

DOI:
**ОСОБЕННОСТИ ВЫВОДА РЕЗУЛЬТАТОВ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ
СТРУКТУРЫ СИСТЕМООБРАЗУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ**

Попова О.М.

*Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д.130
pom@isem.irk.ru*

Аннотация: В работе рассматриваются варианты вывода результатов решения задачи оптимизации на основе использования прототипа программно-вычислительного комплекса для задачи развития системообразующей электрической сети с учетом требований интеллектуальной ЭЭС. Выходные данные показаны в табличном и картографическом виде.

Ключевые слова: системообразующая электрическая сеть, оптимизация, программно-вычислительный комплекс, прототип.

Введение

Процесс развития электроэнергетики связан с формированием электроэнергетических систем, представляющих совокупность объектов (генераторов, трансформаторов, линий электропередач, установок электропотребителей, средств регулирования и управления), которые предназначены для производства, передачи, распределения и использования электрической энергии. Реализация этого процесса в значительной степени зависит от сооружения электропередач системообразующей электрической сети, которая выполняет три главные функции: выдачу мощности крупных электростанций, электроснабжение крупных узлов нагрузки (промышленных агломераций, мегаполисов и др.) и осуществление совместной работы энергосистем в составе Единой энергетической системы (ЕЭС) России [1, 2, 3].

Для решения задач развития электроэнергетических систем в России и за рубежом используются различные модели оптимизации структуры электрической сети. Из зарубежных систем моделирования можно выделить такие крупные системы, как Power World Simulation [4], EXTRA (Expansion of Transmission) [5]. Эти и ряд других западных систем служат для комплексного анализа и прогнозирования развития моделируемых региональных или национальных электроэнергетических систем, широко используются геоинформационные технологии.

В нашей стране проектированием развития электрических сетей занимаются АО «Институт Энергосетьпроект», а также ОАО «Федеральная сетевая компания ЕЭС» (ФСК). При проектировании для анализа вариантов развития электроэнергетических систем и системообразующей электрической сети в основном используются модели оценочного (балансового) типа.

В ИСЭМ СО РАН разработан прототип программно-вычислительного комплекса (ПВК) для решения задачи оптимизации структуры системообразующей электрической сети (СЭС) [6]. Состав ПВК, его информационное и программное обеспечение подробно рассмотрены в работе [7]. В связи с актуальностью концепции интеллектуальной ЭЭС необходимо учитывать принципы ее создания при развитии ПВК, одним из которых является разработка различных прототипов.

Место разрабатываемого прототипа в условиях интеллектуальной ЭЭС показано на рис. 1.

1 Постановка задачи оптимизации структуры СЭС

Алгоритм оптимизации структуры СЭС в электроэнергетических системах является основой второй версии программно-вычислительного комплекса (ПВК), разрабатываемого в ИСЭМ СО РАН для решения задачи определения совокупности рациональных вариантов развития СЭС на этапе предпроектных исследований в средне- и долгосрочной перспективе (10-20 лет) [6].

Компьютерная реализация рассматриваемой задачи включает три крупных блока:

- ввод (подготовка) и контроль исходных данных, формирование варианта сети;
- решение задачи оптимизации структуры СЭС;
- анализ и вывод полученных результатов.

Реализация перечисленных блоков сопровождается визуализацией промежуточных и конечных результатов решения поставленной проблемы. Компонентами программного обеспечения являются основная программа EInetCut, база данных Elnetworks, система GAMS, предназначенная для решения задач математического программирования и пакет MapInfo Professional, используемый в качестве ГИС-инструментария.

