

Кузьмина Инна Анатольевна

**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ,
ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ ДЛЯ
СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА
ЭЛЕКТРОСЕТИ МЕГАПОЛИСА С УЧЕТОМ ЕГО
ПЕРСПЕКТИВНОГО РАЗВИТИЯ**

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Московском государственном техническом
университете имени Н. Э. Баумана
(национальном исследовательском университете)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, доцент,
Карпенко Анатолий Павлович

**Официальные
оппоненты:**

Ведущая организация:

Защита состоится ... 2017 г. в ... часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д212.141.15 при Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: Москва, ул. 2-я Бауманская, д.5, стр. 1, зал заседания Ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться на сайте www.bmstu.ru и в библиотеке Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана.

Автореферат разослан «...» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук,
доцент

Аттетков
Александр
Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Распределительная сеть энергоснабжения мегаполиса (далее – электросеть мегаполиса) является сложной системой неоднородной структуры и представляет собой совокупность распределительных подстанций (РП) и трансформаторных подстанций (ТП), питающих и распределительных линий электропередач, а также электроприемников. Под мегаполисом понимаются города, население которых превосходит 1 млн. человек. Электросеть мегаполиса включает в себя тысячи подстанций (РП и ТП) и охватывает всех потребителей города, включая промышленные предприятия, электрифицированный транспорт и т. д. Она включает в себя узлы двух уровней напряжения – 10 кВ и 0,4 кВ.

Основоположником теории оптимального проектирования электросетей считается В. М. Хрущов. В дальнейшем эта теория развивалась такими российскими учеными-энергетиками, как Л. А. Акишин, Д. А. Арзамасцев, В. А. Веников, А. А. Глазунов, И. Г. Гордиевский, А. Д. Григорьева, В. А. Дале, А. Н. Зейлигер, З. П. Кришан, О. Г. Паэгле, А. Н. Зейлигер, В. И. Идельчик, В. А. Козлов, А. И. Лазебник, В. Д. Лордкипанидзе, Л. П. Падалко и многими другими. Из зарубежных авторов следует отметить Н. L. Willis, K. Nara, S. K. Khator, T. Gonen, E. Diaz-Dorado, I. J. Ramirez-Rosado.

Высокая плотность взаимозависимых узлов электросети мегаполиса, высокие темпы ее развития, а также необходимость учета большого числа различных критериев при ее синтезе делают задачу проектирования электросети мегаполиса многопараметрической (более 3000 – 5000 варьируемых параметров), многокритериальной, многовариантной (около $2^{3000} - 2^{5000}$ вариантов) и имеющей высокую вычислительную сложность.

В трудах отечественных и зарубежных авторов предложены различные модели оптимизации электросетей. Показано, что данная задача может решаться как в непрерывной, так и в дискретной постановках. Для решения задачи используются различные методы и алгоритмы – методы динамического, целочисленного и линейного программирования, метод ветвей и границ, методы целочисленного программирования, алгоритмы оптимизации на графах, методы генетического поиска.

Выполненный в диссертации анализ имеющейся литературы по проектированию электросетей мегаполисов с учетом их перспективного развития показал наличие ряда актуальных вопросов, требующих дальнейшего исследования.

1. Комплексное решение вопросов перспективного развития электросети мегаполиса (ПРЭ мегаполиса) рассмотрено лишь в нескольких работах. При этом в большинстве случаев рассматривается лишь один из аспектов задачи – выбор мест строительства ТП, определение оптимального варианта распределения потребителей и т. д.

2. В большей части предложенных в литературе постановок задачи ПРЭ мегаполиса отсутствуют ограничения на размещение РП и ТП на местности.

Такой подход может быть применен лишь в очень ограниченном числе случаев.

3. Как правило, задачу определения мест строительства РП/ТП ставят в контексте размещения единичной подстанции. Соответствующие методы и алгоритмы не могут быть эффективно применены для размещения набора подстанций различных мощностей.

4. Приведенные затраты на строительство электросети, используемые в большинстве работ как критерий оценки эффективности решения, не учитывают важные характеристики сети, например, надежность электроснабжения.

5. Известные подходы к решению задачи ПРЭ преимущественно подразумевают строительство электро без учета существующих РП и ТП, предполагая возведение новых подстанций для обеспечения электроснабжения новых потребителей.

На этом основании сделано заключение об актуальности исследования задачи ПРЭ.

Целями работы являются снижение затрат на строительство и эксплуатацию электросети мегаполиса, увеличение скорости проектирования и повышение качества принимаемых проектных решений.

Задачи исследования.

1. Построение комплексной расширяемой математической модели электросети мегаполиса, позволяющей учитывать топологию сети, географическую привязку объектов на местности, а также включающую в себя все необходимые для решения задачи ПРЭ мегаполиса технико-экономические параметры элементов сети.

