

И. А. Кузьмина, ассистент, kuzminainna@yandex.ru,
Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, г. Москва

Проектирование оптимальной структуры распределительной сети энергоснабжения с учетом перспектив развития города

Представлены разработанные автором модели, методы и алгоритмы решения задачи перспективного развития городских распределительных сетей энергоснабжения; дано описание реализующего их программного комплекса ELNET. Приведены некоторые результаты расчета перспективного развития сети энергоснабжения, по размерам и параметрам близкой к энергосети района мегаполиса; доказана эффективность и работоспособность предложенных технических решений.

Ключевые слова: городская распределительная сеть энергоснабжения, перспективное развитие энергосети, модель энергосети, оптимизация, декомпозиция, редукция, кластеризация, эвристический алгоритм, генетический алгоритм, диаграмма Вороного

Введение

Городские распределительные сети энергоснабжения (далее — энергосети) являются сложной системой неоднородной структуры и представляют собой совокупность распределительных подстанций (РП) и трансформаторных подстанций (ТП), питающих и распределительных линий электропередачи, энергоприемников и охватывают всех потребителей города, включая промышленные предприятия, электрифицированный транспорт и т. д. [1]. Энергосети включают в себя узлы двух уровней напряжения — 10 и 0,4 кВ.

Масштаб и структура энергосети зависят от размера города, мощности и числа городских потребителей (коммунально-бытовых, промышленных, транспортных и пр.), их расположения на плане города. Энергосеть подвержена постоянным изменениям — строятся новые узлы сети, ликвидируются старые, подключаются новые потребители и изменяются нагрузки подключенных ранее потребителей, устаревшее электротехническое оборудование заменяется на новое и т. д. Современные темпы развития мегаполисов чрезвычайно высоки — за год энергосеть "разрастается" на 5...7 %, что соответствует подключению нескольких тысяч новых потребителей и строительству десятков и даже сотен новых ТП и РП [2].

Высокая плотность взаимозависимых узлов, быстрые темпы развития, а также необходимость учета большого числа различных критериев при выборе решения делают задачу проектирования энергосети оптимальной топологии многопараметрической, многокритериальной, многовариантной и трудно-преодолимой [3].

В литературе как отечественной, так и зарубежной предложены различные модели оптимизации энергосетей. Показано, что данную задачу можно решать как в непрерывной, так и в дискретной по-

становках [4]. Для решения этих задач используют различные алгоритмы и методы, такие как методы динамического программирования [5], метод ветвей и границ [6], эвристические алгоритмы [7], алгоритмы поиска с запретами [8], эволюционное моделирование [9, 10].

Большая часть литературы по электроснабжению городов включает в себя различные методики и требования к определению параметров разных элементов энергосети (номинального напряжения, сечения кабельных линий (КЛ), числа и мощности устанавливаемых на ТП трансформаторов и т. д.), а также вопросы оптимизации режимов работы, вопросы качества электроэнергии и надежности энергоснабжения [11–13]. В ряде работ также выполнен анализ схемы соединений, местоположений подстанций энергосети и т. д. [14].

Анализ имеющейся литературы по проектированию энергосетей показал наличие ряда следующих актуальных вопросов, требующих исследования.

1. Связанное решение всего комплекса вопросов задачи перспективного развития энергосетей (ПРЭ) описано лишь в нескольких трудах [например, 15]. В подавляющем числе работ рассматривается лишь один из аспектов проблемы (выбор мест строительства ТП, определение оптимального варианта распределения потребителей и т. д.).

2. Большая часть предложенных в литературе постановок задачи носит непрерывный характер (отсутствуют ограничения на местности). Такой подход может быть применен лишь в очень ограниченном числе случаев.

3. Как правило, задачу определения мест строительства ТП/РП ставят в контексте размещения единичной подстанции. Подходы к решению такой задачи не могут быть эффективно применены для размещения некоторого набора подстанций различных мощностей.

4. Приведенные затраты на строительство энергосетей, используемые в большинстве работ как критерии оценки оптимальности решения, не учитывают важные характеристики энергосети — надежность энергоснабжения и качество электроэнергии.

5. Предложенные математические модели преимущественно подразумевают строительство энергосети "с нуля" (т. е. не учитываются уже существующие объекты энергосети), что является неприемлемым в условиях современного уровня электрификации, когда все города России электрифицированы.

На основании вышеизложенного сделано заключение об актуальности исследования задачи ПРЭ.

1. Постановка задачи перспективного развития энергосети

В общем случае задача ПРЭ рассматривается как задача установления пути оптимального развития энергосети с точки зрения конфигурации, загрузки оборудования, нагрузок подстанций и т. д. [16]. Оптимальное развитие подразумевает обеспечение наилучших технико-экономических показателей энергосети. При этом энергосеть должна удовлетворять требованиям к надежности и качеству энергоснабжения, к воздействию на окружающую среду.

