

# РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТРУКТУРЫ МИНИ-СЕТИ С УЧЕТОМ ОПТИМАЛЬНЫХ МАРШРУТОВ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НА ТЕРРИТОРИИ С РЕЗКО НЕОДНОРОДНЫМ ЛАНДШАФТОМ

В данной работе представлен метод определения оптимальной структуры изолированной электрической сети с учетом географических особенностей области, на которой она располагается. Отличительной особенностью метода является снятие ограничения с количества искомых равнозначных трасс линий электропередачи с последующей фильтрацией трасс с учетом технологических и технических ограничений. Таким образом, полученный метод можно использовать для организации микрогрид в удаленных от Единой национальной (общероссийской) энергетической сети районах с распределенной генерацией и нагрузкой.

**Ключевые слова:** децентрализованное электроснабжение, минигрид, микрогрид, оптимальная структура сети, трассировка линий электропередачи.

**Введение.** Согласно постановлению от 15 апреля 2014 г. № 321 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие энергетики» [1] большое внимание уделяется развитию инфраструктуры Дальнего Востока, Восточной Сибири, Арктической зоны Российской Федерации, Крымского полуострова и Калининградской области. Развитие инфраструктуры данных территорий влечет за собой увеличение потребления электрической энергии, формируя новые центры энергопотребления.

Рассматривая вышеупомянутые районы, стоит отметить, что в их состав входят территории с распределенной генерацией и потреблением электрической энергии, работающие децентрализованно. Такие особенности структур и эксплуатации электрических сетей определяются нефтегазовыми минерально-сырьевыми разрабатываемыми месторождениями и жизнедеятельностью коренных малочисленных народов Севера, Сибири и Дальнего Востока Российской Федерации.

Генерация электроэнергии на таких удаленных территориях от Единой национальной (общероссийской) энергетической сети производится с использованием возобновляемых источников энергии, а также с сопутствующим углеводородным топливом: солнечная, солнечная гибридная генерация, малые ГЭС, использование дизельных и газотурбинных генераторов. Таким образом, можно определить отдельную самодостаточную электросетевую структуру микрогрид, имеющую нагрузку общим

значением менее 100 кВ·А [2, 3]. Однако у подобного рода сетей крайне низкая надежность, что влечет за собой сбои в электроснабжении потребителей [4, 5].

Одним из способов повышения надежности подобных сетей является объединение микрогрид в единую малую сеть с различной степенью автоматизации, называемую минигрид [6–8]. Таким образом, повышается структурная надежность электрической сети, а в связи с несовпадением суточных графиков нагрузки появляется оперативный резерв мощности, затрачиваемый на частичное электроснабжение потребителей при отключении локально установленного «генератора». Приобретенный таким образом запас электрической мощности в дальнейшем можно использовать на развитие инфраструктуры населенных пунктов.

В пользу такого подхода стоит отметить политику некоторых регионов, например, Ханты-Мансийского автономного округа – Югры, где предусматриваются субвенции на возмещение недополученных доходов организациям, осуществляющим реализацию электрической энергии населению и приравненным к ним категориям потребителей в зоне децентрализованного электроснабжения по социально ориентированным тарифам [9].

Построение подобных сетей (минигрид) связано с минимизацией затрачиваемых ресурсов на электрическое соединение всех пунктов потребления электрической энергии воедино, а также с поддержанием режимных параметров в допустимых ин-

тервалах. Данные требования необходимо достичь на этапе проектирования структуры сети: выбор трасс линий электропередачи (ЛЭП), определение последовательности электрических соединений, а также (при необходимости) определение «соединительного узла».

Однако перебор возможных сочетаний требует больших затрат по времени и вычислительных ресурсов, а следовательно, требует автоматизированного расчета со специализированными методами определения оптимальной структуры сети.

Автоматизированные расчеты для решения подобных задач широко используются в электронике и в организации компьютерных сетей — взаимодействие ИТ-инфраструктуры, но для проектирования электрических сетей, а также для инженерных коммуникаций в целом находятся на этапе развития [10, 11].

Так, например, в работе [12] представлен подход к определению местоположения подстанции по ценовой поверхности прокладываемого кабеля для обеспечения электрической энергией многоквартирных домов. Такой подход к определению оптимальной точки размещения достаточно прост и даёт хорошие результаты, однако полученная трасса кабельной линии не является оптимальной с точки зрения прокладки, т.к. наличие многих поворотов на трассе не только усложняет возведение трассы, но и сказывается на целостности кабеля (нарушается однородность изолирующих материалов в местах перегиба).

Аналогичный подход реализован авторами в работе [13]. В качестве анализируемого объекта принята матрица геодезических дистанций, содержащая информацию о капитальных затратах для соединений двух точек местности.

