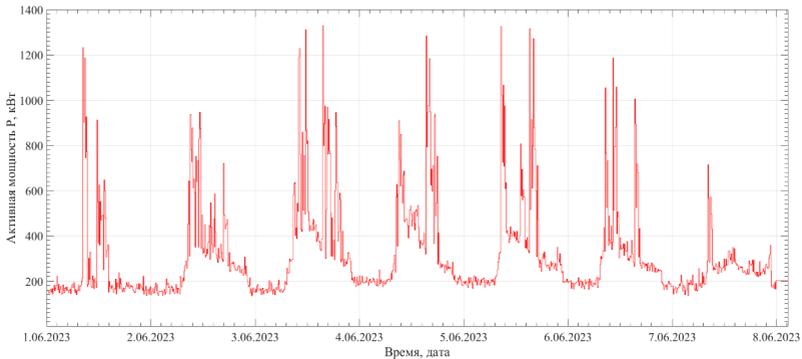


Рисунок 7 — График мощности узла нагрузок за период с 01.06.2023 по 08.06.2023

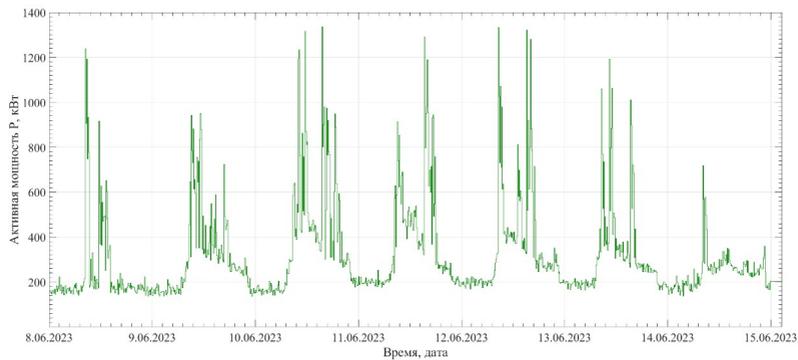


Рисунок 8 — График мощности узла нагрузок за период с 08.06.2023 по 15.06.2023

В качестве функции материнского вейвлета автором предлагается использовать вейвлет Хаара. Для вейвлета Хаара коэффициенты фильтров нижних h_0 , h_1 равны:

$$h_0(k) = \left[\frac{1}{\sqrt{2}} \quad \frac{1}{\sqrt{2}} \right], \quad h_1(k) = \left[-\frac{1}{\sqrt{2}} \quad \frac{1}{\sqrt{2}} \right]. \quad (7)$$

Тогда для основного уровня разложения 10 интервал времени составит $\Delta t = 10240 \text{ мин.}$. А размерность матрицы аппроксимирующих вейвлет-коэффициентов 10 уровня составит 1x2, т. е. по одной ступени на каждую неделю измерений, что является искомой линией тренда.

В результате обратного вейвлет-преобразования для одиночной ветви аппроксимирующих вейвлет коэффициентов A10 получаем двухступенчатый график (рисунок 9), где каждая ступень отвечает за одну неделю времени измерения.

Величина первой ступени составляет 315,2 кВт, величина второй ступени – 316,8 кВт, из чего делаем вывод, что условная ломаная линия тренда, полученная на основе обратного вейвлет-преобразования с помощью вейвлета Хаара, показывает рост потребляемой мощности на 0,5% в неделю.

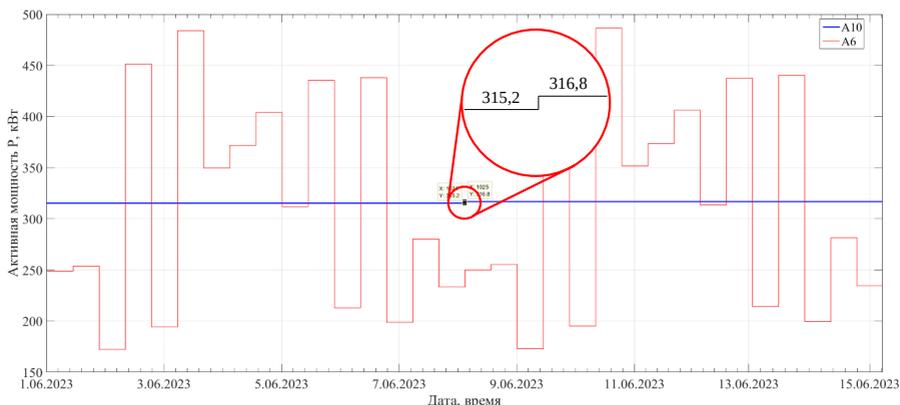


Рисунок 9 — Восстановление (обратное вейвлет-преобразование) по одиночным ветвям A6, A10

