Кузьмина Инна Анатольевна. Разработка математической модели, численных методов и алгоритмов структурно-параметрического синтеза электросети мегаполиса с учетом его перспективного развития: диссертация ... кандидата Технических наук: 05.13.18 / Кузьмина Инна Анатольевна;[Место защиты: ФГБОУ ВПО Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана], 2017.- 214 с.

Оглавление

Стр.

Принятые определения и сокращения 5

Список условных обозначений 6

ВВЕДЕНИЕ 12

ГЛАВА 1. Задача перспективного развития электросети (ПРЭ) мегаполиса 20

1. [Основные особенности электросети мегаполиса 20](#bookmark3)
2. Развитие электросети мегаполиса 29
3. [Опыт проектирования электросетей в России и за рубежом 35](#bookmark11)
4. [Выводы по главе 1 41](#bookmark12)

[ГЛАВА 2. Формализация и постановка задачи ПРЭ 42](#bookmark13)

1. [Модель электросети 42](#bookmark14)
2. Постановка задачи ПРЭ как задачи структурно-параметрического

синтеза 49

1. Сведение многокритериальной задачи ПРЭ к однокритериальной задаче 52
2. [Выводы по главе 2 55](#bookmark22)

ГЛАВА 3. Разработка методов решения задачи ПРЭ 56

1. [Метод, основанный на редукции задачи ПРЭ к совокупности вложенных задач глобальной минимизации (метод редукции) 58](#bookmark25)
2. [Метод, основанный на декомпозиции задачи ПРЭ (метод декомпозиции) 61](#bookmark28)
3. Подходы к решению подзадач 1-3, выделенных методами редукции и декомпозиции 69
4. [Выводы по главе 3 72](#bookmark35)

ГЛАВА 4. Разработка и исследование эффективности алгоритмов решения

задачи ПРЭ 73

* 1. Подзадача 1. Определение числа и мест строительства новых

РП и ТП 74

* + 1. [Алгоритмы кластеризации 75](#bookmark36)

з

Стр.

* + 1. Эвристический алгоритм выделения максимальных подмножеств 84
    2. Сравнительный анализ эффективности алгоритмов 86
  1. Подзадача 2. Определение варианта подключения новых потребителей к электросети 92
     1. [Эвристический алгоритм ограниченного перебора 93](#bookmark42)
     2. [Генетический алгоритм 94](#bookmark43)
     3. Алгоритм, основанный на построении диаграмм Вороного 97
     4. Сравнительный анализ эффективности алгоритмов 99
  2. Подзадача 3. Определение итоговой структуры электросети. Генетический алгоритм 104
  3. [Алгоритмы решения задачи координации 106](#bookmark45)
  4. [Выводы по главе 4 109](#bookmark48)

[ГЛАВА 5. Интерактивный программный комплекс ELNET 110](#bookmark49)

1. [Функциональность ИПК ELNET 110](#bookmark50)
2. [Архитектура ИПК ELNET 114](#bookmark53)
3. Типовые сценарии работы в ИПК ELNET 116
4. Роль ЛПР при работе в ИПК ELNET 122
5. [Выводы по главе 5 123](#bookmark54)

ГЛАВА 6. Расчет перспективного развития электросети района мегаполиса . 124

1. Постановка задачи 124
2. Исходные данные 124
3. [Ограничения 126](#bookmark55)
4. [Критерии оптимальности 128](#bookmark57)
5. Дополнительная информация 135
6. Вычислительный эксперимент 137
7. [Результат решения задачи 142](#bookmark62)

Стр.

1. Выводы по главе 6 143

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ 144

Список используемой литературы 147

ПРИЛОЖЕНИЕ 158

**Принятые определения и сокращения**

|  |  |
| --- | --- |
| ГА | - генетический алгоритм; |
| ИПК | - интерактивный программный комплекс; |
| КЛ | - кабельная линия; |
| ЛПР | - лицо принимающее решение; |
| ПК | - программный комплекс; |
| ПРЭ | - перспективное развитие электросети; |
| ПУЭ | - правила устройства электроустановок; |
| РП | - распределительная подстанция; |
| тп | - трансформаторная подстанция; |
| ЭВМ | - электронно-вычислительная машина. |

Электросеть - городская распределительная сеть электроснабжения.