2. Постановка задачи оптимизации ПРЭ мегаполиса как задачи ее структурно-параметрического синтеза с учетом существующей структуры электросети мегаполиса и ограничений на расположение объектов на местности.

3. Разработка методов и алгоритмов отыскания оптимального решения поставленной задачи ПРЭ, позволяющих осуществлять выбор числа и мест строительства новых подстанций, определение оптимального варианта распределения новых потребителей по подстанциям, определение варианта включения новых подстанций в существующую структуру электросети мегаполиса.

4. Создание расширяемого интерактивного программного комплекса (ИПК), реализующего разработанные модели, методы и алгоритмы.

Методы исследования. При разработке математических моделей, методов и алгоритмов использовались методы системного анализа, многокритериальной оптимизации, комбинаторного анализа, дискретного программирования, генетического поиска и вычислительной геометрии.

Научная новизна. В диссертации получены следующие новые научные результаты, выносимые на защиту:

1. Разработка математической модели электросети мегаполиса, особенностями которой является учет перспектив развития города.

2. Разработка новых методов решения задачи перспективного развития электросети мегаполиса, основанных на декомпозиции и редукции, особенностями которых являются схема разбиения задачи на три подзадачи, а также способы координации этих подзадач.

3. Разработка, реализация и исследование эффективности численных методов и алгоритмов решения задачи перспективного развития электросети мегаполиса в рамках оригинального проблемно-ориентированного программного комплекса ELNET.

Теоретическая и практическая значимость результатов работы заключается в следующем.

1. Разработанное на основе предложенных моделей, методов и алгоритмов программное обеспечение позволяет:

- снизить затраты на строительство и эксплуатацию электросети мегаполиса за счет оптимизации ее топологии;
- повысить надежность функционирования электросети мегаполиса;
- сократить трудозатраты и сроки проектирования электросети мегаполиса.

2. Результаты работы использованы в Московских кабельных сетях – филиале ОАО «Московская объединенная электросетевая компания».

Достоверность и обоснованность полученных в диссертации научных результатов обеспечивается строгостью используемого математического аппарата и подтверждены проведенными вычислительными экспериментами.

Апробация работы. Основные результаты и положения диссертационной работы были представлены и прошли апробацию на шести конференциях: Молодежные международные научно-технические конференции «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы» (Москва, 2009, 2010, 2011 и 2014); XV Всероссийская конференция молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям, (Тюмень, 2014); IWMMA'15 4th International Workshop on Mathematical Models and their Applications (Krasnoyarsk, 2015); Международная научно-практическая конференция Инфорينو-2016, НИУ МЭИ (Москва, 2016).

Публикации. Основные результаты диссертации отражены в 11 научных работах, из них 8 – в журналах, входящих в Перечень российских рецензируемых научных журналов и изданий.

Личный вклад автора. Все исследования, результаты которых изложены в диссертационной работе, проведены лично соискателем в процессе научной деятельности. Из совместных публикаций в диссертацию включен лишь тот материал, который непосредственно принадлежит соискателю; заимствованный материал обозначен в работе ссылками.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка используемой литературы и 3 приложений. Общий объем диссертации составляет 217 страниц машинописного текста, в том числе 163 страницы основного текста, 54 страниц приложений.

Диссертации содержит 49 рисунков, 23 таблиц. Список используемой литературы состоит из 109 источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **ГЛАВЕ 1** рассмотрены основные характеристики, параметры и структура электросети мегаполиса.

Задача ПРЭ рассматривается как задача установления пути оптимального развития электросети мегаполиса с точки зрения конфигурации, загрузки оборудования, нагрузок подстанций и т. д. Оптимальное развитие подразумевает обеспечение наилучших технико-экономических показателей электросети мегаполиса. При этом электросеть мегаполиса должна удовлетворять требованиям к надежности, уровню воздействию на окружающую среду.

При решении задачи ПРЭ города рассматриваются следующие основные вопросы:

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

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

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

В работе задача ПРЭ поставлена как детерминированная, то есть спрогнозированная возросшая нагрузка на электросеть мегаполиса полагается однозначно определенной в виде совокупности подключаемых потребителей.

Рассмотрен опыт проектирования электросетей мегаполисов в России и за рубежом (США, Великобритания, Швейцария, Испания, Китай), выполнен аналитический обзор программных комплексов, применяемых в настоящее время при проектировании электросетей (EnergyCSLine, Model Studio CS и др.).

В **ГЛАВЕ 2** предложена математическая модель топологии электросети мегаполиса в виде направленного взвешанного графа. На основании этой модели поставлена задача ПРЭ: определен вектор варьируемых параметров и задана область его допустимых значений; сформулированы критерии оптимальности.

Электросеть мегаполиса 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 электросети мегаполиса, как их географические координаты, длина и сечение КЛ, запрашиваемая мощность потребителей и прочее.