Подобные методы определения трасс линий электропередачи основаны на графовых структурах (способ представления исследуемой территории) и алгоритмах поиска по графу. Накладывая дополнительные ограничения на граф или же изменяя, модернизируя эвристическую функцию алгоритма поиска пути, можно решать различные задачи, в том числе и для нужд электроэнергетики [14, 15]. В работе [16] авторы определяют оптимальную трассу линии электропередачи с использованием растровых и векторных данных. Задача решается с помощью оценки проходимости территории с учётом технических ограничений линий электропередачи [17] и охранных зон объектов электросетевого хозяйства [18]. Данный подход позволяет учитывать особенности существующей сетевой инфраструктуры, позволяет формализовать предпочтения по сближению линии электропередачи с иными техническими коммуникациями. Полученный авторами результат исследования (трасса линии электропередачи) показал своё экономическое преимущество по отношению с официально принятым проектным решением, однако используемый метод экспертных оценок и субъективность весовых коэффициентов, используемых при оценке критериев трассы, даёт субъективно хороший результат, но не оптимальный.

Вышеупомянутые работы в качестве исходных данных принимают, в том числе, карту местности. В качестве такой карты может служить растровое изображение или данные из геоинформационных систем, которые в настоящее время быстро развиваются. С развитием нейросетевого программирования, в частности сверточных нейронных сетей,

а также нейронных сетей классификаторов, стало возможным определение ландшафтных особенностей рассматриваемых областей по спутниковым снимкам и др. Также геоинформационная система может иметь информацию о строении почв, охранных зонах и другую информацию, необходимую при проектировании объектов электроэнергетики. Перевод данных подобных систем в графовые структуры является тривиальной задачей.

Резюмируя вышесказанное, стоит отметить, что развитие децентрализованных районов придаст импульс развитию топливно-энергетического комплекса, однако из-за специфики территориального расположения необходимы методы определения структуры электрической сети для достижения дешевизны проектируемой сети, бесперебойного электроснабжения с надлежащим качеством электрической энергии, а также достижения требований рационального природопользования и др.

**Постановка задачи.** В связи с ростом ответственной по электроснабжению инфраструктуры в удаленных от Единой национальной (общероссийской) электрической сети населенных пунктов и разрабатываемых месторождений нефтегазодобычи необходимо частичное объединение распределенной генерации и потребления в минигрид с различным уровнем автоматизации, что повысит структурную надежность, а также предоставит оперативный резерв мощности. Таким образом, объектом исследования в данной работе являются электрические сети децентрализованных районов. Предметом исследования выступает структура минигрида, объединяющая рассредоточенные точки генерации и потребления (микрогрид).

Для того чтобы определить оптимальную структуру будущей электрической сети, необходимо определить оптимальный для данной задачи алгоритм поиска пути по графу, определить наилучшие (равнозначные) варианты трасс электрических связей между всеми объектами электроэнергетики, определить точки размыкания сложноразветвленной сети, провести анализ полученной сети.

**Теория.** В задачах размещения в качестве графа выступает поделенная на секторы местность, где планируется проектирование электроустановки. Секторы выступают в качестве узлов графа. Связи же графов определяются из условий задачи. Если по условиям задачи необходимо найти кратчайший путь из одной вершины в другую, то веса ребер в таком случае бинарные. В случае нахождения, например, самого экономичного пути (не всегда самого короткого) величины весов ребер принимаются из соображений капиталовложений для соединения двух смежных вершин линией электропередачи (в именованных или относительных единицах). Таким образом, функция минимизации для решения задачи соединения линией электропередачи двух разных объектов энергетики сводится к нахождению пути (1), сумма весов ребер которого будет минимальной (2).

$$K_s(p) = \sum_{i=1}^m K(v_{i-1}, v_i), \quad (1)$$

$$K_{s \min}(v_s, v_e) = \begin{cases} \min \{ K_s(p) : v_s \rightarrow^p v_e \}, \\ \text{если суц. — ет путь из } v_s \text{ в } v_e, \\ \infty, \text{ в противном случае,} \end{cases} \quad (2)$$

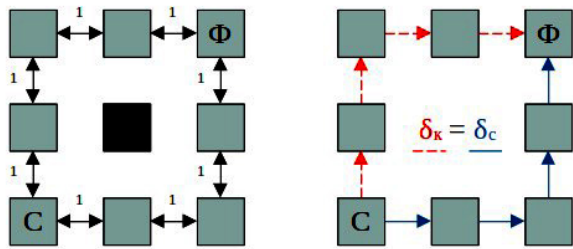


Рис. 1. Пример равнозначных путей на графе

где  $K_A$  — объём капиталовложений на строительство ЛЭП;  $K$  — величина капиталовложений на электрическое соединение между двумя смежными вершинами графа  $v_{i-1}$  и  $v_i$ ;  $m$  — количество вершин, входящих в последовательность  $p$ , представляющую собой трассу ЛЭП;  $K_{\min}$  — минимальный объём капиталовложения на строительство ЛЭП, связывающей вершины графа  $v_s, v_b$ , соответствующие началу и концу трассы.

Для поиска минимальной по величине капиталовложений трассы используются оригинальные алгоритмы поиска по графу Дейкстры и  $A^*$  или наследованные от них семейства алгоритмов [19].