При решении задачи ПРЭ города рассматривают следующие основные вопросы [3]:

- выбор числа и местоположения РП;
- выбор числа и местоположения ТП, а также определение их мощности;
- выбор варианта подключения новых потребителей к энергосети, а также определение параметров возводимых кабельных линий (КЛ);
- определение варианта включения новых ТП в энергосеть.

Результатом решения задачи ПРЭ является нахождение такого варианта развития энергосети, при котором обеспечивается возможность надежного и высококачественного энергоснабжения всех намечаемых к присоединению и уже присоединенных потребителей электроэнергии при наименьших затратах на расширение энергосети и эксплуатационных расходов на ее обслуживание.

Исходными данными для задачи ПРЭ служат сведения об исходной структуре и параметрах энергосети, а также о подключаемой к ней нагрузке.

В рамках настоящей работы задача ПРЭ поставлена как детерминированная, т. е. спрогнозированную возросшую нагрузку на энергосеть считаем однозначно определенной в виде совокупности подключаемых потребителей.

Модель энергосети представляет собой совокупность объектов следующих типов:

- T — трансформаторная подстанция;
- R — распределительная подстанция;
- C — потребитель;
- L — кабельная линия.

Объекты каждого типа характеризуются набором параметров. Состав вектора параметров является расширяемым и содержит такие характеристики объектов энергосети, как географические координаты объектов, длина и сечение КЛ, запрашиваемая мощность потребителей и пр. Подробно модель энергосети представлена в работе [17].

Исходная энергосеть с подключенной нагрузкой (всеми присоединенными к ней потребителями) представляет собой направленный граф

$$G^{исх} = (R^{исх}, T^{исх}, L^{исх}),$$

где $R^{исх}$, $T^{исх}$, $L^{исх}$ — исходные множества узлов энергосети типа R , T и L соответственно. Элементы множества $T^{исх}$, $R^{исх}$ являются вершинами графа $G^{исх}$, элементы множества $L^{исх}$ соответствуют его дугам.

Совокупность всех подключаемых к энергосети потребителей определяет множество $C^{подкл} = CH^{подкл} \cup CL^{подкл}$, где $CH^{подкл}$, $CL^{подкл}$ — множества потребителей, подключаемых к энергосети на уровнях напряжения 10 и 0,4 кВ соответственно.

Пример фрагмента топологии энергосети представлен на рис. 1.

Вектор варьируемых параметров представлен в следующем виде:

$$X = (X_i, X_{1j}, X_{2j}, (x_k, y_k), X_{нов}^R, X_{нов}^T),$$

где X_i — неизвестный номер ТП/РП, к которой будет подключен потребитель C_j ; X_{1j}, X_{2j} — номера ТП/РП, к которым подключен ТП T_j ; (x_k, y_k) — географические координаты новой РП/ТП; $X_{нов}^R, X_{нов}^T$ — числа новых РП и ТП, строительство которых необходимо выполнить для подключения всех потребителей множества $C^{подкл}$ к энергосети.

Значения компонентов вектора варьируемых параметров X_i, X_{1j}, X_{2j} являются элементами дис-

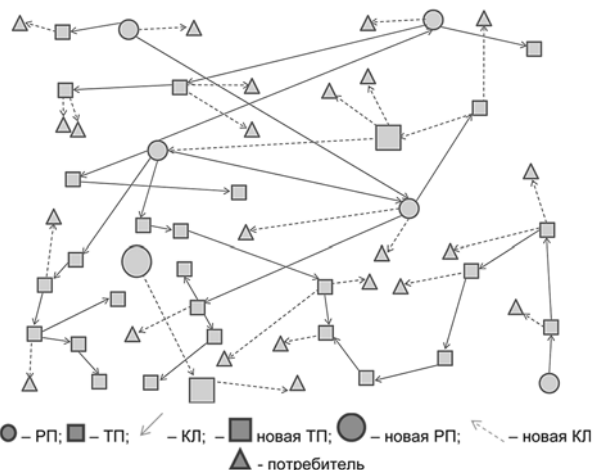


Рис. 1. Схема фрагмента энергосети с включенными в структуру энергосети потребителями, новыми ТП и РП

кретного множества уникальных номеров ТП и РП. Переменные $X_{\text{нов}}^R, X_{\text{нов}}^T$ — целочисленные. Координаты (x_k, y_k) выбирают из множества O — допустимых мест строительства новых РП/ТП.

На ряд параметров объектов типов R, T, L энергосети наложены базовые (обязательные) и пользовательские (дополнительные) ограничения типа равенств и неравенств, которые определяют базовую D_X и пользовательскую D_U области допустимых значений вектора варьируемых параметров.

Определены частные критерии оптимальности развития энергосети $Z(X) = (Z_1(X), Z_2(X), \dots, Z_z(X))$, на первые \tilde{z} которых наложены критериальные ограничения, формирующие одну область допустимых значений вектора варьируемых параметров D_Z . Задачу ПРЭ ставим в виде

$$Z(X^*) = \min_{X \in D} Z(X),$$

где X^* — оптимальные значения компонентов вектора варьируемых параметров; $D = D_X \cap D_U \cap D_Z$ — итоговое множество допустимых значений этого вектора.