Таким образом, автором предлагается построение электрической сети с учётом запаса по мощности в связи со спецификой исследуемых регионов Севера, Сибири и Дальнего Востока как развивающихся. Для этого, имея графики потребляемой мощности для каждого пункта потребления строится прогноз роста мощности. Прогнозируемые максимумы мощности нагрузок принимаются для дальнейшей проектировки электрической сети.

4. Метод автоматизированного поиска оптимальных вариантов структур электрических сетей миниригид с учётом схемно-режимных параметров на основе популяционно-ориентированных алгоритмов

Для решения задачи размещения на дискретно заданной территории автором предлагается использовать паретоориентированный метод эволюционной оптимизации, в частности авторскую реализацию многокритериального генетического алгоритма NSGA-II.

На этапе расчета целевой функции:

1. Определяется по параметрам особи местоположение генераторного узла.
2. С помощью разработанной методики синтеза определяется структура электрической сети.
3. По выражениям (8) и (9) определяются токи в линиях. По величине токов в качестве первого приближения определяются марки проводов по условию нагрева.

$$\dot{I}_e = M^{-1} \cdot \dot{I}_z, \quad (8)$$

$$\dot{I}_{z,i} = \frac{\bar{S}_{z,i}}{\sqrt{3}U_{ном}}, \quad (9)$$

где \dot{I}_e — вектор-столбец протекающих по ветвям токов; M — первая матрица инцидентности без строки, соответствующей балансирующему узлу, т.е. генераторному; \dot{I}_z — вектор-столбец задающих токов, определяемых величиной нагрузки узлов; $\bar{S}_{z,i}$ — комплексно-сопряженное значение задающей мощности i узла нагрузки/генерации; $\dot{I}_{z,i}$ — задающий ток i узла нагрузки/генерации.

4. Имея марку проводников, находятся сопротивления ЛЭП с учётом количества цепей, зависящих от категории электроснабжения электроприемников потребителей.

5. Производится расчет установившегося режима электрической сети. В качестве примера в работе рассматривается расчет с помощью матрицы Z_y с допущением, что генераторный узел является балансирующим.

6. Находятся падения напряжений на ЛЭП

$$\Delta \dot{U}_n = M^T \cdot \dot{U}, \quad (10)$$

где \dot{U} — вектор-столбец напряжений в узлах с учётом базисного (позиция 1).

7. Определяются потери мощности в каждой из ЛЭП

$$\Delta P_n = \text{real}(\text{real}(\Delta \dot{U}_n \circ \Delta \dot{U}_n) \circ \dot{Y}_n), \quad (11)$$

где $\text{real}(x)$ — функция получения действительной части комплексного числа; $X \circ Y$ — произведение Адамара; \dot{Y}_n — вектор-столбец проводимостей линий электропередачи.

8. Для рассматриваемого варианта сети определяются значения критериев оптимальности. В качестве примера были приняты следующие критерии

$$f_1(x) = \sum_j^n K_{lj}, \quad (12) \quad f_2(x) = \frac{\sum_{m=1}^k U_j(x)}{n}, \quad (13)$$

$$\min_x f_3(x) = \min_x \left[\sum_x \Delta P_n(x) \right], \quad (14)$$

где K_{lj} — величина капиталовложений для строительства линии электропередачи j ; n — количество линий электропередачи сети; U_m — величина напряжения в узле m ; k — количество узлов сети.

На этапе ранжирования NSGA-II производится векторное сравнение полученных вариантов сети по вышеупомянутым критериям. Соответственно для критериев (12) и (14) решается задача минимизации, для критерия (13) — максимизации.

Меняя местоположения точек генерации и распределения x возможно множество вариантов сетей электроснабжения, отличающихся от друг друга схемно-режимными параметрами.

Для верификации разработанного метода, а также оценки существования электрического режима в спроектированной электрической сети (рисунок 10) был проведён расчёт режима с учётом частоты в программном комплексе RastWin3 и в пакете математических программ MATLAB. Результаты моделирования представлены в таблице 2.