В случае алгоритма Дейкстры исследование, а следовательно, и поиск пути происходит в радиальном направлении (в форме многолучевой звезды), т.к. алгоритм Дейкстры, в свою очередь, наследник такого поискового алгоритма как «Поиск в ширину». Распределяясь во всех направлениях (главное условие — дешевизна следующего шага) алгоритм Дейкстры затрачивает больше времени для исследования, чем  $A^*$ , но он исследует большее количество узлов графа.

Алгоритм  $A^*$ , в свою очередь, ориентируется помимо стоимости следующего шага и на направление, в котором необходимо исследовать область для достижения цели.  $A^*$  позволяет в кратчайшие сроки и с меньшими вычислительными мощностями достигнуть результата.

Хотя алгоритм  $A^*$  позволяет быстрее добраться до цели, однако исследование секторов, лежащих в противоположном от цели направлении, не проводится, что приводит к возможности неверного нахождения пути. Также поиск  $A^*$  для нескольких целей производится последовательно, т.е. алгоритм находит путь к одному узлу, затем к следующему и т.д. Алгоритм Дейкстры в процессе своей работы находит путь до каждого посещенного узла, что позволяет искать маршруты для нескольких точек сразу. Также условно радиальное распространение алгоритма позволяет исследовать и секторы в противоположном от цели направлении, чего лишен алгоритм  $A^*$ .

Таким образом, при построении нескольких трасс линий электропередачи от источника питания к узлам нагрузки предпочтительнее использовать именно алгоритм Дейкстры, позволяющий также реагировать на уже имеющиеся электрические сети в исследуемом регионе.

В ходе решения инженерных задач появляются случаи, когда возможно появление равнозначных решений. Классическими подходами выбора единственного решения являются зашумление данных поискового пространства или отбор и сохранение только первого или последнего найденного решения.

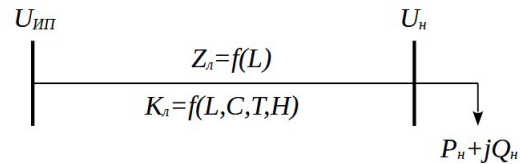


Рис. 2. Пример электрической сети с одной линией электропередачи

Однако выбор трассы технических коммуникаций может зависеть не только от конфигураций ценовой поверхности, но и из соображений удобства прокладки, дальнейшего расширения коммуникаций и т.д. В таком случае необходим поиск и сохранения множества равнозначных решений (рис. 1).

Так, на рис. 1 представлен неориентированный граф, связи вершин которого представлены в виде стрелок. Начальный и конечный узлы соответствуют буквам «С» и «Ф». Как видно по рисунку, количество путей, связывающих два узла, равно 2 (путь «К» и путь «С»), стоимости данных путей также равны  $\delta_k = \delta_c$ .

Для поиска всех возможных решений классический алгоритм Дейкстры не подходит. Необходимо его модернизировать, внося коррективы в запоминание не единственного наилучшего пути, а, если попадают несколько совпадающих по стоимости путей, сохранять их все. Естественно, многие из этих вариантов трасс нежизнеспособны и на практике маловероятно будут использоваться. Для того, чтобы отсечь такие варианты, необходимо дополнить алгоритм Дейкстры постобработкой результатов по каким-либо критериям, использовать эвристическую функцию.

Рассмотрим линию электропередачи, соединяющую источник питания (ИП) и пункт потребления электроэнергии, которым соответствуют напряжения  $U_{ип}$  и  $U_n$  (рис. 2).

В точке балансовой принадлежности, на шине с напряжением  $U_n$ , допустимо отклонение напряжения до  $\pm 10\%$  [20]. В свою очередь, потери напряжения до узла нагрузки можно определить как

$$\Delta U_{\%} = \frac{P_n R_{\lambda} + Q_n X_{\lambda}}{U_{ном}^2} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где  $R_{\lambda}, X_{\lambda}$  — активное и реактивное сопротивления линии соответственно, Ом;  $U_{ном}$  — номинальное напряжение сети, В;  $P_n, Q_n$  — активная и реактивная мощности нагрузки соответственно, Вт, вар.

В свою очередь,  $R_{\lambda}$  и  $X_{\lambda}$  находятся через погонные параметры ЛЭП и зависят от протяженности линии как

$$Z_{\lambda} = R_{\lambda} + jX_{\lambda} = L(r_0 + jx_0), \quad (4)$$

где  $Z_{\lambda}$  — полное сопротивление ЛЭП, Ом;  $L$  — длина ЛЭП, км;  $r_0, x_0$  — активное и реактивное погонное сопротивление ЛЭП, Ом/км.

