ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ РАЗВИТИЯ СИСТЕМООБРАЗУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Попова О.М., Драчев П.С.

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д.130
olgapopovaisem@bk.ru, pavel_fm@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены два подхода к обоснованию долгосрочного развития системообразующей электрической сети. Показано место разработанного прототипа программно-вычислительного комплекса в условиях интеллектуальной ЭЭС. Отмечены особенности методики, базирующейся на принципе максимизации общественного благосостояния. Приведены возможности использования геоинформационных технологий.

Ключевые слова: системообразующая электрическая сеть, оптимизация, геоинформационные технологии.

Введение

Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы (ЭЭС) [1], одобренная ОАО "Федеральная сетевая компания ЕЭС", рассматривает такую систему, в которой все субъекты электроэнергетического рынка (генерация, сеть, потребители) принимают активное участие в процессах передачи и распределения электроэнергии. Ведущая роль при модернизации электроэнергетики отводится электрической сети как структуре, обеспечивающей надежные связи генерации и потребителя [2]. В составе интеллектуальной ЭЭС электрическая сеть из пассивного устройства транспорта и распределения электроэнергии превращается в активный элемент, параметры и характеристики которого изменяются в реальном времени в зависимости от режимов работы энергосистемы. Такую сеть называют активно-адаптивной электрической сетью.

В ИСЭМ СО РАН разработан прототип программно-вычислительного комплекса (ПВК) для решения задачи оптимизации структуры системообразующей электрической сети (СЭС) [3]. В связи с актуальностью концепции интеллектуальной ЭЭС необходимо учитывать принципы ее создания при развитии ПВК. Для решения долгосрочных задач развития СЭС, функционирующей на межсистемном (региональном) уровне, разработана методика, базирующаяся на принципе максимизации общественного благосостояния, способная учесть особенности электроэнергетического рынка.

Для эффективного решения задач развития ЭЭС необходимо не только проводить оптимизационные расчеты, но и иметь набор программных средств, позволяющих наглядным образом обрабатывать и анализировать разнородную пространственно-координированную информацию. В настоящей работе сделан акцент на использовании в составе ПВК геоинформационных технологий. С позиций управления геоинформационные технологии предполагают проектирование и поддержку принятия решений, а визуализация существенно облегчает восприятие проектировщиком схем сети, обеспечивает учет территориальных и структурных особенностей СЭС при определении принципов ее развития, а также позволяет осуществлять контроль правильности формирования схем.

1 Прототип ПВК для решения задачи оптимизации структуры СЭС

Прототип программного комплекса для задачи развития СЭС в условиях интеллектуальной ЭЭС выстраивается по следующей схеме:

- Проблема создания интеллектуальной ЭЭС
  - автоматический контроль поузлового баланса активной и реактивной мощности;
  - система контроля и управления напряжением в контрольных точках сети;
  - наличие сетевых элементов, изменяющих топологию сети по управляющим воздействиям;
  - система контроля загрузки критических сечений и выдачи управляющих воздействий для их разгрузки.
- Задача оптимизации развития системообразующей электрической сети
  - ввод (подготовка), контроль исходных данных, формирование варианта сети;
  - решение задачи оптимизации структуры СЭС;
  - анализ и вывод полученных результатов.
- Прототип программно-вычислительного комплекса
  - программная реализация выбранных вариантов сети.

Проблема развития СЭС реализована в виде задачи поиска минимального потока на графе с целевой функцией [4]

$$\min\left(\sum_i\sum_j C_{ij}^{\text{нов.сеть}} X_{ij}^{\text{нов.сеть}} + \sum_i C_i^{\text{ген}} X_i^{\text{ген}}\right), \qquad (1)$$

т.е. минимум приведенных затрат при соблюдении балансов узлов ($i = 1, N$):

$$X_i^{\text{ген}} + \sum_j (1 - p_{ij}) X_{ji}^{\text{сеть}} - \sum_j X_{ij}^{\text{сеть}} = P_i^{\text{потр}}, \qquad (2)$$