**Список условных обозначений**

[1... *А] -* все целые числа в интервале от 1 до *А;*

[1: *А] -* любые вещественные значения в интервале от 1 *до А;*

*(А] А2* ) - вектор параметров;

*\At\ -* совокупность объектов *Ai*

**(А, В,...) -** совокупность множеств **А, В** и т.д.;

(х. ) - географические координаты /-ого объекта в формате

(хх.хххххх0; уу.уууууу0);

|А| - число элементов множества А;

*а* - коэффициент, зависящий от принятых при

вычислениях единиц измерения величин;

Лг - /-й коэффициент свертки;

*а*, шт. - число токопроводящих жил KJI;

*b -* коэффициент, зависящий от материала KJI;

cos *ф -* коэффициент мощности (косинус угла между фазой

напряжения и фазой тока);

***С*** *-* тип объекта «Потребитель»;

С - множество всех подключаемых к электросети

потребителей;

СН - множество потребителей, подключаемых к РП

электросети (к объектам типа *R)* на уровне

напряжения 10 кВ;

**CL** - множество потребителей, подключаемых к ТП

электросети (к объектам типа ***Т)*** на уровне

напряжения 0,4 кВ;

***Ct*** *-* ***і-й*** подключаемый потребитель;

**D** - область допустимых значений вектора варьируемых

параметров X;

подобласть области допустимых значений вектора варьируемых параметров D при фиксированных

**d(x'),**

d(x\x2)

**D**

®c/» ®z

**D1 D2** *ux*

*d* , тыс.руб *d{* , тыс.руб *d;* , тыс.руб ^•,тыс.руб/км

^ ИСХ ^ итог

H

*ht* , ШТ.

/zmax, ШТ.

1 12 значениях вектора X и векторов X и X

соответственно;

область допустимых значений вектора варьируемых параметров, заданная параметрами стимулирующей координации;

область допустимых значений вектора варьируемых параметров, заданная базовыми, пользовательскими или критериальными ограничениями соответственно; область допустимых значений вектора варьируемых параметров Xі и х2 соответственно; затраты на возведение строительной части РП;

стоимость строительства ТП 7];

стоимость установки /-ого трансформатора;

стоимость строительства 1 км КЛ *Lt* у;

граф, описывающий исходную и итоговую

топологию электросети соответственно; множество уникальных номеров РП и ТП; наименование KJ1 Д соединяющей *і* и / узлы

электросети;

число потребителей, подключение которых возможно произвести к РП (число свободных ячеек на РП^/); максимально возможное число мест присоединения в РП:

ток в *Ltj* KJT;

- коэффициент несовпадения максимумов нагрузки;

коэффициент нагрузочных потерь трансформатора;

*к-3*

*L*

jjHCX jJHTOT

*hi*

*iL iH*

Чіт, 4im, KM

*hr* KM

*Мі* , час

дг кластер

*N1*

*Np,* шт.

*П:* , ШТ.

**О**

*Of*

*APt* , кВт ,кВт

*Рр*,кВт

*РТ,* кВА

тип объекта «Кабельная линия» (КЛ);

множество всех KJI исходной и итоговой электросети

соответственно;

KJI, соединяющая /-й и *j*-й узлы электросети;

максимально допустимая длина KJI напряжением 10 и 0,4 кВ соответственно; длина KJI *Ц р*

годовое число часов использования потребителем Сг максимума электрической нагрузки; минимальное число кластеров, на которое необходимо разделить элементы множества; максимальный размер кластера;

число хромосом начальной популяции;

число свободных мест присоединения на сборной

шине 0,4 кВ в 7} ТП;

множество областей - возможных мест строительства новых РП/ТП;

/-ое место возможного строительства новой РП/ТП, представленное географическими координатами в формате (хх.хххххх0; уу.уууууу°); потери мощности в /-ом трансформаторе;

исходная суммарная мощность потребителей, подключенных к 7) ТП;

Заявленный/рассчитанный объем мощности, требуемый потребителю Сг;

мощность трансформатора, установленного на Гг ТП;

*pTR* кВА - мощность 1-ого трансформатора;