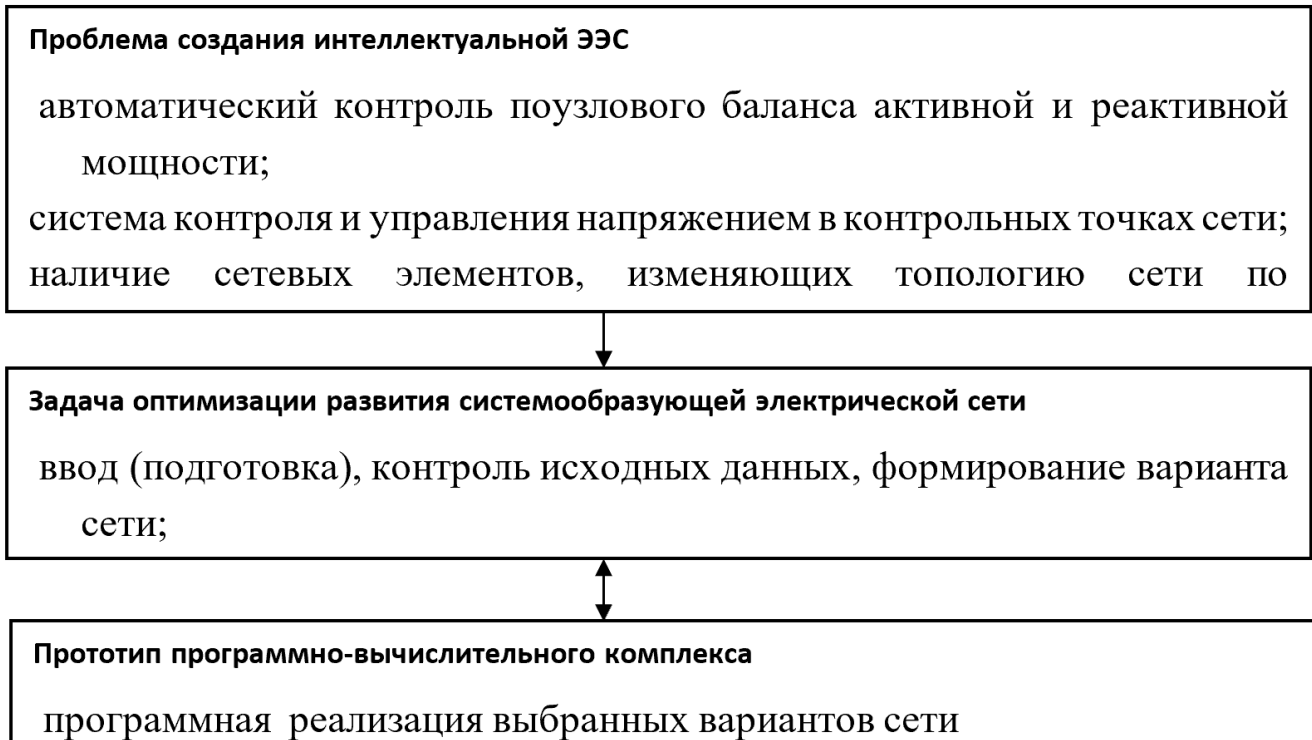


Рис. 1. Прототип программного комплекса для задачи развития СЭС в условиях интеллектуальной ЭЭС

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

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

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

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

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

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

$$(4) 0 \leq \sum_{X_{ij}^{\text{сеть}} \in I} X_{ij}^{\text{сеть}} \leq P_t^{\text{пред}};$$

$$(5) 0 \leq X_i^{\text{ген}} \leq P_i^{\text{ген}}.$$

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 ($P_t^{\text{пред}}$) 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 ($C_i^{\text{ген}}$).

На рис. 2 приведена блок-схема алгоритма оптимизации структуры СЭС, реализованного в программно-вычислительном комплексе [8].