Произведенный сравнительный анализ между вариантами сети, полученных с помощью предлагаемого метода, а также вариантом сети с генераторным узлом, полученным с помощью гравитационного метода. Для данных вариантов сети использовался предлагаемая методика построения структуры сети. Предлагаемый метод поиска оптимальных вариантов структур

электрических сетей по принятым критериям показывает лучшие результаты: минимальное напряжение в узлах 34,81 кВ для оптимального размещения; 34,75 кВ для гравитационного метода.

Таблица 2 — Результаты моделирования

	RastrWin3			Разрабатываемый метод		
	ΔP, МВт	U _{ср} , кВ	f, Гц	ΔP, МВт	U _{ср} , кВ	f, Гц
Гравитационный метод	0,652	35,69	49,6	0,646	35,71	—
Оптимальный вариант по алгоритму	0,625	35,75	49,605	0,620	35,77	—

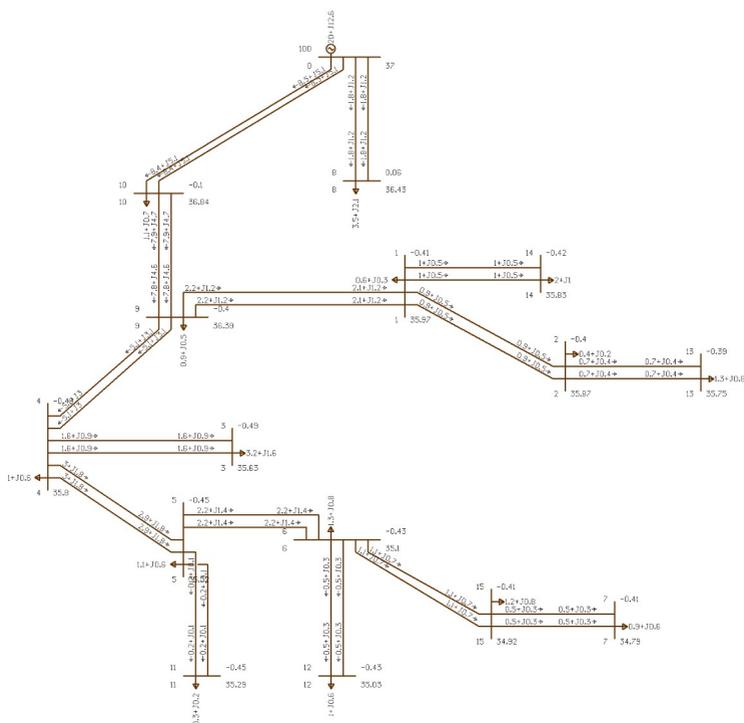
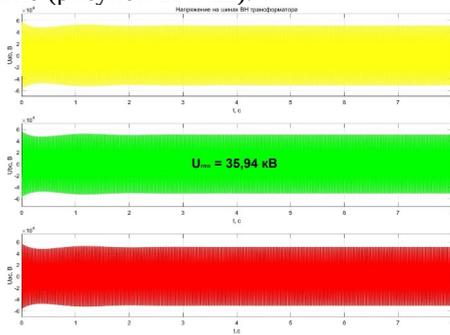
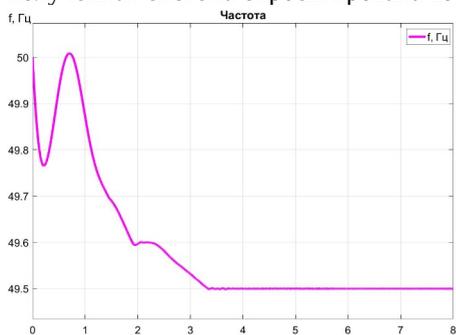


Рисунок 10 — Схема электрической сети в RastrWin3 по разработанному алгоритму

Было установлено качественное и количественное соответствие параметров найденной оптимальной сети с параметрами сети, полученных в RastrWin3 с учетом частоты. Отклонение частоты составило 0,79% (0,4 Гц) от номинальной, что удовлетворяет требованиям к качеству электрической энергии

ГОСТ 32144-2013. Минимальные напряжения в узлах равны 34,79 кВ, что также удовлетворяет требованиям ГОСТ.

Средствами среды графического программирования MATLAB Simulink была смоделирована электроэнергетическая система полученная с помощью предлагаемого метода поиска оптимальной структуры сети, в результате чего было определено, что параметры режима, в частности напряжение и частота, для автономных систем в децентрализованных районах не выходят за допустимые пределы (ГОСТ 32144-2013), что свидетельствует о том, что режим возможен, и полученная система спроектирована корректно (рисунок 11 и 12).