2. Методы решения задачи ПРЭ

В статье приведены следующие разработанные автором методы решения задачи ПРЭ:

- метод редукции к совокупности вложенных задач глобальной минимизации (метод редукции);
- метод декомпозиции.

Метод редукции заключается в решении вместо исходной задачи совокупности трех вложенных подзадач глобальной оптимизации меньшей размерности.

- *Подзадача 1* подразумевает определение числа и мест строительства новых РП и ТП.
- *Подзадача 2* заключается в определении оптимального варианта подключения новых потребителей к энергосети.
- *Подзадача 3* позволяет определить варианты возможного подключения новых РП и ТП, "построенных" при решении подзадачи 1, к существующей энергосети.

Методу соответствует декомпозиция вектора X на три составляющие:

$$X = \{X^1, X^2, X^3\}. \quad (1)$$

Здесь $X^1 = \{(x_i, y_i), X_{\text{нов}}^R, X_{\text{нов}}^T\}$; $X^2 = \{X_{ij}\}$; $X^3 = \{X1_j, X2_j\}$.

Указанная декомпозиция вектора варьируемых параметров позволяет свести исходную задачу к задаче вида

$$\min_{X \in D} Z(X^*) = \min_{X^1 \in D} \min_{X^2 \in D(X^1)} \min_{X^3 \in D(X^1, X^2)} Z(X).$$

Здесь $Z(X)$ — скалярный критерий оптимальности, полученный из вектора $Z(X)$, например, методами свертывания частных критериев в скалярный;

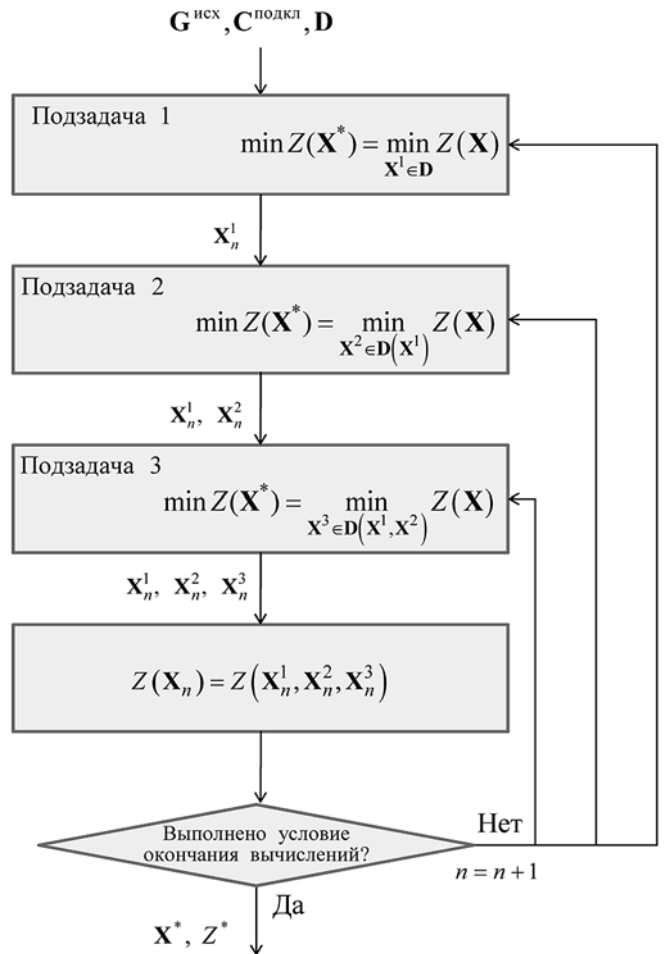


Рис. 2. Схема метода редукции

$D(X^1)$ — подобласть области допустимых значений вектора варьируемых параметров D при фиксированном векторе X^1 ; $D(X^1, X^2)$ — аналогичная подобласть D при фиксированных X^1 и X^2 .

Схема метода представлена на рис. 2. Здесь и далее n — номер итерации.

Методу декомпозиции соответствует аналогичное методу редукции представление вектора варьируемых параметров в виде (1). Для связи локальных подзадач 1–3 определен вектор координирующих параметров $S = S^{\text{lim}} \cup S^{\text{st}}$, где $S^{\text{lim}}, S^{\text{st}}$ — подвекторы параметров лимитирующей и стимулирующей координации соответственно.

При лимитировании координирующие параметры S^{lim} включаются в систему ограничений подзадач:

$$W_S(X, S^{\text{lim}}) = \{W_i(X, S^{\text{lim}}) \geq 0, i \in [1 \dots ws]\}. \quad (2)$$

Ограничения (2) задают область допустимых значений вектора варьируемых параметров $D_S = (X | W_S(X, S^{\text{lim}}) \geq 0)$.