Таким образом, для выполнения условий по отклонению напряжения ( $\pm 10\%$ ) необходимо производить поиск трассы линии электропередачи с наименьшей длиной. С другой стороны, при учете резко неоднородного ландшафта линии с наименьшей протяженностью могут многократно превышать стоимость линий, огибающих препятствия. Перепад высот, повороты трассы требуют установ-

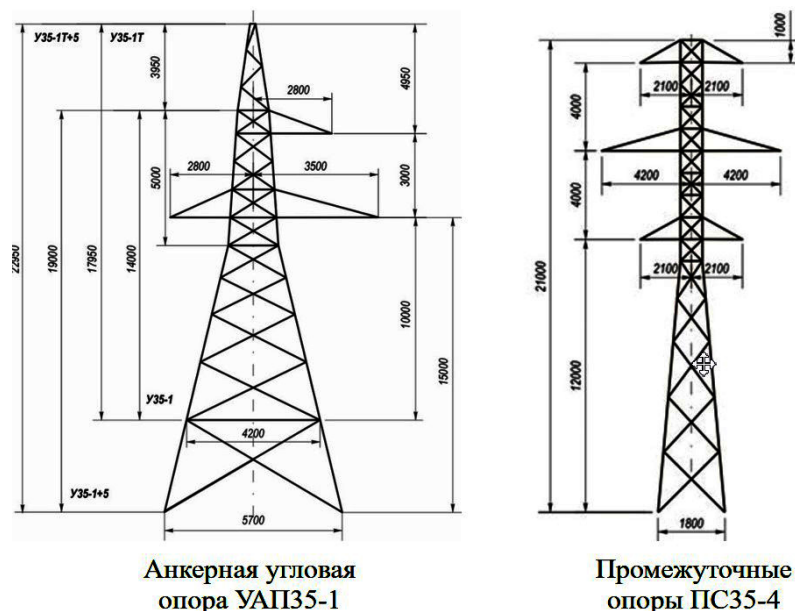


Рис. 3. Анкерная угловая опора и промежуточная (35 кВ)

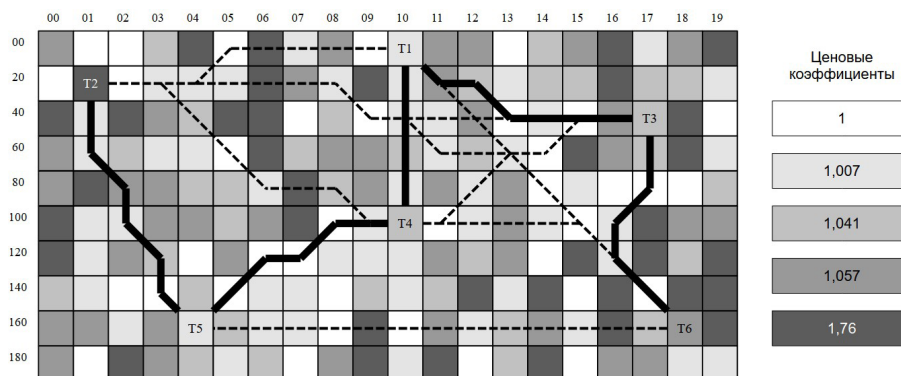


Рис. 4. Рассматриваемая область с резко неоднородным ландшафтом и смоделированной электрической сетью

ку дополнительных анкерных опор, стоимость которых на 30 % больше промежуточных (рис. 3), что увеличивает общую стоимость ЛЭП.

Таким образом, капиталовложения для строительства ЛЭП можно описать как некоторую функцию  $K_A = f(L, C, T, H)$ , зависящую от протяженности линии  $L$ , удельных капиталовложений в зависимости от вида ландшафта  $C$ , от количества поворотов  $T$ , а также перепада высот  $H$ .

Предлагается обрабатывать результаты модернизированного алгоритма Дейкстры с помощью фильтров в последовательности: поиск наикротчайших, поиск с наименьшим количеством поворотов, поиск трасс с наименьшим перепадом высот по длине.

**Результаты эксперимента.** Рассмотрим случайно сгенерированную прямоугольную область, представляющую собой разнородный ландшафт, поделенный на прямоугольные секторы размером  $1 \times 1$  км. Таким образом, получается координатная сетка, содержащая по горизонтали  $n = 10$  рядов и по вертикали  $m = 10$  рядов. Общее количество секторов равно  $n \cdot m = 10 \cdot 10 = 100$  (рис. 4).

На рис. 4 область представлена в виде ценовой поверхности, сформированной на основании стоимости электрического соединения смежных узлов

(клеток) на основании укрупненных нормативов цены типовых технологических решений капитального строительства объектов электроэнергетики в части объектов электросетевого хозяйства [21]. Допущением при формировании ценовой поверхности является использование максимальных затрат на строительство ЛЭП, т. е. двухцепной линии на отдельных опорах с максимальным сечением провода. По итогу определения структуры необходимо пересчет капиталовложений с учетом количества цепей линии, их прокладки и фактического сечения провода.

Величины ценовых коэффициентов приняты для пяти случаев трассы двух цепей на отдельно стоящих опорах с сечением провода  $150 \text{ мм}^2$ : равнина (1 о. е., или 9080 тыс. руб./км); просека через кустарник и мелколесье (1,007 о. е., или 9140 тыс. руб./км); просека (1,041 о. е., или 9454 тыс. руб./км); просека с выкорчевыванием пней (1,057 о. е., или 9602 тыс. руб./км); болотистая местность (1,759 о. е., или 15970 тыс. руб./км). Задача на данном этапе сводится к нахождению трасс, связывающих всевозможные сочетания пар вершин, которым соответствуют пункты генерации (Т1) и потребления (Т2–Т6).

