Кузьмина И.А.

СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГОРОДСКОЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ С УЧЕТОМ ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ ГОРОДА

[kuzminainna@yandex.ru](mailto:kuzminainna@yandex.ru)

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

г. Москва

**Введение**

Городские распределительные сети энергоснабжения являются сложной системой неоднородной структуры и представляют собой совокупность распределительных и понижающих подстанций, питающих и распределительных линий электропередачи, энергоприемников и охватывают всех потребителей города, включая промышленные предприятия, электрифицированный транспорт и т. д.

В настоящее время городские распределительные сети мегаполисов состоят из десятков тысяч элементов, отличных по назначению и характеристикам. Учитывая современные темпы развития городов, проблема построения экономичной и надежной сети энергоснабжения сейчас особенно актуальна. При этом процесс проектирования таких сетей связан с необходимостью учета и расчета большого числа параметров, возможных вариантов развития и сложностью их оценки [1].

Указанные обстоятельства приводят к необходимости внедрения новых технологий для решения указанной задачи [2]. Для автоматизации решения задачи перспективного развития энергосети (ПРЭ) автором разработана система автоматизированного проектирования (САПР) «ELNET».

**Задача проектирования городской распределительной сети энергоснабжения**

Математическая постановка задачи ПРЭ приведена в работе [3].

Сеть энергоснабжения представляет собой объединенные между собой кабельными линиями (КЛ) объекты двух типов – трансформаторная подстанция (ТП) и распределительная подстанция (РП). Также при решении задачи ПРЭ заданным является множество подключаемых к сети потребителей электроэнергии.

Задача ПРЭ заключается в определении такого варианта развития сети, при котором при наименьших затратах на строительство и эксплуатацию ее элементов, будут обеспечены высокий уровень надежности энергоснабжения и качества передаваемой электроэнергии.

Под определением варианта развития сети энергоснабжения понимается:

* определение числа и мест строительства новых энергетических объектов (ТП, РП), определение варианта и параметров их включения в существующую сеть энергоснабжения;
* определение варианта подключения новых потребителей к сети энергоснабжения.

Модель фрагмента сети энергоснабжения приведена на рисунке 1.



**Рис. 1.** Модель фрагмента городской распределительной сети энергоснабжения

– РП; – ТП; – КЛ; – подключаемый потребитель электроэнергии

В работе [3] задача ПРЭ поставлена как многопараметрическая многокритериальная детерминированная задача структурно-параметрической оптимизации.

Высокая размерность задачи ПРЭ мегаполисов требует разработки высокоэффективных методов ее решения.

Для решения задачи ПРЭ разработаны два метода:

* метод сведения к совокупности вложенных задач глобальной минимизации;
* метод декомпозиции.

Подробное описание указанных методов приведено в работе [4].

Оба метода предполагают разбиение исходной задачи на три подзадачи меньшей размерности:

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

*Подзадача 2.* Определение варианта подключения новых потребителей к энергосети.

*Подзадача 3.* Определение оптимального варианта подключения новых ТП к существующей электросети.

В методе сведения исходной задачи к совокупности вложенных подзадач глобальной оптимизации предполагается последовательное решение подзадач 1 – 3, при котором решение каждой последующей подзадачи производится на ссуженной области допустимых значений вектора варьируемых параметров, полученной фиксированием значений решений предыдущих подзадач.

Второй метод – *метод декомпозиции* – предполагает разбиение задачи оптимизации ПРЭ на те же три подзадачи и задачу координации, которая выполняет расчёт параметров координации, определение последовательности решения подзадач и момента окончания вычислений. Координацию подзадач осуществляем с помощью векторов лимитирующих и стимулирующих параметров. В работе рассмотрен двухмерный вектор лимитирующих параметров координации. Компоненты этого вектора имеют смысл минимальных чисел ТП, РП, которые должны быть построены. Размерность вектора стимулирующих параметров равна числу возможных мест строительства ТП, РП. Компоненты вектора стимулирующих параметров имеют смысл «полезности» строительства новых ТП, РП в указанных местах.

Для решения подзадач 1 – 3 могут быть использованы различные алгоритмы оптимизации и различные условия окончания итераций.

В работе реализованы следующие алгоритмы решения подзадач 1 – 3.