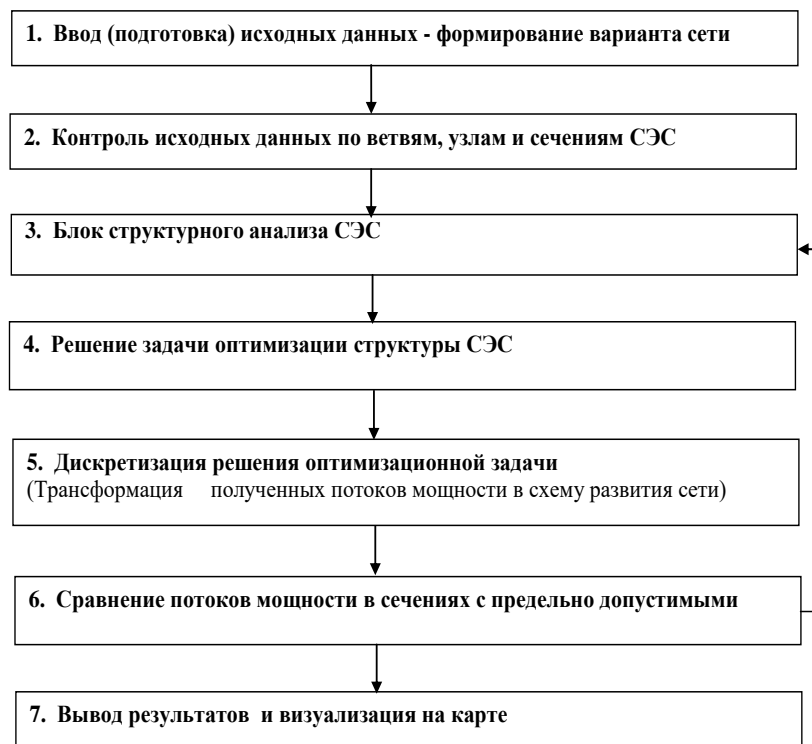


Рис.2. Блок-схема алгоритма оптимизации структуры СЭС

2 Вывод результатов работы программно-вычислительного комплекса

Для решения данной проблемы в основном сформирована единая БД Elnetworks. Предварительно проведено проектирование БД, в результате которого определены состав необходимых таблиц БД и связи между ними. Таблицы БД разделены на четыре крупные группы:

- словари объектов электроэнергетических систем (ЭЭС) и дополнительных показателей;
- развернутые реквизиты выделенных объектов ЭЭС;
- паспортные данные объектов ЭЭС;
- режимы объектов ЭЭС.

В группе «Словари» размещены коды и описание основных групп объектов, видов их территориальной и технологической принадлежности.

Группа «Варианты» содержит описание базовых состояний схем СЭС единой энергосистемы или ее части (ОЭС, РЭЭС), для которых планируется проведение оптимизационных расчетов. Эти состояния представляют совокупность всех существующих и возможных к строительству генерирующих и потребляющих узлов, а также схему их соединения посредством всех возможных в рассматриваемом варианте существующих и новых элементов электрической сети с указанием типа энергетического оборудования. В этой группе также задана информация о значении постоянных величин (коэффициента запаса по статической устойчивости в сечении, базисного напряжения, коэффициента минимального потока ввода по новой ЛЭП и др.), используемых в процессе расчета.

Номинальные данные о параметрах типового электрического и энергетического оборудования энергосистем (мощности, сопротивлении, стоимости и др.) содержатся в группе «Паспорта».

Группа таблиц «Режимы» содержит данные о состоянии и загрузке оборудования в рассматриваемом режиме соответствующего варианта. В таблицы указанной группы осуществляется запись результатов оптимизационного расчета СЭС, включая перечень новых элементов электрической сети, требуемых к сооружению.

В связи с постановкой задачи оптимизации структуры системообразующей электрической сети ЭЭС существенное значение для создаваемого прототипа является формирование варианта сети. Прежде всего, необходимо осуществить ввод и контроль исходных данных. Далее в основной программе ElNetCut выбирается необходимая работа над вариантом. При этом, если необходимо создать вариант с "нуля", то последовательно формируются необходимые таблицы в БД Elnetworks (рис.3).