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

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

где $\mathbf{R}^{\text{исх}}$, $\mathbf{T}^{\text{исх}}$, $\mathbf{L}^{\text{исх}}$ – исходные множества узлов электросети мегаполиса типа R , T и L соответственно. Элементы множества $\mathbf{T}^{\text{исх}}$, $\mathbf{R}^{\text{исх}}$ являются вершинами графа, элементы множества $\mathbf{L}^{\text{исх}}$ соответствуют его дугам.

Совокупность всех подключаемых к электросети мегаполиса потребителей определяет множество $\mathbf{C}^{\text{подкл}} = \mathbf{C}\mathbf{H}^{\text{подкл}} \cup \mathbf{C}\mathbf{L}^{\text{подкл}}$, где $\mathbf{C}\mathbf{H}^{\text{подкл}}$, $\mathbf{C}\mathbf{L}^{\text{подкл}}$ – множества потребителей, подключаемых к электросети мегаполиса на уровнях напряжения 10 кВ и 0,4 кВ соответственно.

Пример фрагмента топологии электросети мегаполиса представлен на Рис. 1.

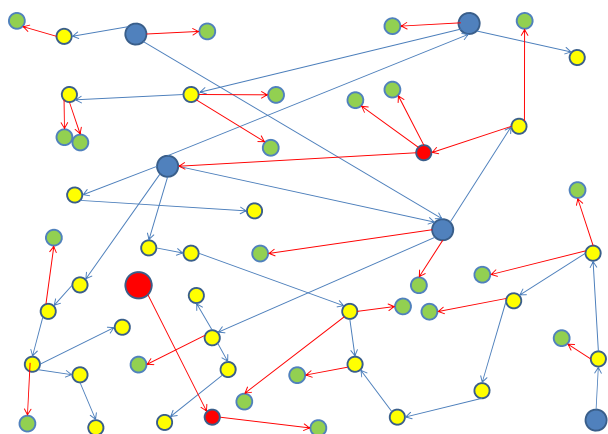


Рис. 1. Пример фрагмента топологии электросети мегаполиса с включенными в структуру электросети потребителями и новыми РП и ТП

● – РП; ● – ТП; ← – КЛ; ● – новая ТП; ● – новая РП; ← – новая КЛ

Вектор варьируемых параметров задачи ПРЭ представлен в виде

$$\mathbf{X} = (X_i, X1_j, X2_j, (x_k, y_k), X_{\text{нов}}^R, X_{\text{нов}}^T),$$

где X_i – неизвестный номер РП/ТП, к которой будет произведено подключение потребителя C_i ; $X1_j$, $X2_j$ – номера РП/ТП, к которым произведено подключение ТП T_j ; $(x_k; y_k)$ – географические координаты новой РП/ТП; $X_{\text{нов}}^R$, $X_{\text{нов}}^T$ – числа новых РП и ТП, строительство которых необходимо произвести для подключения всех потребителей множества $\mathbf{C}^{\text{подкл}}$ к электросети мегаполиса.

Значения компонентов вектора варьируемых параметров $X_i, X1_j, X2_j$ являются элементами дискретного множества уникальных номеров РП и ТП; координаты (x_k, y_k) выбираются из конечного набора значений возможных мест строительства новых ТП/РП. Переменные $X_{\text{нов}}^R, X_{\text{нов}}^T$ являются целочисленными. Таким образом, задача относится к классу задач дискретного программирования.

Задача ПРЭ относится к классу задач структурно-параметрического синтеза. Задача отличается большой размерностью: так, при проектировании электросети района мегаполиса размерность вектора \mathbf{X} может достигать 3000-5000. В случае, если каждый элемент вектора может принимать одно из двух возможных значений, число вариантов решения задачи составит $2^{3000} - 2^{5000}$. Таким образом, решение указанной задачи полным перебором не представляется возможным и требует разработки эффективных приближенных методов ее решения.

На ряд параметров объектов электросети мегаполиса типов R, T, L 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 электросети мегаполиса $\mathbf{Z}(\mathbf{X}) = (Z_1(\mathbf{X}), Z_2(\mathbf{X}), \dots, Z_{|Z|}(\mathbf{X}))$, на первые $|\bar{Z}|$ которых наложены критериальные ограничения, формирующие область допустимых значений вектора варьируемых параметров D_Z .

Задачу ПРЭ ставим в виде

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

где \mathbf{X}^* – оптимальные значения компонентов вектора варьируемых параметров; $\mathbf{D} = \mathbf{D}_X \cap \mathbf{D}_U \cap \mathbf{D}_Z$ – итоговое множество допустимых значений этого вектора.

В ГЛАВЕ 3 предложено два метода решения поставленной задачи ПРЭ:

- метод редукции задачи ПРЭ к совокупности вложенных подзадач глобальной минимизации (метод редукции);
- метод декомпозиции задачи ПРЭ (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 электросети мегаполиса.

- *Подзадача 3* позволяет определить варианты возможного подключения новых РП и ТП, «построенных» при решении подзадачи 1, к существующей электросети мегаполиса.