## Результаты моделирования

Стартовый узел	Конечный узел	Трасса, узлы	Стоимость пути, о. е.	Протяженность, км
10 (Т1)	21 (Т2)	21-24-5-10	10,63	9,41
	<b>57 (Т3)</b>	<b>57-53-32-31-10</b>	<b>8,04</b>	<b>7,83</b>
	<b>110 (Т4)</b>	<b>110-10</b>	<b>5,08</b>	<b>5,00</b>
	164 (Т5)	164-126-127-108-68-30-10	11,20	11,07
	178 (Т6)	178-10	11,54	11,31
21 (Т2)	57 (Т3)	57-49-28-21	17,79	16,41
	110 (Т4)	110-109-88-86-23-21	11,95	10,66
	<b>164 (Т5)</b>	<b>164-143-123-102-82-61-21</b>	<b>8,77</b>	<b>8,24</b>
	178 (Т6)	178-73-71-50-49-28-21	21,24	19,90
57 (Т3)	110 (Т4)	110-111-73-74-55-57	8,36	8,24
	164 (Т5)	164-126-130-73-74-55-57	15,62	15,49
	<b>178 (Т6)</b>	<b>178-136-116-97-57</b>	<b>7,36</b>	<b>7,24</b>
110 (Т4)	<b>164 (Т5)</b>	<b>164-126-127-108-110</b>	<b>7,27</b>	<b>7,24</b>
	178 (Т6)	178-115-110	9,38	9,24
164 (Т5)	178 (Т6)	178-164	15,81	14
<b>ИТОГО ДЛЯ СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЙ</b>			36,52	35,55

\*прямолнейные участки трасс представлены в виде узел начала — узел конца прямолинейного участка, т. е. для участка 1-2-3-4 запись будет иметь вид: 1-4.

\*\*полужирным выделены трассы, входящие в результирующую схему электрических соединений

В результате работы алгоритма Дейкстры, модернизированного с учетом всех равнозначных путей с последующей фильтрацией с помощью эвристической функции, были получены всевозможные сочетания соединений, представленные в виде жирных и пунктирных линий на рис. 4, табл. 1.

Представленная на рис. 4 схема является сложноразветвленной и не подходит для дальнейшего использования в качестве варианта сети. Необходимо определить точки размыкания данной сети с учетом наименьшей протяженности линий электропередачи. В качестве критерия поиска принята суммарная протяженность линий электропередачи (5), связанная с потерями напряжения (3) для магистральной сети. Т. е. при возможном построении магистральной линии электропередачи предпочтение будет отдаваться участкам трасс с наименьшей протяженностью.

$$L_{\Sigma}(G') = \sum_{(u,v) \in G'} L(u,v), \quad (5)$$

где  $L_{\Sigma}$  — общая протяженность ЛЭП некоторой достаточной схемы электрических соединений  $G'$ ;  $L(u,v)$  — протяженность ЛЭП, соединяющей пару пунктов  $u$  и  $v$ .

Таким образом, целевой функцией будет  $\min[L_{\Sigma}(G')]$ , зависящей от схемы электрических соединений.

Для подобного рода задачи предлагается использовать алгоритм Прима, предназначенный для определения минимального оставшего дерева неориентированного графа [19]. Также стоит учесть, что работа алгоритма Прима будет производиться на графе, полученном в результате использования алгоритма Дейкстры, т.е. на трассах линий с наименьшими капиталовложениями.

Полученная схема электрической сети представлена на рис. 4 (жирные линии).

**Закключение.** В данной работе был рассмотрен подход к построению структур минирид децентрализованных районов с использованием графовых структур и алгоритмов поиска по графу (с учётом допущения на формирование стоимостной поверхности): алгоритм Дейкстры, алгоритм Прима.

Неотъемлемой частью данного подхода к проектированию электрических сетей является учет всевозможных равнозначных трасс линий электропередачи. Также используется модернизированный алгоритм поиска по графу, учитывающий технические ограничения, являющиеся специфичными для различных типов коммуникаций.

### Благодарности

Работа выполнена в рамках гранта РФФ «Разработка принципов управления и контроля режимов работы электроэнергетических систем на основе вейвлет преобразования данных о параметрах режима» Соглашение № 22-29-20052.

### Библиографический список

1. Российская Федерация. Постановление. Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие энергетики»: постановление от 15 апреля 2014 г. № 321. Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс».
2. ГОСТ Р 55993-2014/IEC/TS 61836:2007. Системы фотоэлектрические. Термины, определения и символы. Введ. 2015–01–01. Москва: Стандартинформ, 2007. 85 с.
3. Молодюк В. В., Исамухамедов Я. Ш., Баринов В. А. О разработке целевой модели (прототипа) Mini/Microgrid // Энергетик. 2021. № 9. С. 48–53. EDN: GGAKFC.
4. Фишов А. Г. Технические и экономические аспекты создания миниридов и их интеграции с централизованным энергоснабжением // Энергетик. 2022. № 4. С. 27–34. EDN: CZLOIZ.