*Pfj,* кВт \_ мощность, передаваемая по KJ1 *Ц* • от узла *і* к узлу *j\*

*P^J1,* кВт \_ пропускная способность KJI *Ц* • (максимальная

мощность, которая может быть передана по KJT *Lt j*, от узла *і* к узлу *j* электросети); *qt j ~* состояние, в котором KJT *Ц* • находится в нормальном

режиме электроснабжения: *q.* . = 1 для

*Ji->j*

функционирующей KJI; *а-* ,• = 0 для KJ1, находящихся

в отключенном состоянии;

*R -* тип объекта «Распределительная подстанция» (РП);

цисх j^HTor \_ исходное и итоговое множество узлов электросети

типа *R* соответственно; jjhob - множество РП, строительство которых необходимо

произвести для подключения всех новых потребителей множества СНисх и ТП множества

грНОВ .

*Ri - і*-ая РП, *Rj^R ;*

*-* расстояние между *і*-м и *j-м* объектами;

*rij,* м

вектор координирующих параметров;

Slim, Sst - подвекторы параметров лимитирующей и

стимулирующей координации соответственно;

я,- ;, мм2 \_ сечение KJI *L: :*;

*Т -* тип объекта «Трансформаторная подстанция» (ТП);

грИСХ гріггог - Исходное и итоговое множество узлов электросети

типа *Т* соответственно;

Тнов - множество ТП, строительство которых необходимо

произвести для подключения всех потребителей множества СЬисх к электросети;

7] *-* /-ая ТП, *Ті Е:Т;*

*Tt j*, час - время максимальных потерь в *Lt j* KJI;

*bUij9* % \_ допустимое падение напряжения в *Ц* • КЛ;

? кВ - заявленный потребителем *С{* (или рассчитанный)

уровень напряжения;

*Uі j*, кВ - уровень напряжения *Lt j* KJI;

*У? Vj ~* вектоР параметров *Q* потребителя, *Ri* РП, 7} ТП, *Ц j*

*yL* KJI соответственно;

*Uj*

1. - вектор варьируемых параметров;

Xі, X2, X3 - вектор варьируемых параметров подзадач 1, 2, 3

соответственно;

*X. -* неизвестный номер ТП/РП, к которой будет

произведено подключение потребителя *Сі*;

1. , *Х2* - номера РП/ТП, к которым произведено подключение

*Ті* ТП;

*v-R уТ -* число новых РП и ТП соответственно, строительство

^НОВ’ ^нов

которых необходимо произвести для подключения всех потребителей множества С к электросети;

W(X) - вектор-функция ограничений;

Wx(X), W[/(X) - вектор базовых и пользовательских ограничений

соответственно;

^F (X)>0, - i-я и у'-я функции ограничений вида неравенства и

*WAX) = 0 т „ т*

*'* равенства, наложенные на элементы типов *Т, К, L;*

z(x) - вектор критериев оптимальности;

Z(X) - итоговый скалярный критерий оптимальности;

22 - скалярный критерий оптимальности подзадачи 1 и 2

соответственно;

- скалярный критерий оптимальности подзадачи 2;

7" 7+ - минимальное и максимальное значения /-ого

’ /

критерия оптимальности соответственно.

**ВВЕДЕНИЕ**

**Актуальность работы**

Эра электрификации в России началась еще в 1879 году в Петербурге, когда был освещен электрическим светом Литейный мост [38]. Позже началась электрификация Москвы и других городов России, однако массовое строительство объектов электроснабжения в стране было начато лишь в 1920 годах [80]. С тех пор электроэнергетика стала неотъемлемой частью всех сфер жизнедеятельности человека - промышленной, бытовой, сельскохозяйственной ИТ. д.

Важной чертой электроэнергетических сетей всех уровней напряжения является их непрерывное развитие в связи с ростом нагрузки. Особенно высокие темпы роста наблюдаются в городских распределительных сетях электроснабжения (далее - электросеть).

Первые построенные электросети имели относительно простую структуру и невысокую надежность [93]. С развитием электросетей усложнялась их топология, число и разнообразие элементов, особое внимание стало уделяться надежности их функционирования. Высокие темпы развития городов, требовали применения новых технических решений для проектирования и функционирования электросетей — параллельно с развитием электросистем, широко внедрялись системы автоматизации и управления их элементами.