Метод является итерационным строго иерархическим. Ему соответствует декомпозиция вектора \mathbf{X} на три составляющие:

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

Здесь $\mathbf{X}^1 = \{ (x_i, y_i), X_{\text{НОВ}}^R, X_{\text{НОВ}}^T \}$; $\mathbf{X}^2 = \{ X_i \}$; $\mathbf{X}^3 = \{ X1_i, X2_i \}$.

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

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

Здесь $\mathbf{D}(\mathbf{X}^1)$ – подобласть области допустимых значений вектора варьируемых параметров \mathbf{D} при фиксированном векторе \mathbf{X}^1 ; $\mathbf{D}(\mathbf{X}^1, \mathbf{X}^2)$ – аналогичная подобласть \mathbf{D} при фиксированных \mathbf{X}^1 и \mathbf{X}^2 .

Схема метода представлена на Рис. 2. Здесь и далее n – номер итерации.

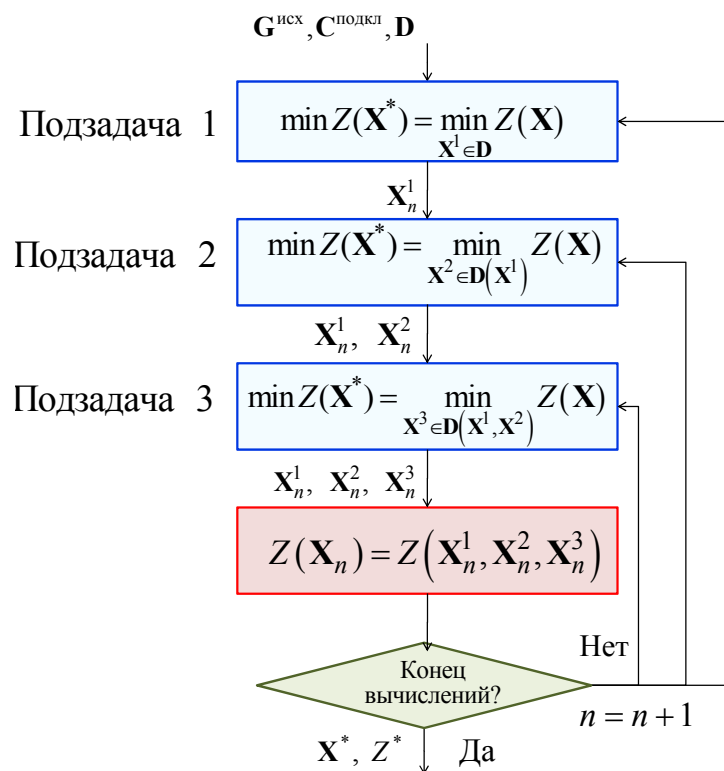


Рис. 2. Схема метода редукции

Методу декомпозиции соответствует аналогичное методу редукции представление вектора варьируемых параметров в виде (2). Метод также является итерационным строго иерархическим. Для связи локальных подзадач 1–3 определяем вектор координирующих параметров $\mathbf{S} = \mathbf{S}^{\text{lim}} \cup \mathbf{S}^{\text{st}}$, где \mathbf{S}^{lim} ,

\mathbf{S}^{st} – подвекторы параметров лимитирующей и стимулирующей координации соответственно.

При лимитировании координирующие параметры \mathbf{S}^{lim} включаем в систему ограничений подзадач:

$$\mathbf{W}_S(\mathbf{X}, \mathbf{S}^{lim}) = \{ W_i(\mathbf{X}, \mathbf{S}^{lim}) \geq 0, \quad i \in [1 \dots |\mathbf{W}_S|] \}. \quad (3)$$

Ограничения (3) задают область допустимых значений вектора варьируемых параметров $\mathbf{D}_S = \{ \mathbf{X} \mid \mathbf{W}_S(\mathbf{X}, \mathbf{S}^{lim}) \geq 0 \}$.

Стимулирующая координация локальных задач производится при помощи связующих параметров, которые вводят в целевую функцию: $Z(\mathbf{X}) \rightarrow Z(\mathbf{X}, \mathbf{S}^{st})$.

С учетом векторов \mathbf{S}^{lim} , \mathbf{S}^{st} задачу ПРЭ ставим в виде

$$Z(\mathbf{X}^*, \mathbf{S}) = \min_{\mathbf{X} \in \tilde{\mathbf{D}}} Z(\mathbf{X}, \mathbf{S}^{st}), \quad \tilde{\mathbf{D}} = \mathbf{D}_X \cap \mathbf{D}_U \cap \mathbf{D}_Z \cap \mathbf{D}_S.$$

Схема метода декомпозиции представлена на Рис. 3.