***Подзадача 1***. Исходными данными для подзадачи является множество потребителей, для которых отсутствуют варианты подключения их к сети энергоснабжения. Результатом решения подзадачи является множество ТП и РП, строительство которых необходимо произвести для подключения всех потребителей к энергосети.

* 1. *Алгоритм, реализующий метод k-средних.* Алгоритм реализует неитерационный кластеризационный метод *k*-средних, который требует задания первоначального числа возводимых ТП. Алгоритм начинает работу с произвольного задания центров начальных кластеров с последующим определением для каждого подключаемого потребителя его принадлежности к одному из кластеров. Принадлежность определяется наименьшим расстоянием от потребителя до центра кластера. Далее производится перерасчет центров кластеров – в качестве нового центра кластера принимается центр окружности, описанной вокруг всех потребителей кластера. Алгоритм прекращает работу, когда на том или ином шаге, центры всех кластеров остаются неизменными.
  2. *Алгоритм разделительной кластеризации*. Решение задачи начинается с отыскания всех подключаемых потребителей в один кластер, который впоследствии делится на 2 два подкластера путем исключения из него наиболее длинных связей между объектами. Алгоритм прекращает работу, когда для каждого полученного кластера будут выполнены условия возможности нахождения такой точки – места строительства новой ТП, что для всех потребителей кластера будет обеспечено условие возможности подключения к сети энергоснабжения.
  3. *Эвристический алгоритм.* Алгоритм начинает работу с произвольного выбора одного из подключаемых потребителей и последующего отыскания вокруг него максимального числа потребителей таких, что имеется возможность нахождения точки – места строительства новой ТП, такой, что для всех потребителей группы будет обеспечена возможность подключения к сети энергоснабжения.

***Подзадача 2***. Исходными данными для подзадачи являются сведения об исходной топологии сети энергоснабжения и подключаемых потребителях, а также множество ТП и РП, определенных в ходе решения подзадачи 1.

* 1. *Эвристический алгоритм ограниченного перебора*. Разработанный эвристический алгоритм относится к классу так называемых «жадных» алгоритмов, в котором на каждом шаге решения делается попытка включения в вектор решения такой компоненты, вклад которой в итоговый критерий оптимальности будет наибольшим. Иными словами, на каждом шаге решения, пытаемся подключить потребителя, расстояние от которого до ТП/РП меньше, чем у всех еще неподключенных потребителей.
  2. *Генетический алгоритм.* Здесь каждому подключаемому к сети потребителю ставится в соответствие один ген хромосомы, значение которого соответствует номеру ТП/РП, к которому следует произвести подключение потребителя. Предварительно для каждого потребителя задается набор возможных вариантов подключения.
  3. *Построение диаграмм Вороного*. В этом случае производится геометрическое разбиение области с подключаемыми потребителями на такие сектора, что для всех точек каждого сектора справедливо утверждение: расстояние от точки до элемента-центра сектора ближе, чем до центра любого другого элемента плоскости.

***Подзадача 3***: Исходными данными для подзадачи является набор ТП, построенных в ходе решения подзадачи 1. Требуется найти вариант подключения новых ТП к сети энергоснабжения.

Для решения подзадачи 3 реализован генетический алгоритм, в котором каждой новой ТП соответствует два гена хромосомы, значения которых определяют номера ТП/РП, к которым следует произвести подключение новой ТП. Предварительно для каждой новой ТП задается множество таких возможных вариантов.

**САПР «ELNET»**

ELNET позволяет создавать, корректировать, просматривать и выводить на печать модели городских сетей энергоснабжения. Также система позволяет производить расчет параметров элементов сетей, находить оптимальные варианты развития сети энергоснабжения с учетом перспектив развития города. ELNET обладает удобным интерфейсом взаимодействия пользователя с системой и системой визуализации моделей сетей.

Электротехнические расчеты в ELNET производятся по методикам, предложенным в [5, 6] и удовлетворяют требованиям Правил устройства электроустановок, Указаний по расчету электрических нагрузок, Инструкции по проектированию городских электрических сетей, Методическим рекомендациям по проектированию развития энергосистем.

В основу математического аппарата ELNET положены методы решения задачи, основанные на декомпозиции задачи на три подзадачи [7], а также метод редукции задачи к совокупности трех вложенных задач глобальной минимизации [8]. Для решения каждой из подзадач разработаны оптимизационные алгоритмы (алгоритм ограниченного перебора, генетический алгоритм, параллельный пороговый алгоритм кластеризации, алгоритм кластеризации *k*-средних), выполнен анализ их эффективности.