где перетоки мощности по всем элементам СЭС удовлетворяют условиям $0 \le X_{ij}^{\text{сеть}} \le X_{ij}^{\text{сущ.сеть}} + X_{ij}^{\text{нов.сеть}}$ с ограничениями на потоки мощности по существующим, новым элементам СЭС ($P_{ij}^{\text{сущ.сеть}}$, $P_{ij}^{\text{нов.сеть}}$), в сечениях ($P_I^{\text{пред}}$) и на располагаемые мощности станций:

$$0 \le X_{ij}^{\text{сущ.сеть}} \le P_{ij}^{\text{сущ.сеть}}, \quad 0 \le X_{ij}^{\text{нов.сеть}} \le P_{ij}^{\text{нов.сеть}}; \qquad (3)$$

$$0 \le X_i^{\text{ген}} \le P_i^{\text{ген}}, \qquad (4)$$

$$0 \le \sum_{X_{ij}^{\text{сеть}} \in I} X_{ij}^{\text{сеть}} \le P_I^{\text{пред}}. \qquad (5)$$

Неизвестными величинами являются $X_{ij}^{\text{сущ.сеть}}, X_{ij}^{\text{нов.сеть}}$ (потоки мощности по существующим и новым элементам СЭС между узлами i и j) и мощности генерации в узлах $X_i^{\text{ген}}$. В (2) p_{ij} – удельный коэффициент потерь мощности при передаче по связи между узлами i и j. В качестве ограничений по пропускной способности сечений ($P_I^{\text{пред}}$) на первом этапе оптимизации используется сумма пропускных способностей связей, входящих в сечение.

Исходные данные для линейной модели оптимизации развития СЭС (1) – (5), импортируемые из базы данных Elnetworks, включают: избыточный граф электрической сети, описывающий все существующие и новые электрические связи в выбранном варианте, рабочие мощности станций $P_i^{\text{ген}}$, мощности нагрузок в узлах ($P_i^{\text{потр}}$) и пропускные способности элементов СЭС ($P_{ij}^{\text{сеть}}$). На основе паспортных данных оборудования для каждой электрической связи (трансформатора и линии электропередач) рассчитываются удельные приведенные затраты на единицу передаваемой мощности по элементам СЭС ($C_{ij}^{\text{нов.сеть}}$). Для узлов графа, в которых размещены электрические станции, рассчитываются удельные переменные затраты на генерируемую мощность ($C_i^{\text{ген}}$).

Компонентами программного обеспечения ПВК, предназначенного для реализации алгоритма, являются основная программа ElNetCut, база данных Elnetworks, система GAMS, предназначенная для решения задач математического программирования и пакет MapInfo Professional, используемый в качестве ГИС-инструментария.

В связи с постановкой задачи оптимизации структуры системообразующей электрической сети ЭЭС, рассмотренной в [4, 5], существенное значение для прототипа является формирование варианта сети. Прежде всего, необходимо осуществить ввод и контроль исходных данных. Сначала в основной программе ElNetCut выбирается необходимая работа над вариантом. При этом, если необходимо создать вариант с "нуля", то последовательно формируются необходимые таблицы в базе данных Elnetworks [6]. При редактировании таблиц выбранного варианта СЭС (рис. 1) вызываются и отображаются соответствующие таблицы базы данных, и далее производятся необходимые действия по их содержанию. Здесь пользовательский интерфейс отражает взаимодействие основной программы с СУБД MySQL.

Таблицы БД разделены на четыре крупные группы:

- словари объектов ЭЭС и дополнительных показателей;
- развернутые реквизиты выделенных объектов ЭЭС по вариантам;
- паспортные данные объектов ЭЭС;
- режимы объектов ЭЭС по вариантам.