Процесс развития электросетей характеризуется сильными временными связями, которые выражаются во взаимной зависимости эффективности решений, принятых в различные моменты времени. Это означает, что ошибки проектирования, сделанные много лет назад, могут оказать существенное влияние на надежность и эффективность проектных решений, принимаемых сегодня. Данная особенность требовала особого внимания к вопросу проектирования электросетей и привела к созданию нового направления в электроэнергетике - оптимальное проектирование электросетей.

Основоположником теории оптимального проектирования электросетей считается В. М. Хрущов, который в начале 30-х годов XX века сформировал общие принципы оптимизации городских электрических сетей [107], некоторые из которых не утратили свою актуальность и в настоящее время. В дальнейшем теория оптимального проектирования электросетей развивалась многими учеными-энергетиками России, такими как Акишин JI. А. [22], Арзамасцев Д. А. [30], Веников В. А. [39], Глазунов А. А. [41], Гордиевский И. Г. [45], Григорьева А. Д. [46], Дале В. А. [47], Зейлигер А. Н. [50], Идельчик В. И. [51], Лазебник А. И. [65], Лордкипанидзе В. Д. [45], Падалко Л. П. [74] и многих других. Из зарубежных авторов следует отметить Willis Н. L. [19], Nara К. [13], Khator S. К. [10], Gonen Т. [9], Diaz-Dorado Е. [7], Ramirez-Rosado I. J. [14] и т. д.

Электросети являются сложной системой неоднородной структуры и представляют собой совокупность распределительных и понижающих подстанций, питающих и распределительных линий электропередачи, электроприемников и охватывают всех потребителей города, включая промышленные предприятия, электрифицированный транспорт и т. д. Все элементы электросети характеризуются сильной взаимозависимостью. Электросети включают в себя узлы двух уровней напряжения - 10 и 0,4 кВ.

Электросети имеют ряд особенностей, отличающих их от сетей электроснабжения более высокого уровня напряжения [106].

1. Электросети характеризуются большей, чем системообразующие сети высокого напряжения, территориальной плотностью узлов. Число узлов электросети превосходит число узлов магистральных сетей в сотни и даже тысячи раз. Таким образом, затраты на сооружение и эксплуатацию электросетей имеют больший объем в общей части капиталовложений в электроэнергетические сети.
2. Темпы развития электросетей превосходят темпы развития сетей более высоких уровней напряжения (магистральных, системообразующих и пр.).
3. В настоящее время имеется широкая номенклатура вариантов реализации каждого элемента электросети (трансформаторной подстанции (ТП), распределительной подстанции (РП), кабельной линии (КЛ) и пр.).

Все эти особенности, а также необходимость учета большого числа различных критериев при выборе решения, делают задачу проектирования оптимальной топологии электросети многопараметрической,

многокритериальной, многовариантной и труднопреодолимой с практической точки зрения. Указанные обстоятельства явились основанием выбора в качестве объекта исследования именно городских распределительных сетей электроснабжения.

Сложность процесса проектирования электросетей, связанная с необходимостью учета и расчета большого числа параметров, возможных вариантов развития и сложность их оценки, привела к необходимости внедрения новых технологий для решения данной задачи. Применение электронно- вычислительных машин (ЭВМ) для решения задачи перспективного развития электросетей (ПРЭ) позволяет существенно сократить время получения и сравнения вариантов развития электросети и, следовательно, дает возможность получения оптимального решения за приемлемый срок.

Одни из первых попыток применения ЭВМ для решения задачи ПРЭ были произведены в конце 70-х - начале 80-х годов XX века на базе физико­энергетического института АН Латвийской ССР в рамках создания программно­информационного комплекса «Оптимизация развития основных электрических сетей энергосистемы» [69].

Разработанный программный комплекс (ПК) позволял производить расчеты сетей электроснабжения различных уровней напряжения (от 6 до 110 кВ), состоящих не более чем из 500 узлов и 500 ветвей. Математической основой комплекса являлись динамические модели оптимального развития сетей электроэнергетических систем, разработанные 3. П. Кришаным. Указанный ПК был успешно внедрен в многочисленных энергетических компаниях (Латвглавэнерго, Уральском Политехническом институте, Сибирском энергетическом институте и т. д.) [62]. Современные ПК расчета сетей электроснабжения, такие как INTEGRAL7 (Германия), PSS™SINCAL (Германия), также включают в себя модули проектирования сетей электроснабжения с учетом перспективного электропотребления. Эти ПК предназначены для проектирования перспективного развития сетей электроснабжения высокого (220 и 110 кВ) и среднего напряжения (20 и 10 кВ), позволяют учитывать различные параметры элементов сетей и различные критерии оптимальности.