Стимулирующая координация локальных задач проводится с помощью связующих параметров, которые входят в целевую функцию: $Z(X) \rightarrow Z(X, S^{\text{st}})$.

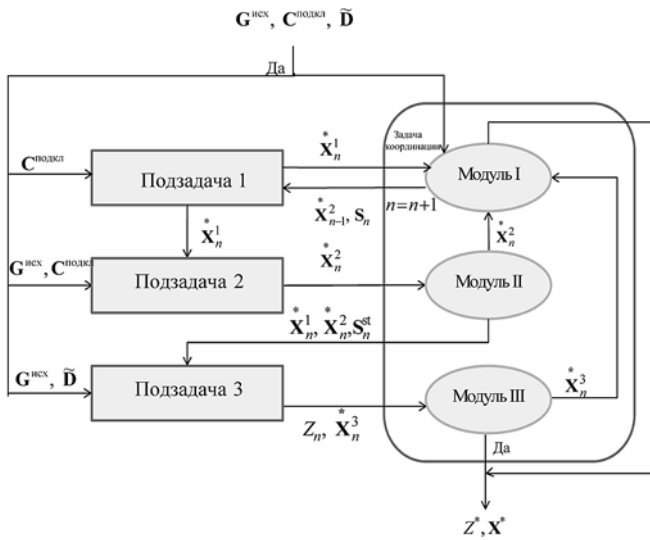


Рис. 3. Схема метода декомпозиции

С учетом векторов S^{lim} , S^{st} задачу ПРЭ можно представить в следующем виде

$$Z(X^*, S) = \min_{X \in D} Z(X, S^{\text{st}}), \tilde{D} = D_X \cap D_U \cap D_Z \cap D_S$$

Схема метода декомпозиции представлена на рис. 3.

3. Алгоритмы решения задачи ПРЭ

Алгоритмы решения подзадач 1 и 2 рассматриваются в части строительства ТП и подключения к ним потребителей на уровне 0,4 кВ. Данные алгоритмы также могут быть применены для решения аналогичных задач строительства РП и подключения к ним потребителей на уровне напряжения 10 кВ.

Подзадача 1.

Алгоритм на основе метода k-средних. Реализует кластеризационный метод k -средних, основной идеей которого является задание некоторого начального разбиения новых потребителей на кластеры с последующим изменением кластерных центров

(предполагаемых мест строительства РП/ТП) и перераспределением новых потребителей.

Алгоритм, реализующий метод разделительной кластеризации. В основу алгоритма положен иерархический метод кластеризации, достоинством которого, по сравнению с методом k -средних, является отсутствие необходимости задания числа кластеров. Основная идея алгоритма заключается в том, что на первом этапе решения задачи все новые потребители помещаются в один кластер, который в дальнейшем последовательно делится на подкластеры до выполнения условия окончания деления.

Эвристический алгоритм. Суть применяемого в нем подхода — последовательное выделение из множества подключаемых к энергосети новых потребителей групп, включающих в себя максимальное число потребителей, для которых может быть построена РП/ТП.

В качестве оценки эффективности алгоритмов использованы два индикатора: 1) число ТП, строительство которых необходимо выполнить $X_{\text{нов}}^T$; 2) время вычислений t . Эксперименты проводили посредством мультистарта 20 запусков программы.

Анализ результатов вычислительных экспериментов показывает, что среднее время решения задачи \tilde{t} алгоритмами k -средних и разделительной кластеризации более чем в 2 раза превышает время решения задачи эвристическим алгоритмом. При этом среднее число построенных ТП $\tilde{X}_{\text{нов}}^T$ при решении задачи эвристическим алгоритмом на 10 % меньше, чем при решении алгоритмом, реализующим метод k -средних, и на 20 % меньше, чем при решении задачи алгоритмом разделительной кластеризации (рис. 4, а).

Наилучший результат по индикатору $X_{\text{нов}}^T$ достигнут при решении задачи эвристическим алгоритмом и алгоритмом, реализующим метод k -средних. Наихудший результат по тому же индикатору получен при решении задачи алгоритмом, реализующим метод разделительной кластеризации.

Зависимости среднего времени вычислений \tilde{t} и среднего числа построенных объектов $\tilde{X}_{\text{нов}}^T$ от числа подключаемых к энергосети потребителей N приведены на рис. 4, б.