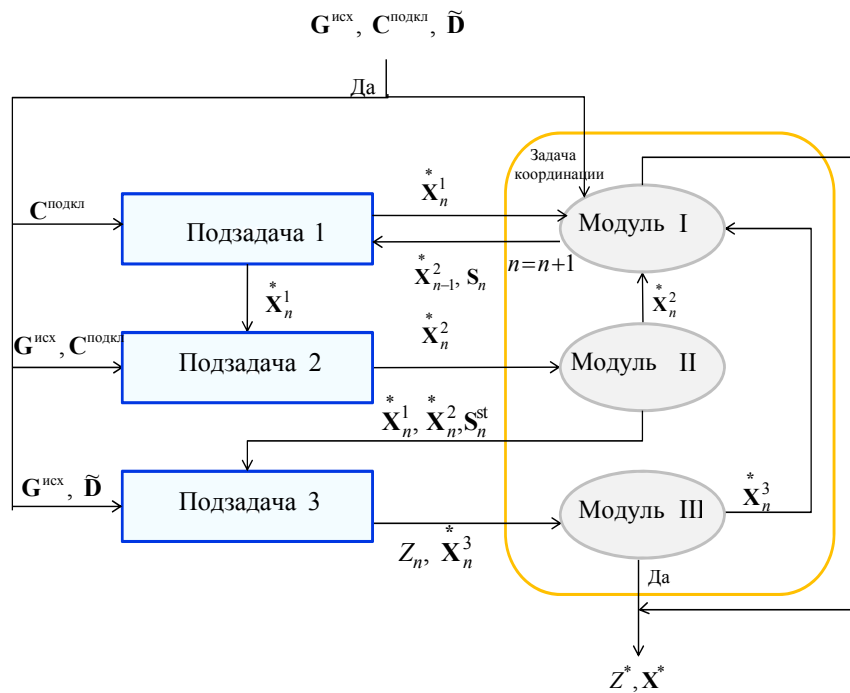


Рис. 3. Схема метода декомпозиции

В ГЛАВЕ 4 предложены алгоритмы решения подзадач 1–3, представленных в главе 3.

Алгоритмы решения подзадач 1, 2 рассматриваются в части строительства ТП и подключения к ним потребителей на уровне напряжения 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 выделения максимальных подмножеств. Суть подхода, применяемого в этом алгоритме, – последовательное выделение из множества подключаемых к электросети мегаполиса новых потребителей групп, включающих в себя максимально возможное число потребителей, для которых может быть построена РП/ТП.

В качестве оценки эффективности алгоритмов использованы два индикатора: 1) число ТП, строительство которых необходимо произвести $X_{\text{нов}}^T$; 2) время вычислений t .

В диссертационной работе проведен широкомасштабный вычислительный эксперимент и исследована эффективность указанных алгоритмов. Анализ показал, что среднее время решение задачи \tilde{t} алгоритмом k -средних и разделительной кластеризации более чем в два раза превышает время решения задачи эвристическим алгоритмом выделения максимальных подмножеств. При этом среднее число построенных ТП $\tilde{X}_{\text{нов}}^T$ при решении задачи эвристическим алгоритмом выделения максимальных подмножеств на $\sim 10\%$ меньше, чем при решении алгоритмом, реализующим метод k -средних, и на $\sim 20\%$ меньше, чем при решении задачи алгоритмом, реализующим метод разделительной кластеризации.

Наилучший результат по индикатору $X_{\text{нов}}^T$ достигнут при решении задачи эвристическим алгоритмом выделения максимальных подмножеств 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 электросети мегаполиса потребителей N приведены на Рис. 4.