5. Бык Ф. А., Мышкина Л. С. Надежность объектов распределенной энергетики // Надежность и безопасность энергетики. 2021. Т. 14, № 1. С. 45–51. DOI: 10.24223/1999-5555-2021-14-1-45-51. EDN: XRWJGO.
6. Bintoudi A., Demoulias C. Optimal isolated microgrid topology design for resilient applications // Applied Energy. 2023. Vol. 338 (1). P. 120909. DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.120909.
7. Du S., Wu D., Dai Z. [et al.]. Regional collaborative planning equipped with shared energy storage under multi-time scale rolling optimisation method // Energy. 2023. Vol. 277 (5). P. 127680. DOI: 10.1016/j.energy.2023.127680.
8. Zhou Y., Ma Y., Wang J. [et al.]. Collaborative planning of spatial layouts of distributed energy stations and networks: A case study // Energy. 2021. Vol. 234 (3). P. 121205. DOI: 10.1016/j.energy.2021.121205.
9. О мерах по реализации государственной программы Ханты-Мансийского автономного округа – Югры «Жилищно-коммунальный комплекс и городская среда»: постановление от 30 декабря 2021 г., № 635–п // Правительство Ханты-Мансийского автономного округа – Югры. 2021. 30 декабря. 183 с.
10. Бушин С. А., Курейник В. В. Генетический алгоритм размещения разногабаритных элементов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2009. № 12 (101). С. 22–27. EDN: LAUDKZ.
11. Ghorayeb K., Hayek H., Harb A. [et al.]. Bridging the integration gap — simultaneous optimization of well placement, well trajectory, and facility layout // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2023. Vol. 220. P. 111222. DOI: 10.1016/j.petrol.2022.111222.
12. Гадалов А. Б., Козлов Е. Г., Косяков С. В. Анализ стоимости размещения трансформаторных подстанций с использованием методов построения ценовых поверхностей в среде ГИС // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XXI Бернардосовские чтения): материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 140-летию изобретения электросварки Н. Н. Бернардосом, 02–04 июня 2021 г. Иваново, 2021. Т. 3. С. 9–12. EDN: FWUTYG.
13. Афанасьев А. П., Гринкрут М. С., Ткачева Ю. И. Определение местоположения трансформаторных подстанций в сети электроснабжения низкого напряжения с помощью кумулятивной матрицы геодезических дистанций // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2014. Т. 1, № 2. С. 17–20. EDN: SYETKT.
14. Хомченко В. Г., Зуга И. М., Кужель А. Н. [и др.]. Исследование качественных показателей методов трассировки на основе волнового алгоритма и алгоритма A\* применительно к промышленным предприятиям // Омский научный вестник. 2018. № 6 (162). С. 220–224. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-220-224. EDN: YSWONF.
15. Жила В. А., Ключко А. К., Маркевич Ю. Г. Нахождение конфигурации газораспределительных сетей математическими методами // Интернет-вестник ВолгГАСУ. 2013. № 1 (25). С. 1–4. EDN: RBBGHH.
16. Новаковский Б. А., Каргашин П. Е., Карпачевский А. М. Геоинформационный анализ территории для автоматизированного выбора трассы ЛЭП // Геоинформатика. 2017. № 2. С. 30–38. EDN: ZRCUOB.
17. Правила устройства электроустановок. 7-е изд., изм. и доп. Новосибирск: Изд-во Сиб. ун-та, 2005. 510 с.
18. Российская Федерация. Постановление. О порядке установления охранных зон объектов электросетевого хозяйства и особых условий использования земельных участков, расположенных в границах таких зон: постановление от 24 февраля 2009 г. № 160. Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс».
19. Кормен Т. Х., Лейзерсон Ч., Ривести Р. [и др.]. Алгоритмы: построение и анализ / пер. с англ. и ред. И. В. Красикова. 3-е изд. Москва: Вильямс, 2013. 1328 с. ISBN 978-5-8459-1794-2.
20. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014–07–01. Москва: Стандартинформ, 2014. 19 с.
21. Российская Федерация. Приказ. Об утверждении укрупненных нормативов цены типовых технологических решений капитального строительства объектов электроэнергетики в части объектов электросетевого хозяйства: приказ от 17 января 2019 г. № 10. Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс».

---

**ТКАЧЕНКО Всеволод Андреевич**, преподаватель  
Политехнической школы Югорского государственного университета, г. Ханты-Мансийск.  
SPIN-код: 5200-0062  
AuthorID (РИНЦ): 939477  
ORCID: 0000-0002-7321-1162  
AuthorID (SCOPUS): 57210291005  
ResearcherID: W-3652-2019  
Адрес для переписки: sevaatmail@gmail.com

#### Для цитирования

Ткаченко В. А. Разработка метода определения структуры мини-сети с учетом оптимальных маршрутов линий электропередачи на территории с резко неоднородным ландшафтом // Омский научный вестник. 2023. № 4 (188). С. 109–116. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-109-116.