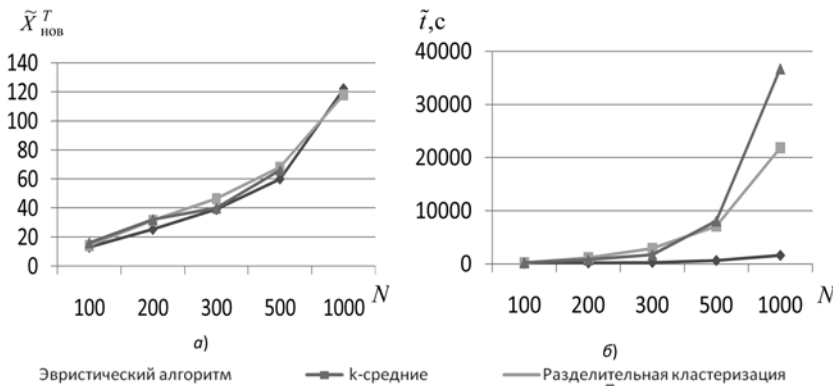


Рис. 4. Зависимость среднего числа построенных объектов $\tilde{X}_{\text{нов}}^T$ (а) и среднего времени вычислений \tilde{t} (б) от числа подключаемых потребителей N

Полученные результаты позволяют сделать вывод о значительном росте времени вычислений \tilde{t} алгоритма, построенного на основе метода k -средних, и алгоритма разделительной кластеризации с увеличением числа подключаемых потребителей. При этом все алгоритмы обеспечивают примерно одинаковые значения первого индикатора — количество построенных ТП $X_{\text{нов}}^T$.

Подзадача 2.

Эвристический алгоритм ограничен перебора. Основной принцип алгоритма — добавлять первый возможный вариант подключения потребителя

с сортировкой в порядке убывания стоимостей подключения. Данный алгоритм может быть отнесен к классу так называемых "жадных" алгоритмов решения оптимизационных задач.

Генетический алгоритм (ГА). Ставим в соответствие каждому подключаемому потребителю $CL_j^{\text{подкл}}$ один ген хромосомы. Значением гена (аллелью) является номер H_i РП/ТП, к которой будет подключен потребитель $CL_j^{\text{подкл}}$. Длина хромосомы равна числу элементов множества $CL^{\text{подкл}}$.

Алгоритм, основанный на построении диаграмм Вороного. Алгоритм сводится к последовательному построению диаграмм Вороного для всех ТП энергосети с последующими попытками подключения к ним всех потребителей, попавших в область ТП. На последующих этапах построения диаграмм Вороного из рассмотрения исключаются ТП, подключение потребителей к которым не представляется возможным.

Анализ эффективности алгоритмов выполнен на основании двух индикаторов качества — суммарной стоимости построенных КЛ d^{sum} и времени выполнения расчетов t . Эксперименты выполнялись посредством мультистарта 20 запусков программы. Некоторые результаты вычислительных экспериментов представлены на рис. 5.

Анализ результатов вычислений показывает, что лучшие значения по индикатору d^{sum} получены при решении тестовых задач эвристическим алгоритмом ограниченного перебора и алгоритмом, основанном на построении диаграмм Вороного. Решение задачи генетическим алгоритмом в среднем на 12,5 % хуже лучшего значения для тестовой задачи.

При увеличении числа подключаемых потребителей описанные выше тенденции сохраняются.

Подзадача 3.

Решение подзадачи 3 проводится с применением ГА. Для этого каждой новой ТП $T_i^{\text{НОВ}}$ ставятся в соответствие два гена хромосомы: первый ген соответствует ТП/РП, от которой в i -ю ТП производится подача электроэнергии; второй ген — ТП/РП, куда передается электроэнергия от ТП $T_i^{\text{НОВ}}$. Значением гена (аллелью) является номер ТП/РП H_j , к которой будет подключена ТП $T_i^{\text{НОВ}}$. Длина хромосомы равна $2tn$, где tn — число новых ТП.

Выполненные автором вычислительные эксперименты подтвердили возможность применения разработанного алгоритма для решения практически значимых задач.

4. Программный комплекс ELNET

Программный комплекс (ПК) ELNET предназначен для выполнения автоматизированного про-

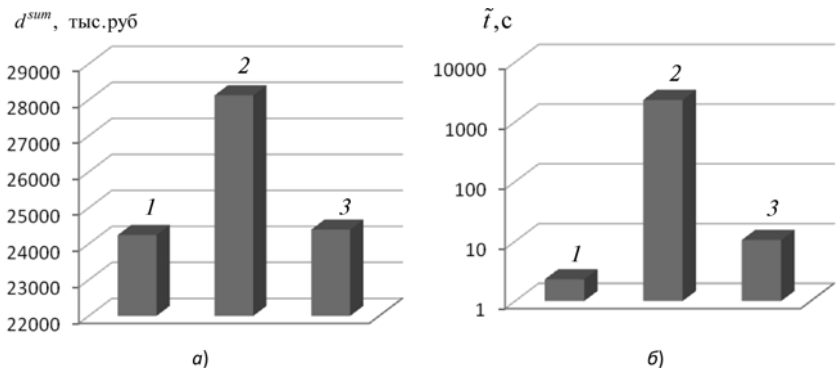


Рис. 5. Сравнительный анализ средней стоимости строительства КЛ \tilde{d}^{sum} (а) и среднего времени выполнения алгоритмов \tilde{t} (б): 1 — эвристический алгоритм; 2 — генетический алгоритм; 3 — алгоритм, основанный на построении диаграмм Вороного

ектирования энергосети с учетом перспектив развития города.