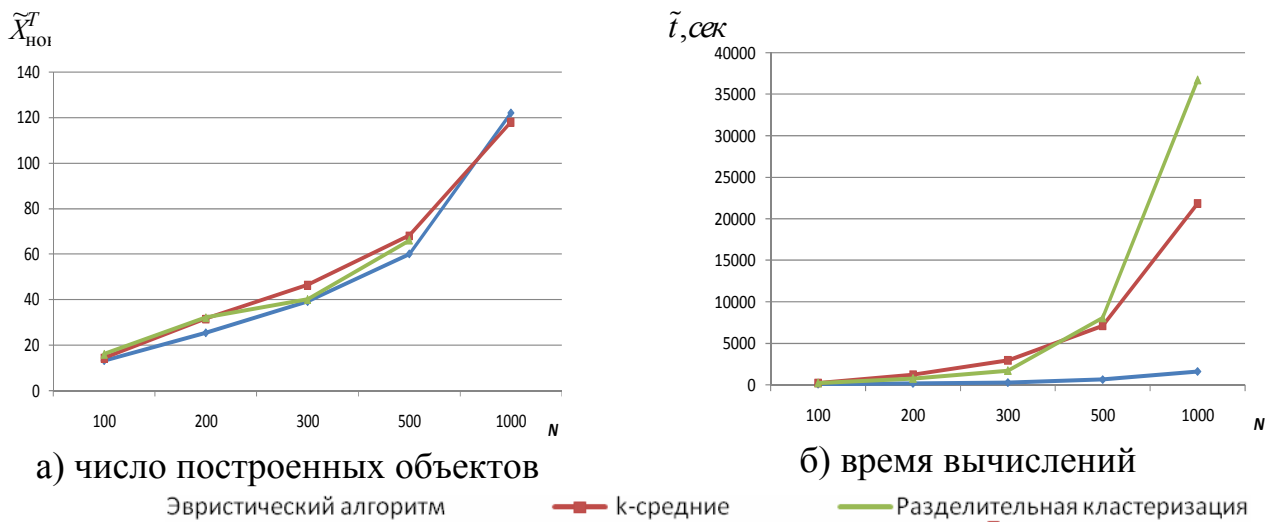


Рис. 4. Зависимость среднего времени вычислений \tilde{t} (а) и среднего числа построенных объектов $\tilde{X}_{\text{нов}}^T$ (б) от числа подключаемых потребителей N

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 – числа построенных ТП $X_{\text{нов}}^T$.

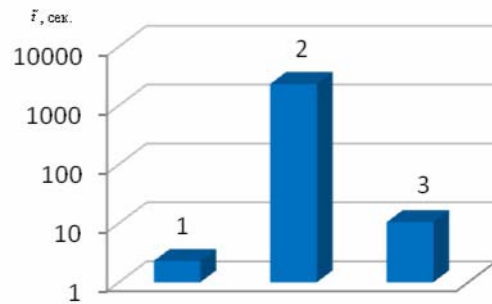
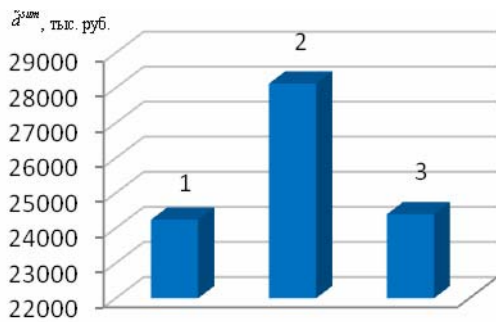
Подзадача 2.

Эвристический алгоритм сокращенного 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.

Алгоритм, реализующий метод генетического поиска (ГА). Ставим в соответствие каждому подключаемому потребителю $CL_j^{\text{подкл}}$ один ген хромосомы. Значением гена (аллелью) является номер N_i РП/ТП, к которой будет подключен потребитель $CL_j^{\text{подкл}}$. Длина хромосомы равна $|CL^{\text{подкл}}|$.

Алгоритм, основанный на построении диаграмм Вороного. Алгоритм заключается в последовательном построении диаграмм Вороного для всех ТП электросети мегаполиса 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 – суммарная стоимость построенных КЛ d^{sum} и время выполнения расчетов t . Некоторые результаты вычислительных экспериментов представлены на Рис. 5.



а) средняя стоимость строительства КЛ б) среднее время выполнения алгоритма

Рис. 5. Сравнительный анализ средней стоимости строительства КЛ (а) и времени выполнения алгоритмов (б)

- 1 – эвристический алгоритм сокращенного перебора;
 2 – алгоритм, реализующий метод генетического поиска;
 3 – алгоритм, основанный на построении диаграмм Вороного

Анализ результатов вычислительного эксперимента показывает, что лучшие значения по индикатору d^{sum} обеспечивает эвристический алгоритмом сокращенного перебора и алгоритм, основанный на построении диаграмм Вороного. Генетический алгоритм в среднем на 12,5% хуже лучшего значения для тестовой задачи. При увеличении числа подключаемых потребителей указанные тенденции сохраняются.

Подзадача 3. В диссертации решение подзадачи 3 производится с применением генетического алгоритма. Для этого каждой новой ТП $T_i^{нов}$ в соответствие ставятся два гена хромосомы: первый ген соответствует РП/ТП, от которой в i -ю ТП производится подача электроэнергии; второй – РП/ТП, куда передается электроэнергия от ТП $T_i^{нов}$. Значением гена (аллелью) является номер РП/ТП H_j , к которой будет подключен $C_k^{подкл}$ потребитель. Длина хромосомы равна $2|T^{нов}|$.

В диссертации выполнены вычислительные эксперименты (глава 6), которые подтвердили возможность применения разработанного алгоритма решения подзадачи 3 для решения практически значимых задач.

В **ГЛАВЕ 5** представлено описание разработанного автором ИПК ELNET, реализующего разработанные в диссертации математическую модель, методы и алгоритмы решения задачи ПРЭ. ELNET предназначен для выполнения автоматизированного проектирования электросети мегаполиса с учетом перспектив развития города. В главе описаны структура и функциональность ИПК, приведены типовые сценарии использования комплекса.