В настоящее время электросети мегаполисов состоят из десятков тысяч элементов, отличных по назначению и характеристикам. Например, электросети Московских кабельных сетей - филиала ОАО «МОЭСК» имеют общую протяженность KJ1 более 73000 км, включает в себя свыше 15000 ТП и РП и ежегодно обеспечивают потребителей более 46000 млн. кВт\*ч электроэнергии [44]. Ежегодный прирост электропотребления в Москве составляет -2,1%, что соответствует -9000 заявок на технологическое присоединение потребителей суммарной мощностью более 1800 МВт, строительству 50-120 новых подстанций 10/04 кВт и прокладки ~1200 км кабельных линий [44, 76].

Учитывая современные темпы развития мегаполисов, проблема построения экономичной и надежной электросети сейчас особенно актуальны.

В литературе как отечественных, так и зарубежных авторов предложены различные модели оптимизации электросетей. Показано, что данная задача может решаться как в непрерывной, так и в дискретной постановках [51, 96]. К решению этих задач применены различные алгоритмы и методы, такие как методы динамического [46, 47], целочисленного [9] и линейного программирования [59], метод ветвей и границ [17, 65], методы целочисленного программирования [56], алгоритмы оптимизации на графах [28], эволюционное моделирование [7].

Большая часть литературы по электроснабжению городов включает в себя различные методики и требования к определению параметров различных элементов электросети (номинального напряжения, сечения KJI, числа и мощности устанавливаемых на ТП трансформаторов и т. д.), а также вопросы оптимизации режимов работы, вопросы качества электроэнергии и надежности электроснабжения [58, 109]. В ряде работ также выполнен анализ схемы соединений, местоположений подстанций электросети и т. д. [85, 86].

В подавляющем числе работ в качестве критерия оптимальности выбирались приведенные затраты на строительство элементов, включаемых в состав электросети. В ряде случаев также производилась оценка надежности электроснабжения [8].

Анализ имеющейся литературы по проектированию электросетей показал наличие в исследованиях целого ряда актуальных вопросов, которым до настоящего времени не уделялось достаточного внимания.

1. Комплексное решение вопросов задачи перспективного ПРЭ рассмотрено лишь в нескольких работах. При этом в большинстве случаев рассматривается лишь один из аспектов задачи - выбор мест строительства ТП, определение варианта распределения потребителей и т. д.
2. В большей части предложенных в литературе постановок задачи ПРЭ 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 электросети, например, надежность энергоснабжения.
5. Известные подходы к решению задачи ПРЭ, преимущественно, подразумевают строительство электросети без учета существующих РП и ТП, предполагая возведение новых подстанций для обеспечения энергоснабжения новых потребителей.

Приведенные выше сведения позволяют сделать заключение об актуальности задачи определения оптимальной топологии электросети с учетом перспективного развития города. При этом наиболее актуальным является решение данной задачи применительно к электросетям мегаполисов.

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

**Задачи исследования. В** работе поставлены и решены следующие основные задачи.

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 электросети.
2. Постановка задачи ПРЭ мегаполиса как задачи ее структурно­параметрического синтеза с учетом существующей структуры электросети мегаполиса и ограничений на расположение объектов на местности.
3. Разработка методов и алгоритмов оптимального решения поставленной задачи ПРЭ, позволяющих осуществлять выбор числа и мест строительства новых РП и ТП, 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.

**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.

**Объектом исследования** являются электросети мегаполисов.

**Предметом исследования** являются модели, методы и алгоритмы структурно-параметрического синтеза, необходимые для автоматизированного проектирования электросети мегаполиса.