ПК ELNET выполняет следующие функции:

- определение варианта подключения новых потребителей к энергосети;
- определение числа и мест строительства новых ТП и РП, выбор типа подстанций и их характеристик;
- определение конфигурации энергосети 10 кВ. Основная экранная форма ПК приведена на рис. 6.

ПК ELNET состоит из шести перечисленных ниже модулей.

- **Графический модуль** реализует оконный интерфейс взаимодействия "пользователь — система". Модуль также отвечает за визуализацию схемы энергосети.
- **Модуль управления (диспетчер)** предназначен для организации взаимодействия всех модулей системы между собой.
- **Модуль ввода/вывода данных** выполняет функции считывания и временного хранения сведений об энергосети.

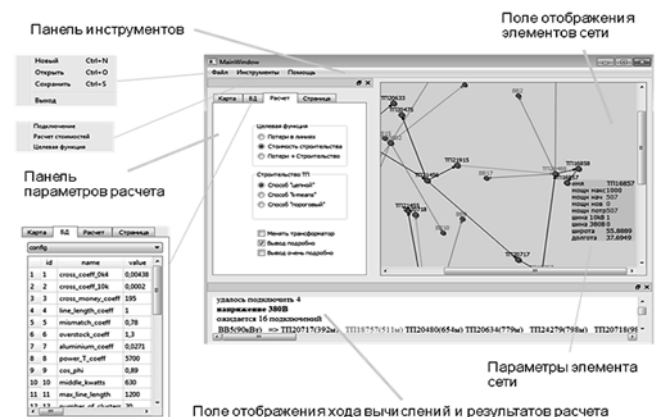


Рис. 6. Графический интерфейс ПК ELNET

- *Модуль решений подзадач* — это основной вычислительный модуль ПК ELNET, реализующий методы и алгоритмы решения задачи ПРЭ.
- *Модуль расчета параметров энергосети* предназначен для расчета параметров энергосети, проверки условий выполнения ограничений, расчета значений критериев оптимальности и т. п.
- *База справочных данных* содержит сведения, необходимые для расчета режимов энергосетей, а также параметры методов и алгоритмов решения.

5. Расчет перспективного развития энергосети района мегаполиса

Для оценки работоспособности и эффективности разработанных моделей, методов, алгоритмов и их программных реализаций автором поставлена и решена задача ПРЭ района города площадью около 27 км² и населением ~420 000 жителей. Существующая энергосеть района состоит из 393 ТП и 47 РП. Предполагается подключение к энергосети 1719 новых потребителей суммарной мощностью более 47 тыс. кВт, 93 из которых — на уровне напряжения 10 кВ; 1626 — на уровне напряжения 0,4 кВ. Предполагается наличие 2000 мест возможного строительства новых ТП/РП.

При решении задачи учитывались следующие ограничения: отсутствие перегрузки ТП и РП; отсутствие перегрузки КЛ; однонаправленность КЛ; наличие свободных мест присоединения в ТП и РП; длина КЛ менее максимально допустимого значения.

Рассмотрены пять следующих экономических критериев:

- стоимость подключения новых потребителей к энергосети;
- стоимость подключения новой ТП к энергосети;
- стоимость строительства новых ТП и РП;
- потери электрической энергии в КЛ 0,4 и 10 кВ, проложенных от ТП до новых потребителей;
- потери электрической энергии в трансформаторах.

Решение задачи ПРЭ проведено методами редукции и декомпозиции. На рис. 7 приведены некоторые результаты выполненных расчетов.

Минимальное значение целевой функции достигнуто при решении задачи методом редукции.

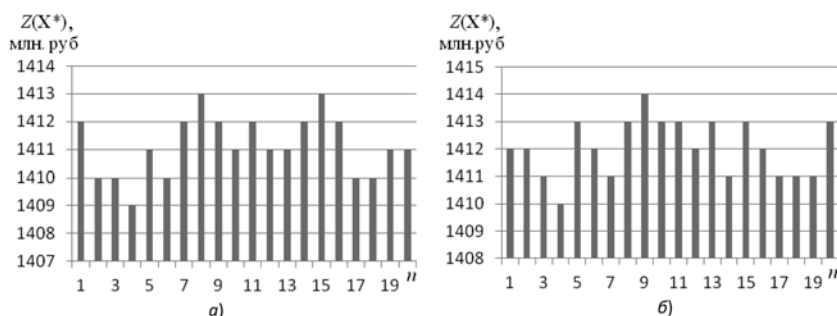


Рис. 7. Результаты решения задачи методами редукции (а) и декомпозиции (б)

При этом методом декомпозиции достигались значения целевой функции, близкие к минимальному. Среднее время решения задачи за одну итерацию равно 459 с для метода редукции и 875 с для метода декомпозиции.