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненной работы были получены решения задач, заключающиеся в следующем:

1. Анализ современного состояния проблемы определения оптимальной структуры сети показал, что окончательное решение по размещению пункта генерации на территории будет зависеть от множества независимых факторов: стоимости электрических связей между пунктами генерации и потребления, режимных параметров электрической сети, величины горячего резерва мощности и т. д.. Для поиска данного решения необходимо задействовать методы, позволяющие производить многокритериальную оптимизацию в условиях дискретно заданных исходных данных, связанных с особенностями региона.

2. Разработан метод синтеза ациклической структуры электрической сети малой мощности (минирид), обладающей наименьшей протяженностью трасс линий электропередачи, полученных с помощью модернизированного алгоритма Дейкстры с фильтрацией. Полученные в ходе поиска пути трассы последовательно отбираются по четырем критериям: стоимости, протяженности, количеству поворотов и перепаду высот по длине трассы. В результате полученные трассы соответствуют методическим указаниям по технологическому проектированию линий электропередачи классом напряжения 35-750 кВ.

3. Разработан автоматизированный паретоориентированный метод векторной оптимизации для поиска структуры сети малой мощности (минирид),

базирующийся на многокритериальном генетическом алгоритме по уровню недоминирования NSGA-II.

4. Модернизирован метод построения прогноза потребляемой мощности, путем экстраполяции линии тренда вместо фактического графика потребляемой мощности. Подобный подход позволяет увеличить точность прогноза путем фильтрации высокочастотной составляющей кривой потребляемой мощности.

5. Произведены сравнительные анализы результатов построения распределительных сетей с применением разрабатываемого метода и классических подходов к проектировке. В результате разрабатываемый метод оказался качественно и количественно лучше классических подходов к проектированию: снижение на 5% потерь активной мощности элементами сети, на 3,93% среднего квадратичного отклонения напряжения в узлах сети.

На основании выполненных задач можно судить о достижении поставленной цели, а именно были разработаны методы и алгоритмы поиска оптимальных вариантов электрической сети малой мощности (минириды) для задач планирования и принятия решений с учётом многокритериальности.

В качестве дальнейших разработок предполагаются: методика синтеза варианта кольцевой структуры электрической сети; модернизация алгоритма построения оптимальных трасс линий электропередачи путём учёта собственной стоимости соединяемых узлов генерации и потребления (учёт схемы распределительного устройства); модернизация алгоритма построения оптимальных трасс линий электропередачи путём учёта многослойности ценовой поверхности; оценка трассы линии электропередачи с предполагаемым расположением промежуточных и анкерных опор; использование специализированных методов расчета установившихся режимов работы электрических сетей с источником ограниченной мощности.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК РФ и приравненных к ним:

1. **Ткаченко, В.А.** Алгоритм расчета потерь мощности, обусловленных высшими гармониками и интергармониками на основе вейвлет-преобразования / Д.С. Осипов, А.Г. Люতারевич, В.А. Ткаченко, Я.Ю. Логунова. – Текст : непосредственный // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2023. – Т. 23, № 1. – С. 38-47.

2. **Ткаченко, В.А.** Упрощенная формула для нагрузочных потерь активной мощности в линиях электропередачи с учетом температуры / В.Н. Горюнов, О.В. Кропотин, А.О. Шенелев, В.А. Ткаченко, С.С. Гиршин, В.М. Троценко. – Текст : непосредственный // Омский научный вестник. – 2018. – № 6(162). – С. 41-49.

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ No 2023669963 Российская Федерация. «Определение оптимальной структуры сети с учетом эксплуатационных параметров сети и географических особенностей района размещения»: No 2023668903: заявлено 14.09.2023: опубликовано

(зарегистрировано) 22.09.2023 / **В.А. Ткаченко**; заявитель ЮГУ. – 1 с. – Текст : непосредственный.

4. **Ткаченко, В.А.** Математическая модель кабельной линии электропередачи с изоляцией из сшитого полиэтилена при подземной прокладке / В. А. Ткаченко, О. В. Кропотин, А. о. Шепелев // Омский научный вестник. – 2018. – № 6(162). – С. 137-141.