Статья поступила в редакцию 05.06.2023 г.  
© В. А. Ткаченко

# DEVELOPMENT OF A METHOD FOR DETERMINING THE STRUCTURE OF MINI-GRID, TAKING INTO ACCOUNT OPTIMAL ROUTES OF POWER LINES IN AN AREA WITH SHARPLY HETEROGENEOUS LANDSCAPE

This paper presents a method for determining the optimal structure of an isolated electrical network, taking into account the geographical features of the area in which it is located. A distinctive feature of the method is the removal of restrictions on the number of equivalent routes of power transmission lines sought, with subsequent filtering of the routes, taking into account technological and technical limitations. Thus, the obtained method can be used to organize microgrids in areas remote from the Unified National (All-Russian) Energy Grid with distributed generation and load.

**Keywords:** decentralized power supply, minigrid, microgrid, optimal network structure, transmission line routing.

## Acknowledgments

The work is carried out within the framework of the Russian Science Foundation grant «Development of principles for controlling and controlling the operating modes of electric power systems based on wavelet transformation of data on mode parameters» Agreement No. 22-29-20052.

## References

1. Rossiyskaya Federatsiya. Postanovleniye. Ob utverzhdenii gosudarstvennoy programmy Rossiyskoy Federatsii «Razvitiye energetiki»: postanovleniye ot 15 aprelya 2014 g. No. 321 [Russian Federation. Resolution. On approval of the state program of the Russian Federation «Energy Development»: Decree dated April 15, 2014 No. 321]. Available at «Consultant Plus» System. (In Russ.).
2. GOST R 55993-2014/IEC/TS 61836:2007. Sistemy fotoelektricheskoye. Terminy, opredeleniya i simvoly [Solar photovoltaic energy systems. Terms, definitions and symbols]. Moscow, 2007. 85 p. (In Russ.).
3. Molodyuk V. V., Isamukhamedov Ya. Sh., Barinov V. A. O razrabotke tselevoy modeli (prototipa) Mini/Microgrid [About development of purposeful model (antetype) Mini / Microgrid] // *Energetik. Energetik.* 2021. No. 9. P. 48–53. EDN: GGAKFC. (In Russ.).
4. Fishov A. G. Tekhnicheskiye i ekonomicheskiye aspekty sozdaniya minigrinov i ikh integratsii s tsentralizovannym energosnabzheniyem [Technical and economic aspects of creating minigrids and their integration with centralized power supply] // *Energetik. Energetik.* 2022. No. 4. P. 27–34. EDN: CZLOIZ. (In Russ.).
5. Byk F. L., Myshkina L. S. Nadezhnost' ob'yektov raspredelennoy energetiki [Reliability of distributed energy

- facilities] // *Nadezhnost' i Bezopasnost' Energetiki. Safety and Reliability of Power Industry.* 2021. Vol. 14, no. 1. P. 45–51. DOI: 10.24223/1999-5555-2021-14-1-45-51. EDN: XRWJGO. (In Russ.).
6. Bintoudi A., Demoulias C. Optimal isolated microgrid topology design for resilient applications // *Applied Energy.* 2023. Vol. 338 (1). P. 120909. DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.120909. (In Engl.).
7. Du S., Wu D., Dai Z. [et al.]. Regional collaborative planning equipped with shared energy storage under multi-time scale rolling optimisation method // *Energy.* 2023. Vol. 277 (5). P. 127680. DOI: 10.1016/j.energy.2023.127680. (In Engl.).
8. Zhou Y., Ma Y., Wang J. [et al.]. Collaborative planning of spatial layouts of distributed energy stations and networks: A case study // *Energy.* 2021. Vol. 234 (3). P. 121205. DOI: 10.1016/j.energy.2021.121205. (In Engl.).
9. O merakh po realizatsii gosudarstvennoy programmy Khanty — Mansiyskogo avtonomnogo okruga — Yugry «Zhilishchno-kommunal'nyy kompleks i gorodskaya sreda»: postanovleniye ot 30 dekabrya 2021 goda No. 635-p [On measures to implement the state program of the Khanty-Mansiysk Autonomous Region — Ugra «Housing and communal services complex and urban environment»: Resolution of December 30, 2021, No. 635-p] // *Pravitel'stvo Khanty-Mansiyskogo avtonomnogo okruga — Yugry. Government of the Khanty-Mansiysk Autonomous Region.* 2021. 183 p. (In Russ.).
10. Bushin S. A., Kureynik V. V. Geneticheskiy algoritm razmeshcheniya raznogabaritnykh elementov [Different-dimension elements placement genetic algorithm] // *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskiye nauki. Izvestiya Sfedu. Engineering Sciences.* 2009. No. 12 (101). P. 22–27. EDN: LAUDKZ. (In Russ.).
11. Ghorayeb K., Hayek H., Harb A. [et al.]. Bridging the integration gap — simultaneous optimization of well placement, well trajectory, and facility layout // *Journal of Petroleum Science and Engineering.* 2023. Vol. 220. P. 111222. DOI: 10.1016/j.petrol.2022.111222. (In Engl.).