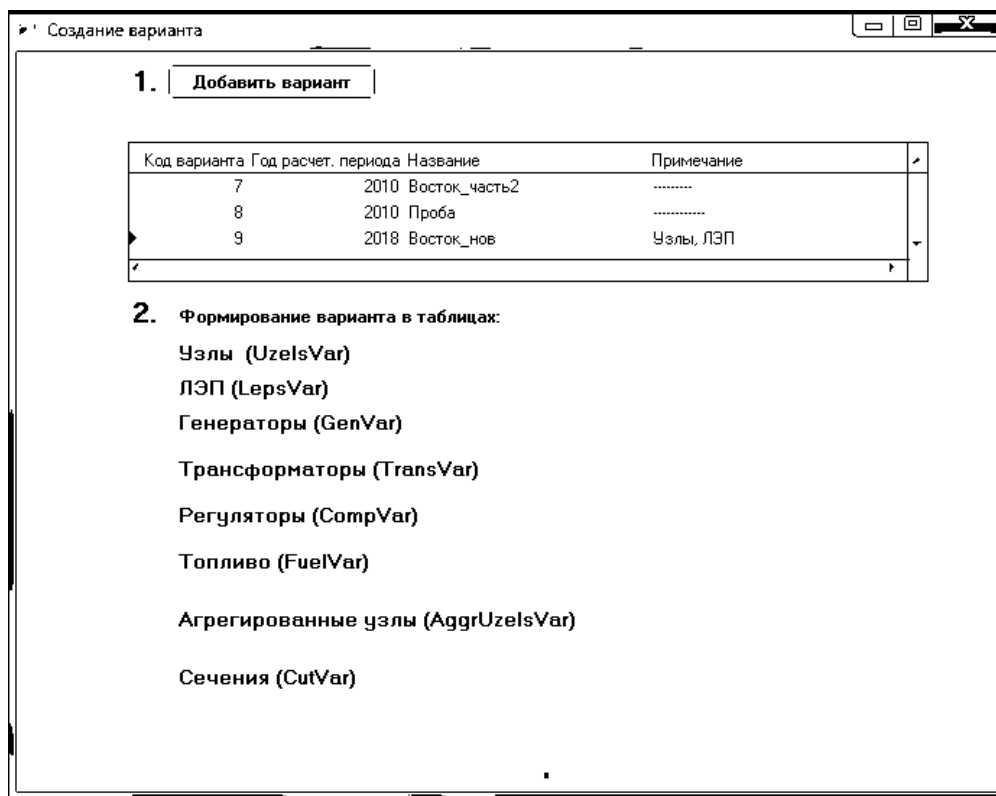


Рис.3. Формирование таблиц выбранного варианта СЭС в базе данных

Визуализация результатов в процессе работы компьютерной программы ElNetCut на этапе подготовки варианта СЭС в соответствии с постановкой задачи осуществляется в табличном виде. На экран выводятся данные, необходимые для проведения оптимизации структуры СЭС (рис. 4).

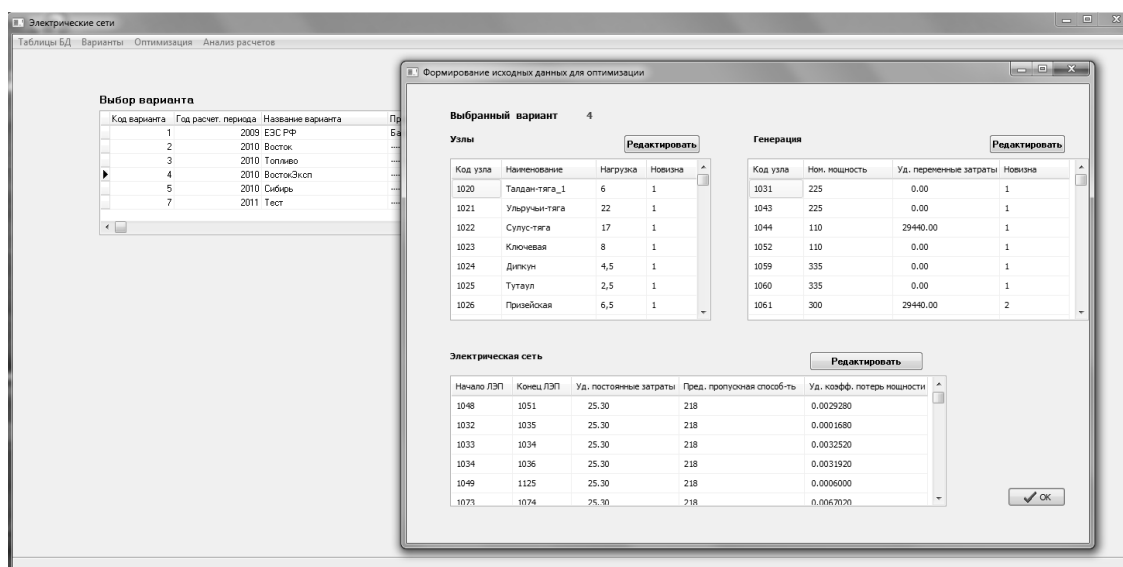


Рис. 4. Вывод табличных данных для решения задачи оптимизации структуры СЭС

Особое значение визуализация полученной информации имеет на этапе непосредственного решения задачи оптимизации структуры сети, где используется система GAMS. Необходимые данные

выводятся как в текстовом режиме, так и в графическом (картографическом) виде с помощью пакета MapInfo Professional. Причем эта информация используется как для исследования сходимости алгоритма оптимизации, так и для отображения конечных результатов. На рис. 5 приведен пример картографического вывода конечных результатов решения задачи для одного из вариантов электрической сети.