Из результатов решения следует, что для обеспечения электроэнергией всех подключаемых к энергосети потребителей требуется построить 128 ТП и 3 РП, проложить 19 453 м КЛ. Анализ полученных данных показал, что оба метода позволяют находить допустимые варианты решения задачи ПРЭ за приемлемое время.

Заключение

В работе представлены разработанные автором модели, методы и алгоритмы, позволяющие выполнять решение всего комплекса вопросов, входящих в состав задачи ПРЭ. Предложенные технические решения позволяют учитывать ограничения на местности, проводить расчеты с учетом различных произвольных составов критериев оптимальности и ограничений, а также все значительные особенности решения задачи ПРЭ.

В работе также приведено описание разработанного на основании предложенных технических решений программного комплекса автоматизированного решения задачи ПРЭ ELNET.

Описанные в работе результаты экспериментов, выполненных в ПК ELNET, показали эффективность предложенных моделей, методов и алгоритмов и возможность их применения для решения практически значимых задач.

Автор выражает благодарность своему научному руководителю д-ру физ.-мат. наук, профессору А. П. Карпенко за существенный вклад в постановку и решение задачи исследования, а также всестороннюю поддержку и внимание к работе.

Список литературы

1. **Справочник** по проектированию электрических сетей / Под ред. Д. Л. Файбисовича. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Издательство НЦЭНАО, 2006. 349 с.
2. **Пообъектная** информация по заключенным МКС — филиалом ОАО "МОЭСК" договорам технологического присоединения в г. Москве за 2014 г. URL: http://www.moesk.ru/client/raskritie_informacii/zayavki/#tab-ras_inf_2014-link.
3. **Ананicheva С. С., Калинин М. А.** Практические задачи электрических сетей: учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2012. 112 с.
4. **Веников В. А.** Электрические системы. Электрические сети. М.: Высшая школа, 1998. 511 с.
5. **Дале В. А., Кришан З. П., Паэтле О. Г.** Динамическая оптимизация развития электрических сетей. Рига: Зинатне, 1990. 248 с.
6. **Miguez E., Cidras J., Diaz-Dorado E., Garcia-Dornelas J. L.** An improve branch exchange algorithm for large scale distribution network planning // IEEE Trans. Power Syst., 2002. Vol. 17, N. 4. P. 931—936.
7. **Свеженцева О. В.** Эвристические алгоритмы закрепления множества потребителей за источниками питания // Труды Всероссийской на-

учно-практической конференции "Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири". Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2009. С. 397—402.

8. **Ramirez-Rosado I. J., Dominguez-Navarro J. A.** New multi objective tabu search algorithm for fuzzy optimal planning of distribution systems // *IEEE Trans. Power Systems*. 2006. Vol. 21, N. 1. P. 224—233.

9. **Diaz-Dorado E., Cidras E. J., Miguez E.** Planning of large rural low voltage networks using evolution strategies // *IEEE Trans. Power Syst.* 2003. Vol. 18, N. 4. P. 1594—1600.

10. **Свеженцева О. В., Воропай Н. И.** Оптимизация размещения источников питания при формировании рациональной конфигурации системы электроснабжения // *Электричество*. 2012. № 10. С. 7—14.

11. **Булатов Б. Г.** САПР и модели оптимального развития энергосистем: конспект лекций. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. 69 с.

12. **Радкевич В. Н.** Проектирование систем энергоснабжения: учеб. пособие. Минск: НПО "ПИОН", 2001. 292 с.

13. **Маньков В. Д.** Основы проектирования систем энергоснабжения: справочное пособие. СПб.: НОУ ДПО "УМИТЦ "ЭлектроСервис", 2010. 664 с.

14. **Свеженцева О. В.** Методы и алгоритмы обоснования рациональной конфигурации систем электроснабжения: дис. ... канд. техн. наук. Иркутск, НИИГТУ, 2012.

15. **Киселев А. Н.** Технико-экономический анализ городских распределительных электрических сетей с учетом их развития: дис. ... канд. техн. наук. М., МЭИ, 2002.

16. **Фадеева Г. А., Федин В. Т.** Проектирование распределительных электрических сетей. Минск: Высшая школа, 2009. 368 с.

17. **Карпенко А. П., Кузьмина И. А.** Математическая модель распределительной городской сети энергоснабжения с учетом ее перспективного развития // *Наука и образование*. 2014. № 5. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/709781.html>.

I. A. Kuzmina, Assistant, kuzminainna@yandex.ru,
Moscow State Technical University named after the Bauman

The Optimal Struct of Urban Distributing Power Network Development with Long-Term City Future Development

In this paper the author made models, methods and algorithms for optimal struct of urban distributing power network development with long term city future development problem solution are given.

In this work, the urban distributing power network model is a directed graph. The model is expandable and includes all power network elements (transformer substation, distribution substation, cable line, power consumers) parameters needed for solving the problem.