12. Gadalov A. B., Kozlov E. G., Kosyakov S. V. Analiz stoimosti razmeshcheniya transformatornykh podstantsiy s ispol'zovaniyem metodov postroyeniya tsenovykh poverkhnostey v srede GIS [Power distribution substations locations analysis using the methods of constructing cost surfaces in GIS] // Sostoyaniye i perspektivy razvitiya elektro- i teplotekhnologii (XXI Benardosovskiye chteniya). *State and Prospects for the Development of Electrical and Thermal Technology (XXI Benardos Readings)*. Ivanovo, 2021. Vol. 3. P. 9–12. EDN: FWUTYG. (In Russ.).
13. Afanas'yev A. P., Grinkrug M. S., Tkacheva Yu. I. Opredeleniye mestopolozheniya transformatornykh podstantsiy v seti elektrosnabzheniya nizkogo napryazheniya s pomoshch'yu kumulyativnoy matritsy geodezicheskikh distantsiy [Finding coordinates of transformer substations in low voltage power supply network with the help of the cumulative matrix of geodesic distances] // *Elektrotehnika: Setevoy Elektronnyy Nauchnyy Zhurnal. Russian Internet Journal of Electrical Engineering*. 2014. Vol. 1, no. 2. P. 17–20. EDN: SYETKT. (In Russ.).
14. Khomchenko V. G., Zuga I. M., Kuzhel' A. N. Issledovaniye kachestvennykh pokazateley metodov trassirovki na osnove volnovogo algoritma i algoritma A' primenitel'no k promyshlennym predpriyatiyam [Qualitative research of routing methods based on wave algorithm and algorithm A' for industrial plants] // *Omskiy Nauchnyy Vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2018. No. 6 (162). P. 220–224. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-220-224. EDN: YSWONF. (In Russ.).
15. Zhila V. A., Klochko A. K., Markevich Yu. G. Nakhozhdeniye konfiguratsii gazoraspredeletel'nykh setey matematicheskimi metodami [Finding the configuration of gas distribution networks by mathematical methods] // *Internet-Vestnik VolgGASU. Russian Internet Journal of Electrical Engineering*. 2013. No. 1 (25). P. 1–4. EDN: RBBGHH. (In Russ.).
16. Novakovskiy B. A., Kargashin P. E., Karpachevskiy A. M. Geoinformatsionnyy analiz territorii dlya avtomatizirovannogo vybora trassy LEP [Gis-techniques application for automatic power line route selection] // *Geoinformatika. Geoinformatika*. 2017. No. 2. P. 30–38. EDN: ZRCUOB. (In Russ.).
17. Pravila ustroystva elektroustanovok [Rules for the installation of electrical installations]. Novosibirsk, 2005. 510 p. (In Russ.).
18. Rossiyskaya Federatsiya. Postanovleniye. O poryadke ustanovleniya okhrannykh zon ob'yektov elektrosetevogo khozyaystva i osobykh usloviy ispol'zovaniya zemel'nykh uchastkov, raspolozhennykh v granitsakh takikh zon: postanovleniye ot 24 fevralya 2009 g. No. 160 [Russian Federation. Resolution. On the procedure for establishing security zones of electric grid facilities and special conditions for the use of land plots located within the boundaries of such zones: Resolution of February 24, 2009 No. 160]. Available at «Consultant Plus» System. (In Russ.).
19. Kormen T. Kh., Leizeron C., Rivest R. [et al.]. Algoritmy: postroyeniye i analiz [Algorithms: construction and analysis]. Moscow, 2013. 1328 p. ISBN 978-5-8459-1794-2. (In Russ.).
20. GOST 32144-2013. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya [Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems]. Moscow, 2014. 19 p. (In Russ.).
21. Rossiyskaya Federatsiya. Prikaz. Ob utverzhenii ukрупnennykh normativov tseny tipovykh tekhnologicheskikh resheniy kapital'nogo stroitel'stva ob'yektov elektroenergetiki v chasti ob'yektov elektrosetevogo khozyaystva: prikaz ot 17 yanvarya 2019 g. No. 10 [Russian Federation. Order. On approval of consolidated price standards for standard technological solutions for capital construction of electric power facilities in terms of power grid facilities: order dated January 17, 2019 No. 10]. Available at «Consultant Plus» System. (In Russ.).

---

**TKACHENKO Vsevolod Andreevich**, Lecturer at the Polytechnic School, Yugra State University, Khanty-Mansiysk.

SPIN-code: 5200-0062

AuthorID (RSCI): 939477

ORCID: 0000-0002-7321-1162

AuthorID (SCOPUS): 57210291005

ResearcherID: W-3652-2019

Correspondence address: sevaatmail@gmail.com

#### For citations

Tkachenko V. A. Development of a method for determining the structure of mini-grid, taking into account optimal routes of power lines in an area with sharply heterogeneous landscape // *Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 4 (188). P. 109–116. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-109-116.

Received June 05, 2023.

© V. A. Tkachenko