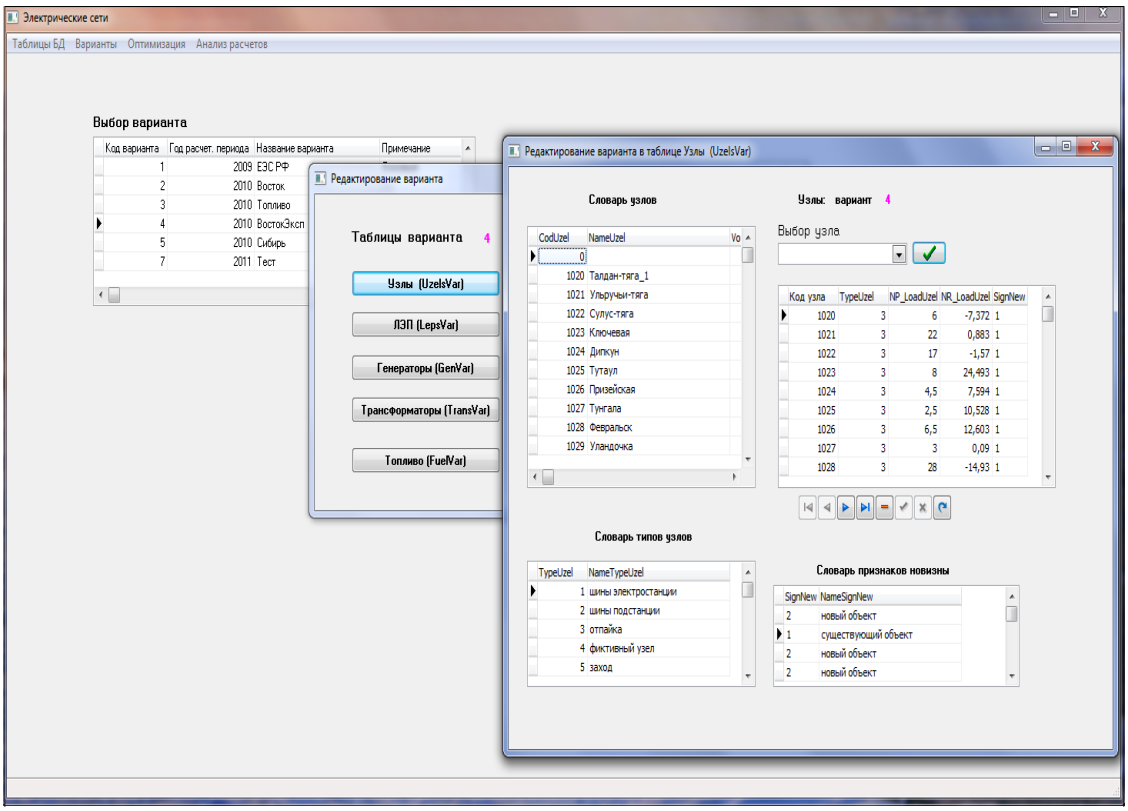

Рис. 1. Редактирование таблиц варианта СЭС в базе данных

После проверки подготовленных данных необходимая отформатированная информация посылается в систему GAMS для непосредственного решения задачи оптимизации структуры сети. Полученные результаты выводятся как в текстовом режиме, так и в графическом (картографическом) виде с помощью пакета MapInfo Professional (рис.2).