ИПК ELNET является диалоговой системой, предусматривающей решение задачи ПРЭ в режиме многократного взаимодействия с пользователем, и выполняет следующие функции проектирования:

- определение варианта подключения новых потребителей к электросети мегаполиса;

- определение числа и мест строительства новых РП и ТП, выбор типа подстанций и их характеристик;

- определение конфигурации электросети напряжением 10 кВ.

Информация о структуре электросети мегаполиса передается в ИПК ELNET в файлах формата TXT. Справочные данные содержатся в файле формата SQL и загружаются в ИПК автоматически при открытии программы.

ИПК ELNET состоит из шести следующих модулей.

- *Графический модуль* реализует оконный интерфейс взаимодействия «пользователь – система». Модуль также отвечает за визуализацию схемы электросети мегаполиса.

- *Модуль управления (диспетчер)* предназначен для организации взаимодействия всех модулей системы между собой.

- *Модуль ввода/вывода данных* выполняет функции считывания и временного хранения сведений об электросети мегаполиса.

- *Модуль решений подзадач.* Это – основной вычислительный модуль ИПК ELNET, реализующий методы и алгоритмы решения задачи ПРЭ.

- *Модуль расчета параметров электросети мегаполиса* предназначен для расчета параметров электросети мегаполиса, проверки условий выполнения ограничений, расчета значений критериев оптимальности и т. п.

- *База справочных данных* содержит сведения, необходимые для расчета режимов электросетей мегаполисов, а также параметры методов и алгоритмов решения.

ГЛАВА 6 посвящена оценке эффективности разработанных математических моделей, методов, алгоритмов и программного обеспечения на примере расчета электросети, по размерам и параметрам близкой к электросети района мегаполиса.

Поставлена и решена задача ПРЭ электросети района мегаполиса площадью около 27 км² и населением ~420 000 жителей. Существующая электросети района состоит из 47 РП и 393 ТП. Предполагается подключение к электросети 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 РП/ТП.

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

Заданными считаем пять следующих экономических критериев:

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

Решение задачи ПРЭ произведено методами редукции и декомпозиции. На Рис. 7 приведены некоторые результаты выполненных расчетов.

Минимальное значение целевой функции достигнуто при решении задачи методом редукции. При этом с помощью метода декомпозиции достигались значения целевой функции, близкие к минимальному. Среднее время решения задачи за одну итерацию составляет ~459 сек для метода редукции и ~875 сек – для метода декомпозиции.

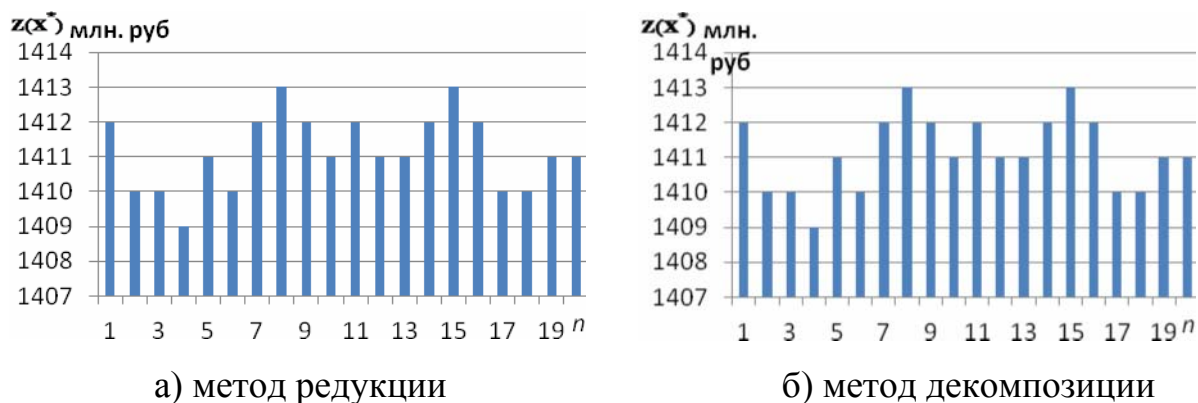


Рис. 7. Результаты решения задачи методом редукции (а) и декомпозиции (б)

Из результатов решения следует, что для обеспечения электроэнергией всех подключаемых к электросети потребителей требуется построить 3 РП и 128 ТП, проложить ~19,5 км КЛ. Анализ полученных данных показал, что оба метода позволяют находить допустимые варианты решения задачи ПРЭ за приемлемое время.

ПРИЛОЖЕНИЯ включают справочные данные, используемые для выполнения расчетов параметров электросети мегаполиса, структуру входного и выходного файлов ИПК ELNET, а также сведения о топологии рассчитываемой в главе 6 электросети района мегаполиса.

Основные результаты диссертации

1. Предложена и разработана математическая модель электросети в виде направленного графа, которая позволяет учитывать современные требования к проектированию городских распределительных электросетей с учетом их развития.