Использование разработанного прототипа программно-вычислительного комплекса для задачи развития системообразующей электрической сети [9] позволит в условиях создания интеллектуальной ЭЭС осуществить эволюционный подход к дальнейшему развитию ПВК, а именно последовательно решать проблемы информационного обеспечения ПВК, совершенствовать программное обеспечение и пользовательский интерфейс задачи.

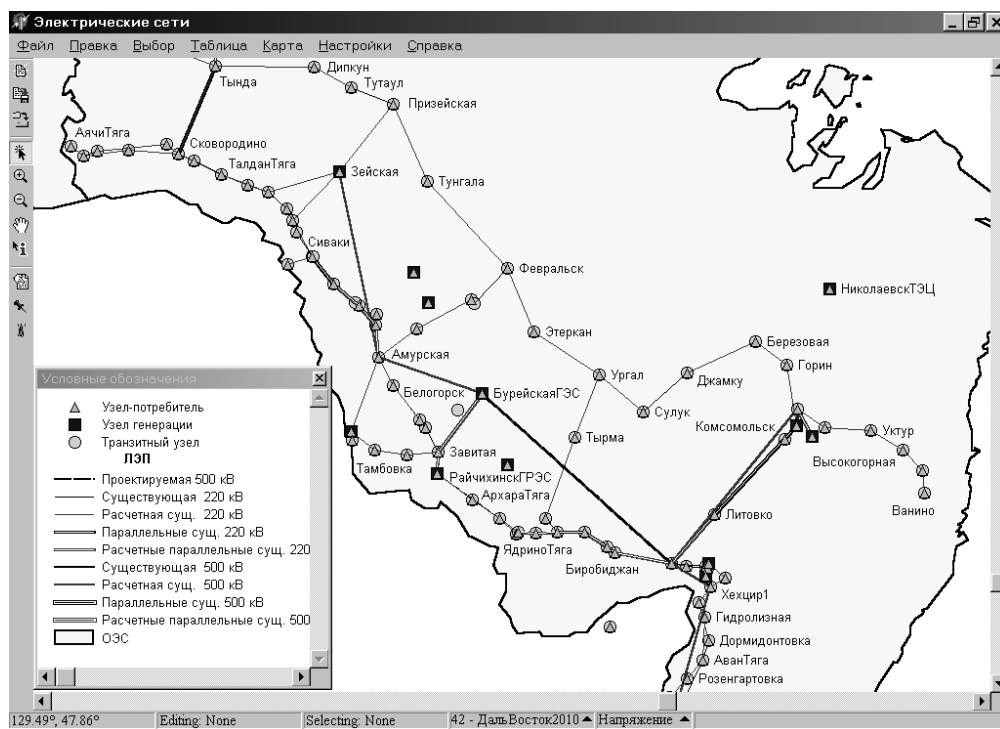


Рис. 5. Вывод информации в картографическом виде

Работа выполнена в рамках проекта государственного задания Ш.17.4.2. (рег. № АААА-А17-117030310438-1) фундаментальных исследований СО РАН.

Литература

1. 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.
2. Теоретические основы, методы и модели управления большими электроэнергетическими системами / отв. ред. Н.И. Воропай. – М., ПАО "ФСК ЕЭС", 2015. – 188 с.
3. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича. М.: ЭНАС, 2009. – 392 с.
4. PowerWorld Corporation. Режим доступа: <https://www.powerworld.com> (дата обращения 22.01.2017).
5. Energie ist Zukunft. Режим доступа: <http://www.lahmeyer.de/energie.html> (дата обращения 22.01.2017).
6. Попова О.М, Усов И.Ю. Оптимизация развития системообразующей электрической сети с помощью геоинформационных технологий // Проблемы управления. 2010. № 4. – С. 66–73.
7. 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.
8. Попова О.М. Особенности информационного и программного обеспечения задачи оптимизации структуры системообразующей сети электроэнергетических систем. / Сборник

научных трудов «Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2014)». – М.: ИПУ РАН, 2014. – С. 199-204.

9. *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.