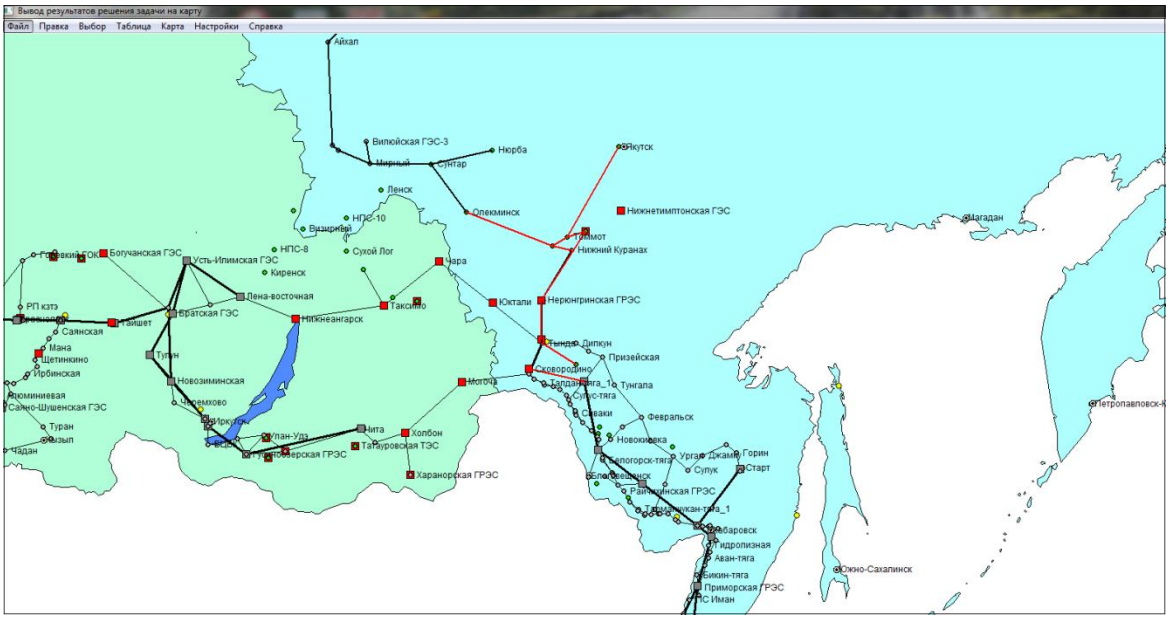

Рис. 2. Вывод информации в картографическом виде

Причем эта информация используется как для исследования сходимости алгоритма оптимизации (1)–(5), так и для отображения конечных результатов. Применение различных видов визуализации промежуточных и конечных результатов решения задачи оптимизации структуры системообразующей электрической сети способствует уточнению исходной информации по выбранным вариантам сети, а также ускорению процесса работы компьютерных программ, входящих в состав ПВК.

2 Методика обоснования развития СЭС

Наряду с созданием прототипа программного комплекса для задачи развития СЭС проведено исследование для обоснования долгосрочного развития СЭС и разработана методика, базирующаяся на принципе максимизации общественного благосостояния, способная учесть особенности электроэнергетического рынка [7]. Методика включает 3 основных этапа – формирование исходных данных, технический анализ системы и оптимизация сети.

Целевая функция:

$$\sum_{n,t} \tau_t^{\text{реж}} \int_0^{C_{nt}} f_{nt}(C)dC - \sum_{n,k} \left(K_{nk}^{\text{ЛЭП}} E + \text{И}_{nk}^{\text{ЛЭП}}\right) Q_{nk} \to \max_{C,S,Q}, \qquad (6)$$

где i – генераторы, n – узлы, t – режимы ЭЭС, S_{nit} – загрузка электростанции, $S=\{S^{\text{ТЭЦ}},S^{\text{КЭС}},S^{\text{ГЭС}},S^{\text{АЭС}}\}$, C_{nt} – нагрузка потребителя, Q_{nk} – число новых цепей ЛЭП (целочисленная переменная); постоянные: λ_{nit} – удельные переменные затраты электростанции, $f_{nt}(C)$ – функции спроса, $\tau_t^{\text{реж}}$ – длительность режима t в году, E – коэффициент дисконтирования, $K_{nk}^{\text{ЛЭП}}$ – инвестиции в ЛЭП, $\text{И}_{nk}^{\text{ЛЭП}}$ – эксплуатационные издержки новых ЛЭП;

при условии соблюдения узловых балансов мощности (1-й закон Кирхгофа)

$$\sum_i S_{nit} - \sum_k L_{nkt} + \sum_k L_{knt}(1 - \mu_{kn} g_{kn}) = C_{nt}, \qquad n\epsilon N, t\epsilon T, \qquad (7)$$

где Lnkt– поток мощности по ЛЭП, μnk– коэффициент потерь электроэнергии, gnk– длина ЛЭП.

Математическая формулировка данной задачи включает также ограничения на загрузку ТЭЦ, КЭС, ГЭС, АЭС, ограничения на потребляемую мощность и на пропускную способность ЛЭП.

Функционал модели включает суммарное общественное благосостояние и дисконтированные затраты на развитие ЛЭП. Первая составляющая является аналогом общей прибыли, возникающей в системе народного хозяйства, и складывающейся из прибыли от сбыта электроэнергии и потребительского эффекта, достигаемого за счет разницы между ценой, которую он готов заплатить за электроэнергию, и реальной сложившейся ценой. Вторая составляющая состоит из капитальных и эксплуатационных затрат новых ЛЭП, приведенных к единому интервалу времени (дисконтированные).

В качестве практической реализации рассмотренной методики, поставлена задача развития единой национальной электрической сети (ЕНЭС) России (рис. 3) на периоды с 2015 по 2020 гг. и с 2020 по 2025 гг. Смоделировано три сценария электропотребления – минимальный рост (0,5% в год), средний (3%) и максимальный (5%).