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

**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 электросетей мегаполисов.

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

**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.

**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 получили одобрение на семи научно-технических конференциях.

1. Молодежные международные научно-технические конференций «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы», г. Москва, 2009, 2010, 2011 и 2014 года.
2. XV Всероссийская конференция молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям, г. Тюмень, 2014 год.
3. IWMMA’15 4th International Workshop on Mathematical Models and their Applications, Красноярск, 2015 год.
4. Международная научно-практическая конференция Инфорино-2016, НИУ МЭИ, Москва, 2016 год.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 11 научных работ, из них 8 статей в журналах, входящих в состав Перечня российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

**Структура и объем диссертации.** Диссертации состоит из введения, шести глав, заключения, списка используемой литературы и одного приложения. Общий объем диссертации составляет 211 страниц машинописного текста, в том числе 157 страниц основного текста, 54 страниц приложений. Диссертации содержит 49 рисунков, 23 таблицы. Список используемой литературы состоит из 109 источников. В состав диссертации включен Акт о внедрении результатов диссертационной работы.

**ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертационной работе получены следующие основные теоретические и практические результаты.

1. На основании обзора и анализа существующих рекомендаций, требований и методов решения задачи ПРЭ, применяемых в России и за рубежом, выявлены аспекты, требующие исследования и принятия технических решений:

* разработка методов и алгоритмов связанного решения всего комплекса вопросов ПРЭ;
* применение подходов, учитывающих дискретных характер решаемой задачи в части определения мест строительства новых РП и ТП;
* разработка математической модели решения задачи ПРЭ, учитывающей текущее состояние электросети и позволяющей решать исходную задачу в контексте размещения не одной, а совокупности подстанций;
* возможность использовать различные критерии оптимальности, учитывающие такие важные характеристики электросети, например, надежность электроснабжения.

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. На основании указанной модели поставлена задача ПРЭ как задача оптимизационная многокритериальная задача структурно­параметрического синтеза: определены варьируемые параметры задачи, заданы их области допустимых значений, частные критерии оптимальности.
2. Предложены и разработаны метод декомпозиции и метод редукции решения задачи ПРЭ. Оба метода сводят исходную задачу к совокупности трех следующих подзадач меньшей размерности:

*Подзадача 1 -* определение числа и мест строительства новых РП и ТП;

*Подзадача 2 -* определение варианта подключения новых потребителей к электросети;

*Подзадача 3 -* определение варианта возможного подключения новых РП и ТП, «построенных» при решении подзадачи 1, к существующей электросети.

1. Разработаны следующие алгоритмы решения указанных подзадач.

*Подзадача Г.*

* алгоритм на основе метода ^-средних;
* алгоритм разделительной кластеризации;
* эвристический алгоритм выделения максимальных подмножеств.

*Подзадача* 2:

* эвристический алгоритм ограниченного перебора;
* генетический алгоритм;
* алгоритм, основанный на построении диаграмм Вороного.

*Подзадача 3:*

* генетический алгоритм;

1. Разработан ИПК ELNET, реализующий предложенные модели, методы и алгоритмы расчета перспективного развития электросети.
2. Выполнена проверка работоспособности и эффективности разработанных моделей, методов и алгоритмов путем решения в ИПК ELNET задачи ПРЭ района мегаполиса на -420 ООО жителей площадью около 27 км . Электросеть состоит из 47 РП и 393 ТП, предполагается подключение 1719 новых потребителей. Выполненный в работе широкий вычислительный эксперимент подтвердил эффективность разработанных моделей, методов, алгоритмов и программного обеспечения.
3. Результаты работы использованы в Московских кабельных сетях - филиале ОАО «Московская объединенная электросетевая компания».
4. Предполагаемые направления дальнейшей работы автора в области перспективного развития электосетей связаны со следующими аспектами:

* Разработка системы интеграции ИПК ELNET с существующими программными продуктами расчета параметров и режимов электросетей.
* Применение аппарата параллельных вычислений для реализации системы поддержки принятия решений.
* Исследование и применение современных методов и алгоритмов эффективного решения задачи ПРЭ, рассмотрение которых не вошло в объем диссертационной работы.

**Список используемой литературы**

1. Allen J. Powerful City Networks: More than Connections, Less than Domination and Control. UK : The Open University. 2009. 31 p.
2. Bentley Expert Designer Electric. Intelligent streamlined design for electric

utilities. 2008. URL: http:// ftp2 .bentley.com/dist/collateral/spec/

Bentley Expert Designer Electric specsheet eng lores 0408.pdf (дата

обращения: 25.05.2016).