The optimal struct of urban distributing power network development with long-term city future development problem state like deterministic, multivariable, multicriterial optimization task. Two methods of solving posed problem — decomposition method and reduction method — are given. Both of this methods, propose splitting the problem into three tasks. Author made algorithms of solving this tasks based on clustering methods, heuristic algorithm, genetic algorithm, Voronoy diagram etc.

Software system ELNET, which realize this models, methods and algorithms also presented.

Some results of made distributing power network development calculations provided. This calculations analysis showed, that author made models, methods, algorithms and software system may effectively used for optimal struct of urban distributing power network development with long-term city future development problem solution.

Keywords: urban distributing power network, long-term power network development, urban power network model, optimization, decomposition, reduction, clustering, heuristic algorithm, genetic algorithm, Voronoy diagram

References

1. **Spravochnik** po proektirovaniyu jelektricheskikh setej, Ed. D. L. Fajbisovich. Ed. 2. Moscow, Izdatel'stvo NCJeNAO, 2006, 349 p. (in Russian).

2. **Пооб#ектнаja** informacija po zakljuchennym MKS — filialom OAO "MOJeSK" dogovorom tehnologicheskogo prisoedinenija v c Moskve za 2014 g. URL: http://www.moesk.ru/client/raskritie_informacii/zayavki/#tab-ras_inf_2014-link (in Russian).

3. **Ananicheva S. S., Kalinkina M. A.** Prakticheskie zadachi jelektricheskikh setej: Uc. pos. Ekaterinburg, UrFU, 2012, 112 p. (in Russian).

4. **Venikov V. A.** Jelektricheskie sistemy. Jelektricheskie seti. Moscow, Vysshaja shkola, 1998. 511 p. (in Russian).

5. **Dale V. A., Krishan Z. P., Pajetle O. G.** Dinamicheskaja optimizacija razvitiya jelektricheskikh setej. Riga: Zinatne, 1990, 248 p. (in Russian).

6. **Miguez E., Cidras J., Diaz-Dorado E., Garcia-Dornelas J. L.** An improve branch exchange algorithm for large scale distribution network planning. *IEEE Trans. Power Syst.*, 2002, vol. 17, no. 4, pp. 931—936.

7. **Svezhenceva O. V.** Jevristicheskie algoritmy zakreplenija mnozhestva potrebitelej za istochnikami pitanija. *Vseross. nauch.-prakt. konf. "Povyshenie jeffektivnosti proizvodstva i ispol'zovanija jenerгии v uslovijah Sibiri"*, Irkutsk, IrGTU, 2009, pp. 397—402.

8. **Ramirez-Rosado I. J., Dominguez-Navarro J. A.** New multi objective tabu search algorithm for fuzzy optimal planning of distri-

bution systems, *IEEE Trans. Power Systems*, 2006, vol. 21, no. 1, pp. 224—233.

9. **Diaz-Dorado E., Cidras E. J., Miguez E.** Planning of large rural low voltage networks using evolution strategies. *IEEE Trans. Power Syst.*, 2003, vol. 18, no. 4, pp. 1594—1600.

10. **Svezhenceva O. V., Voropaj N. I.** Optimizacija razmeshhenija istochnikov pitanija pri formirovanii racional'noj konfiguracii sistemy jelectrosnabzhenija, *Jelektrichestvo*, 2012, no. 10, pp. 7—14 (in Russian).

11. **Bulatov B. G.** *SAPR i modeli optimal'nogo razvitiya jenergosistem, konspekt lekcij*, Cheljabinsk, JuUrGU, 2005, 69 p. (in Russian).

12. **Radkevich V. N.** *Proektirovanie sistem jenergosnabzhenija, uchebnoe posobie*, Minsk, NPOOO "PION", 2001, 292 p. (in Russian).

13. **Man'kov V. D.** *Osnovy proektirovanija sistem jenergosnabzhenija, spravochnoe posobie*, Saint Petersburg, NOU DPO "UMITC "Jelektro Servis", 2010, 664 p. (in Russian).

14. **Svezhenceva O. V.** *Metody i algoritmy obosnovanija racional'noj konfiguracii sistem jelektricheskikh setej*, dis. ... kand. teh. nauk, Irkutsk, NIIGTU, 2012 (in Russian).

15. **Kiselev A. N.** *Tehniko-jekonomicheskij analiz gorodskih raspredelitel'nyh jelektricheskikh setej s uchetom ih razvitiya*, dis. ... kand. teh. nauk, Moscow, MJeI, 2002 (in Russian).

16. **Fadeeva G. A., Fedin V. T.** *Proektirovanie raspredelitel'nyh jelektricheskikh setej*, Minsk, Vysshaja shkola, 2009, 368 p. (in Russian).

17. **Karpenko A. P., Kuz'mina I. A.** Математическая модель распределительной городской сети энергоснабжения с учетом ее перспективного развития, *Наука и образование*, 2014, no. 5, URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/709781.html>.