2. Задача ПРЭ поставлена как задача оптимизационная многокритериальная задача структурно-параметрического синтеза: определены варьируемые параметры задачи, заданы их области допустимых значений, частные критерии оптимальности.

3. Предложены и разработаны метод декомпозиции и метод редукции решения задачи ПРЭ. Оба метода сводят исходную задачу к совокупности трех подзадач меньшей размерности.

4. Разработан ИПК ELNET, реализующий предложенные модели, методы и алгоритмы расчета перспективного развития электросети.

5. Выполнена проверка работоспособности и эффективности разработанных моделей, методов и алгоритмов путем решения в ИПК ELNET.

Основные результаты диссертации отражены в работах

1. Кузьмина И. А. Автоматизация проектирования сети энергоснабжения при ее перспективном развитии // Научные технологии и интеллектуальные системы 2009: материалы XI молодежной Международной научно-технической конференции. М., 2009. С. 67-70. (0,25 п.л.).

2. Кузьмина И. А. Генетические методы синтеза сетей энергоснабжения // Информационные технологии. 2011. № 11. С. 36-39. (0,25 п.л.).

3. Кузьмина И. А. Анализ эффективности алгоритмов поиска рационального варианта подключения возросшей нагрузки к энергосети // Наука и образование: электронное научное издание. 2011. №8. С. 1-9. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/205183.html>. (0,56 п.л.).

4. Кузьмина И. А. Анализ эффективности алгоритмов поиска рационального варианта подключения возросшей нагрузки к энергосети // Научные технологии и интеллектуальные системы 2011: материалы XIII молодежной Международной научно-технической конференции. М., 2011. С. 104–107. (0,25 п.л.).

5. Кузьмина И. А. Проблемы развития сети энергоснабжения. Обзор // Инженерный вестник: электронный научно-технический журнал. 2013. № 11. С. 509-514. Режим доступа: <http://engbul.bmstu.ru/doc/649672.html>. (0,38 п.л.).

6. Кузьмина И. А. Постановка и формализация задачи проектирования сети энергоснабжения // Научные технологии и интеллектуальные системы 2014: материалы XVI молодежной Международной научно-технической конференции. М., 2014. С. 47–50. (0,25 п.л.).

7. Карпенко А. П., Кузьмина И. А. Математическая модель распределительной городской сети электроснабжения с учетом ее перспективного развития // Наука и образование: электронное научное издание. 2014. №5. С. 162-176. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/709781.html>. (0,94 п.л. / 0,47 п.л.).

8. Карпенко А. П. , Кузьмина И. А. Методы решения задачи перспективного развития распределительной городской сети энергоснабжения // Наука и образование: электронное научное издание. – 2014. № 10. С. 292-304. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/727891.html>. (0,81 п.л. / 0,4 п.л.).

9. Карпенко А. П. , Кузьмина И. А. Определение числа и мест строительства подстанций при решении задачи перспективного развития городской распределительной сети энергоснабжения // Наука и образование: электронное научное издание. 2014. № 12. С.798-815. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/743490.html>. (1,13 п.л. / 0,56 п.л.).

10. Кузьмина И. А. Система автоматизированного проектирования городской распределительной сети энергоснабжения с учетом перспектив развития города // XV Всероссийская конференция молодых ученых по

математическому моделированию и информационным технологиям 2014: программа и тезисы докладов. Тюмень, 2014. С. 68. (0,1 п.л.).

11. **Кузьмина И. А. Проектирование оптимальной структуры распределительной сети энергоснабжения с учетом перспектив развития города // Информационные технологии. 2015. Т. 21, №11. С. 827-833. (0,44 п.л.).**

12. **Kuzmina I. CAD system for perspective power supply network development task solution // Vestnik SibGAU (Вестник СибГАУ). 2016. Vol. 17, N1. P. 62-66. (0,31 п.л.).**

13. Кузьмина И.А. Применение принципов декомпозиции и координации для решения задачи перспективного развития городской распределительной сети энергоснабжения // Проблемы современной науки и образования. 2016. №30. С. 40-46. (0,44 п.л.).

14. Кузьмина И.А. Системы автоматизации проектирования объектов электроэнергетики. Интерактивный программный комплекс ELNET // Информатизация инженерного образования: труды Международной научно-практической конференции. М., 2016. С. 346-347. (0,13 п.л.).

15. Кузьмина И.А., Щетинин В.Н. Применение метода ветвей и границ для решения задачи распределения новых потребителей по подстанциям сети электроснабжения // Проблемы современной науки и образования. 2016. №36(78), С. 26-30. (0,31 п.л. / 0,15 п.л.).

16. **Кузьмина И.А., Спасёнов А.Ю., Щетинин В.Н. Оценка эффективности и сравнительный анализ алгоритмов решения задачи оптимального подключения новых потребителей к энергосети // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». 2016. №6, том 8. Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/87TVN616.pdf>. (0,81 п.л. / 0,27 п.л.).**