1. Brown R. E. Electric Power Distribution Reliability, 2-nd edition. New York: CRC Press LLC, 2009. 423 p.
2. CADprofi Electrical. URL: <http://www.cadprofi.com/main/ru/products/cadprofi-> electrical (дата обращения: 15.07.2016).
3. CYME International - Software. PSAF, Power Systems Analysis Framework. URL: <http://www.cyme.com/software/psaf/> (дата обращения: 15.07.2016).
4. Data Design System. A Nemetschek Company. DDS-CAD Electrical. URL: <http://www.dds-cad.net/products/dds-cad-electrical/> (дата обращения:

13.04.2015).

1. Diaz-Dorado E. Planning of large rural low voltage networks using evolution strategies / E. Diaz-Dorado, E. J. Cidras, E. Miguez // IEEE Transactions on Power Systems. 2003. Vol. 18, №4. P. 1594-1600.
2. Fan M. The Capability Assessment of Emergency Power Supply in Urban Power Network / M. Fan, S. Liu, Z. Zhang // 20-th International Conference on Electricity Distribution, Prague. 2009. 8-11 June. P. 78-85.
3. Gonen Т., Ramirez-Rosado I. J Review of distribution system planning models: A model for optimal multistage planning // Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers. 1986. Vol. 133, №7. P. 397-408.
4. Khator S. K. Power distribution planning: A review of models and issues // IEEE Transactions on Power Systems. 1997. Vol. 12, №8. P. 1151-1159.
5. Kueng L. Continuity of Supply: Benchmarking Five Urban Electric Distribution Utilities in Switzerland / L. Kueng, H.-H. Schiesser, R. Cettou // 19th International Conference on Electricity Distribution. 2007. №0103. P. 1-4.
6. Manning Ch. D. Introduction to Information Retrieval / Ch. D. Manning, P. Raghavan, H. Schiitze. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. 504 p.
7. Nara K. Distribution system expansion planning by multistage branch exchange / K. Nara, T. Satoh, H. Kuwabara, K. Aoki, M. Kitagawa, T. Ishihara // IEEE Transactions on Power Systems. 1992. Vol.7, №1. P. 208-214.
8. Ramirez-Rosado I. J. Pseudo-dynamic planning for expansion of power distribution systems // IEEE Transactions on Power Systems. 1991. Vol.6, №1. P. 245-254.
9. Short T. A. Electric Power Distribution Handbook. 2-nd edition. New York: CRC Press LLC, 2014. 878 p.
10. Sumper A. International Reliability Analysis in Distribution Networks /
11. Sumper, A. Sudria, F. Ferrer // CITCEA Universitat Politecnica de Catalunya. 2005. P. 32-36.
12. Thompson G. L. A branch and bound model for choosing optimal substation locations // IEEE Transactions on Power Systems. 1981. Vol. 100, №5. P. 2683- 2687.
13. Wang S. Study and Application of Decision-Making Support System for Urban Distribution Network Planning of Shanghai / S. Wang, J. Wang, Y. Li // CIRED 20-th International Conference on Electricity Distribution, Prague. 2009. 8-11 June. P. 112-126.
14. Willis H. L. Power Distribution Planning Reference Book. Second Edition, Reference Book. New York: Marcel Dekker, Inc., 2004. 1217 p.
15. Авдеюк О. А. Конспект лекций по дискретной математике: учебное пособие. Волгоград: ВолгГТУ, 2015. 144 с.
16. Аветисян Д. А. Автоматизация проектирования электротехнических систем и устройств. М.: Высшая школа, 2005. 511 с.
17. Акишин Л. А. Математическая модель оптимизации конфигурации электрической сети в динамике развития / Л. А. Акишин, А. Д. Макаревич, В. В. Молодюк // Труды Иркутского политехнического института.
18. №72. С. 174-184.
19. Алферова Т. В. Математическое моделирование в энергетике: Учебное пособие. Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2009. 61 с.
20. Алиев И. И. Электротехнический справочник. М.: РадиоСофт, 2014. 384 с.
21. Аляев Ю. А., Тюрин С.Ф. Дискретная математика: приктическая дискретная математика и математическая логика. Учебное пособие. М.: Финансы и статистика, 2012. 384 с.