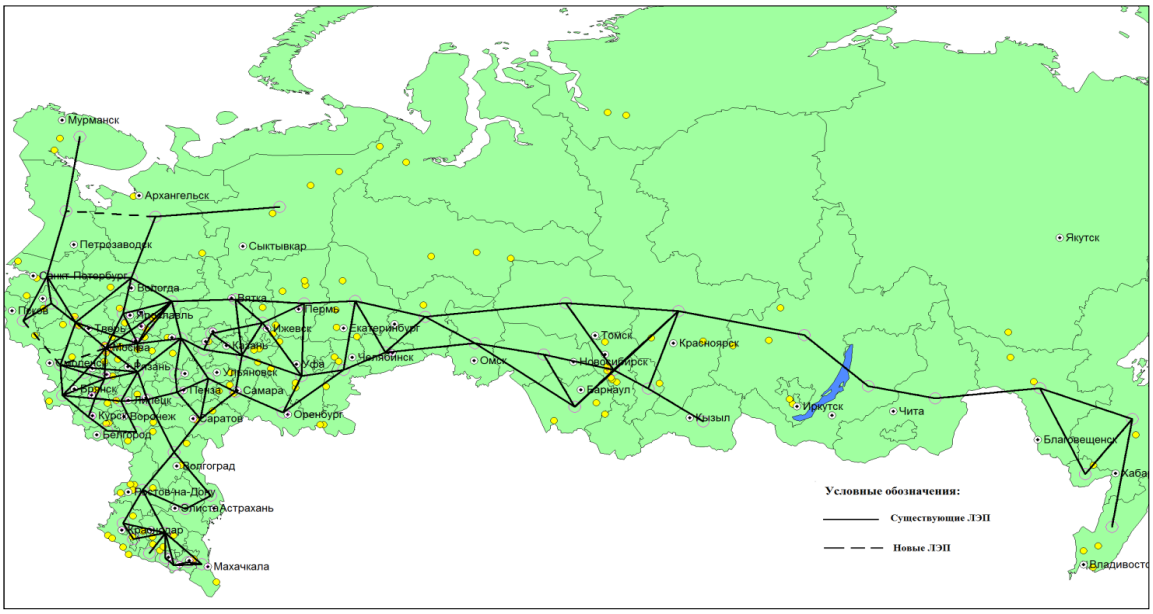

Рис.3. Схема ЕНЭС России

Следует отметить, что отображение СЭС в этой задаче отличается от вывода результатов решения предыдущей задачи оптимизации структуры сети в графическом (картографическом) виде. Структура

сети в данном случае представлена в агрегированном виде и по существу отображает электрические связи между субъектами Российской Федерации.

Заключение

Использование геоинформационных технологий при решении задачи оптимизации структуры системообразующей электрической сети позволит обеспечить принятие обоснованных и взаимоувязанных управленческих решений, снизит вероятность ошибок проектирования вследствие влияния «человеческого фактора», обеспечит сокращение затрат времени на разработку и корректировку схем и программ развития электроэнергетических систем субъектов Российской Федерации.

Работа выполнена в рамках проекта государственного задания № FWEU-2021-0001 программы фундаментальных исследований РФ на 2021-2030 гг. (рег. № АААА-А21-121012190027-4).

Литература

1. Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы России с активно-адаптивной сетью. – М., ОАО "ФСК ЕЭС", 2012. – 219 с.
2. Обоснование развития электроэнергетических систем: Методология, модели, методы, их использование / Н.И. Воропай, С.В. Подковальников, В.В. Труфанов и др.; отв. ред. Н.И. Воропай. – Новосибирск: Наука, 2015. – 448 с.
3. *Попова О.М.* Разработка прототипа программно-вычислительного комплекса для задачи развития системообразующей электрической сети с учетом требований интеллектуальной ЭЭС. // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 2(14). – С. 142 - 150.
4. *Попова О.М, Усов И.Ю.* Оптимизация развития системообразующей электрической сети с помощью геоинформационных технологий // Проблемы управления. 2010. № 4. – С. 66–73.
5. *Попова О.М.* Развитие программно-вычислительного комплекса для решения задачи оптимизации структуры системообразующей сети электроэнергетических систем // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2017. № 1(5). – С. 102 - 111.
6. *Усов И.Ю., Попова О.М.* Формирование базы данных для оптимизации структуры системообразующей электрической сети // Вестник ИрГТУ. 2013. № 1. С. 139–144.
7. *Драчев П.С.* Совершенствование методики обоснования перспективного развития системообразующей электрической сети: дисс. … канд. тех. наук. Иркутск, 2017. 160 с.