Публикации в материалах конференций, входящих в библиографическую базу Scopus:

5. **Tkachenko, V.A.** Calculation Method for Steady State in Open-Loop Power Lines with the Account of Thermal Processes / D.S. Osipov, A.O. Shepelev, V.A. Tkachenko. – Текст : электронный // The International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon 2023) 29th September-01th October 2023, Magnitogorsk, Russia, 2023.

6. **Tkachenko, V.A.** Wavelet transform algorithms in analyzing transient phenomena and power quality parameters / D.S. Osipov, A.O. Paramzin, V.A. Tkachenko – Текст : электронный // International Russian Automation Conference 10th-16th September 2023, Sochi, Russia, 2023. – С. 31-35.

Другие работы автора:

7. **Ткаченко, В.А.** Разработка метода определения оптимальной точки генерации и структуры сети децентрализованных районов, включая минигрид / В.А. Ткаченко // Научный аспект. – 2023.

8. **Tkachenko, V.A.** Developing the calculation methods of effective values of current and voltage for nonsinusoidal transient modes in electric power systems based wavelet transform / O.V. Arkhipova, N.N. Dolgikh, V.Z. Kovalev, D.S. Osipov, A.O. Paramzin, V.A. Tkachenko – DOI: 10.1088/1757-899X/1118/1/012031. – Текст : электронный // International Conference on Mechanical Engineering and Modern Technologies (MEMT 2020) 26th-30th October 2020, Tomsk, Russia, 2021. – Vol. 1118.

9. **Ткаченко, В.А.** Разработка метода оптимизации структуры мини- и микрогрид / В.А. Ткаченко. – Текст: непосредственный // Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием в рамках XIV Международного IT-Форума с участием стран БРИКС и ШОС. – Ханты-Мансийск: ЮГУ, 2023. – с. 289-293.

10. **Ткаченко, В.А.** Влияние способа задания нагрузок на методы расчета установившихся режимов с учетом тепловых процессов / А. О. Шепелев, В. А. Ткаченко. – Текст: непосредственный // Проблемы электроэнергетики и телекоммуникаций Севера России : Сборник трудов IV Международной научно-практической конференции, Сургут, 20–21 апреля 2023 года. – Москва: Издательство "Знание-М", 2023. – С. 267-275.

11. **Ткаченко, В.А.** Практические способы реализации методов расчёта установившихся режимов электрических систем с учётом температурной зависимости активных сопротивлений / А.О. Шепелев, С.С. Гиршин, В.А. Ткаченко, Р.А. Северинов. – Текст: электронный // Ученые Омска - региону: Материалы V Региональной научно-технической конференции. – Омск: ОмГТУ, 2020. – С. 119-123.

Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ:

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ No 2023617336 Российская Федерация. «Построение простых топологий радиальных высокоавтоматизированных сетей электроснабжения»: No 2023615805: заявлено 21.03.2023; опубликовано (зарегистрировано) 07.04.2023 / **В.А. Ткаченко**; заявитель ЮГУ. – 1 с. – Текст : непосредственный.

13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ No 2020662624 Российская Федерация. «Определение оптимального положения ПБВ»: No 2020661470: заявлено 06.10.2020; опубликовано (зарегистрировано) 16.10.2020 / А.В. Дед, **В.А. Ткаченко**, С.Н. Орлов; заявитель ОмГТУ. – 1 с. – Текст : непосредственный.

14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ No 2020610724 Российская Федерация. «Энергосеть ВН. Расчёт и анализ установившихся режимов электроэнергетических систем» : No 2019667460 : заявлено 25.12.2019 : опубликовано (зарегистрировано) 17.01.2020 / А.О. Шепелев, **В.А. Ткаченко**; заявитель ОмГТУ. – 1 с. – Текст : непосредственный.

15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ No 2019615297 Российская Федерация. «Энергосеть СН» : No 2019614258 : заявлено 15.04.2019 : опубликовано (зарегистрировано) 23.04.2019 / А.О. Шепелев, **В.А. Ткаченко**, С.С. Гиршин, А.Я. Бигун; заявитель ОмГТУ. – 1 с. – Текст : непосредственный.

Печатается в авторской редакции
Подписано в печать 19.10.2023 г. Формат 60x84/16.
Отпечатано на дубликаторе. Усл. печ. л. 1.25.
Тираж 100 экз. Заказ №...

Типография: 644050, Омск — 50, пр. Мира, д.11, тел.: 653208.
Омский государственный технический университет,
отдел научной информации.