ELNET состоит из шести следующих модулей (рисунок 2).

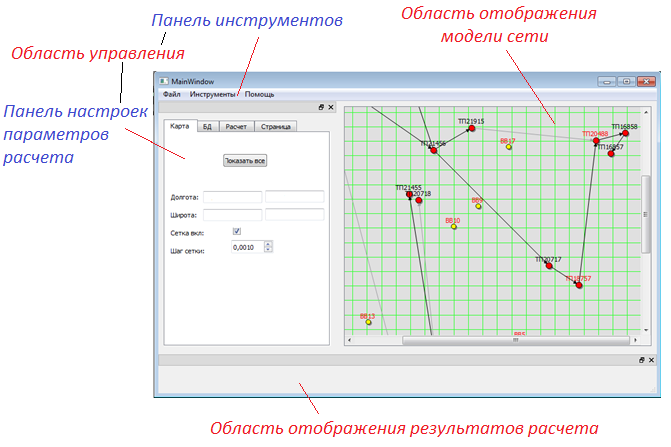


**Рис. 2.** Схема взаимодействия модулей ПК

- информационные связи; - управляющие команды

*Графический модуль* реализует оконный интерфейс взаимодействия «пользователь-система». Модуль также отвечает за визуализацию схемы сети. *Модуль управления (диспетчер)* предназначен для взаимодействия всех модулей системы между собой. Он обрабатывает полученные команды/запросы модулей и координирует процесс решения задачи посредством выработки управляющих сигналов. Модуль также отвечает за ведение журнала операций и сообщений об ошибках. *Модуль ввода/вывода данных* выполняет функции считывания и временного хранения сведений о сети энергоснабжения. Кроме того, после завершения решения задачи модуль формирует итоговый текстовый файл. *Модуль решений подзадач* является основным вычислительным модулем ELNET, который реализует методы и алгоритмы решения задачи. *Модуль расчета параметров сети* предназначен для расчета параметров сети, проверки условий выполнения ограничений, расчета значения целевой функции и т. д. В данный модуль вынесены все расчеты, общие для методов и алгоритмов решения подзадач. *База справочных данных* содержит справочные данные, необходимые для расчета режимов режима сетей, а также параметры методов и алгоритмов решения задачи.

ELNET обладает графическим интерфейсом, позволяющим осуществлять контроль и настройку необходимых значений параметров расчетов, а также отображать результаты расчетов. Экранная форма ELNET состоит из трех основных областей: *область управления*, состоящая из панели инструментов и панели настроек параметров расчета; *область отображения модели сети* и *область отображения результатов вычислений* (рисунок 3).



**Рис. 3.** Экранная форма САПР «ELNET»

**Заключение**

Применение ELNET для решения задачи перспективного развития сетей энергоснабжения позволит существенно сократить время получения и сравнения вариантов развития сети и, следовательно, дает возможность получения оптимального решения за приемлемый срок.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Ананичева С.С., Калинкина М.А. Практические задачи электрических сетей: Учебное пособие. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – 112 с.
2. [Chow J.H., Wu F.F., Momoh J.A. (eds) Applied mathematics for restructured electric power systems. Optimization, control, and computational intelligence](http://www.twirpx.com/file/1185613/). – Springer Science, 2005. – 342 p.
3. Карпенко А. П., Кузьмина И. А. Формализация и постановка задачи проектирования городской сети энергоснабжения при учете ее перспективного развития. Наука и образование, 2014. №5. (<http://technomag.bmstu.ru/doc/709781.html>).
4. Карпенко А. П., Кузьмина И. А. Методы решения задачи перспективного развития распределительной городской сети электроснабжения. Наука и образование, 2014. №10. (<http://technomag.bmstu.ru/doc/727891.html>).
5. Карпов Ф.Ф., Козлов В.Н. Справочник по расчету проводов и кабелей, изд. 2-е. М.–Л., издательство «Энергия», 1964. – 224.
6. Справочник по проектированию электрических сетей. Издание 2-е. Под редакцией Д.Л. Файбисовича. – М.: НЦ ЭНАС, 2006. – 349 с.
7. Черноруцкий И.Г. Методы принятия решений. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 416 с.
8. Экономическая кибернетика: Учебное пособие. – Донецк: Донецкий государственный университет, 1999. – 397 с.