

ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗВИТИЯ СИСТЕМОБРАЗУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ С ПОМОЩЬЮ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ¹

О.М. Попова, И.Ю. Усов

Дана методика решения задачи оптимизации развития системообразующей электрической сети электроэнергетической системы. Представлен состав соответствующего программно-вычислительного комплекса. Приведены показатели структурного анализа электроэнергетических систем. Показаны особенности применения геоинформационных технологий.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, оптимизация развития, структурный анализ, геоинформационная система.

ВВЕДЕНИЕ

Исторически развитие электроэнергетики связано с формированием электроэнергетических систем (ЭЭС), представляющих собой совокупность объектов (генераторов, трансформаторов, линий электропередач, установок электропотребителей, средств регулирования и управления), которые предназначены для производства, передачи, распределения и использования электрической энергии. Оно в значительной степени зависит от сооружения системообразующей электрической сети (СЭС), 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 России. Элементами СЭС служат, как правило, линии электропередачи и трансформаторы напряжением 330 кВ и выше.

При обосновании развития СЭС электроэнергетических систем формируется совокупность наиболее экономичных вариантов ее развития, осуществляется их технико-экономическое сопоставление и выбирается наилучшее решение для последующе-

го рабочего проектирования, строительства и ввода в эксплуатацию сетевых объектов.

С учетом территориально-временного аспекта управления развитием ЭЭС [1, 2] выделяются две основные последовательно решаемые задачи:

- оптимизация перспективной структуры СЭС с формированием наиболее экономичных вариантов ее развития и общей оценкой ресурсов (финансовых, технических и др.), требуемых для их реализации;
- технико-экономическое сравнение и выбор наиболее рациональных схем развития СЭС.

Первая из этих задач решается на уровне Единой национальной электрической сети (ЕНЭС) и СЭС объединенных энергосистем при сформированной структуре генерирующих мощностей на перспективу 15–20 лет. Вторая задача решается на межрегиональном и региональном уровнях на основе уточненной исходной информации с привлечением оценочных экономических моделей развития и детальных моделей физических процессов ЭЭС (расчет режимов, устойчивости, надежности) на перспективу 7–15 лет.

Поскольку методическое обеспечение решения второй задачи достаточно разработано [3–5], представленный в настоящей работе методический подход ориентирован на решение первой задачи.

В разные годы у нас в стране и за рубежом был разработан ряд математических моделей оптимизации развития электрической сети [6–11]. Эти

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 10-07-00264).



модели учитывают дискретный характер ввода новых элементов сети, и поэтому имеют ограничение на число рассматриваемых в них новых связей (линий электропередач). Еще один недостаток заключается в упрощенном учете ограничений на пропускную способность ветвей графа, посредством которого моделируется развивающаяся электрическая сеть. В действительности пропускная способность конкретной линии электропередачи определяется не только ее конструктивными характеристиками, но и условиями статической устойчивости [12]. Эти условия для каждой линии зависят от параметров сети в целом, распределения мощности между электростанциями и других факторов.

Представленный в работе методический подход позволяет рассмотреть эффективность сооружения практически неограниченного числа новых элементов электрической сети, а также более точно, чем в существующих моделях, учесть ограничения на передаваемые в сети потоки мощности по условиям статической устойчивости.

Этот подход предполагает линейную потоковую модель оптимизации развития электрической сети в качестве основного инструмента формирования наиболее рациональных вариантов развития СЭС [11]. Применение такой модели для решения практических задач оптимизации СЭС на длительную перспективу вполне обосновано, поскольку фактор дискретности в данном случае не выступает определяющим.

Для учета условий перспективного функционирования ЭЭС (ограничений на передаваемые в электрической сети мощности по условиям статической устойчивости) применяются алгоритмы структурного анализа ЭЭС [13, 14], реализованные в виде компьютерной программы.

Кроме того, на единой платформе с линейной потоковой моделью разработан геоинформационный блок программно-вычислительного комплекса [11, 15]. Для эффективного решения задач развития ЭЭС необходимо средство, позволяющее естественным и наглядным образом обрабатывать и анализировать разнородную и пространственно-координированную информацию. Таким средством на настоящий момент времени служат геоинформационные системы (ГИС), которые как специализированные системы обработки пространственно-временных данных, а также геоинформационные технологии изучаются новым активно развивающимся направлением информатики — геоинформатикой [16, 17]. Особенности построения ГИС развивающихся электрических сетей как проблемно-ориентированной системы рассмотрены в работе [15]. В настоящей статье сделан акцент на использовании в составе программно-вычислительного комплекса геоинформационных технологий, понимаемых прежде всего как технологий сбора, хранения, обработки и представления данных [18, 19]. С позиций управления геоинформационные технологии предполагают проектирование и поддержку принятия решений. Поскольку используемая информация в основном представляется в графической форме, то эти технологии близки к технологиям визуальной обработки информации.

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, определение протяженности электрических связей и поиск соответствующих трасс прокладки линий электропередач.

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, определение протяженности электрических связей и поиск соответствующих трасс прокладки линий электропередач.

1. ПОКАЗАТЕЛИ СТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Поскольку рассмотрение детальных моделей электрических режимов в процессе оптимизации развития СЭС затруднено из-за большого числа вариантных расчетов, то для учета ограничений на передаваемые в электрической сети мощности по условиям статической устойчивости можно воспользоваться следующими показателями структурного анализа электроэнергетических систем:

— взаимные структурные мощности генераторов [13]:

$$W_{ij} = E_i E_j y_{ij}, \quad (1)$$

где E_i, E_j — переходные ЭДС генераторов в модели «шины — переходное сопротивление — переходная ЭДС» [12], а y_{ij} — взаимная проводимость между узлами, характеризуемых ЭДС E_i и E_j ;

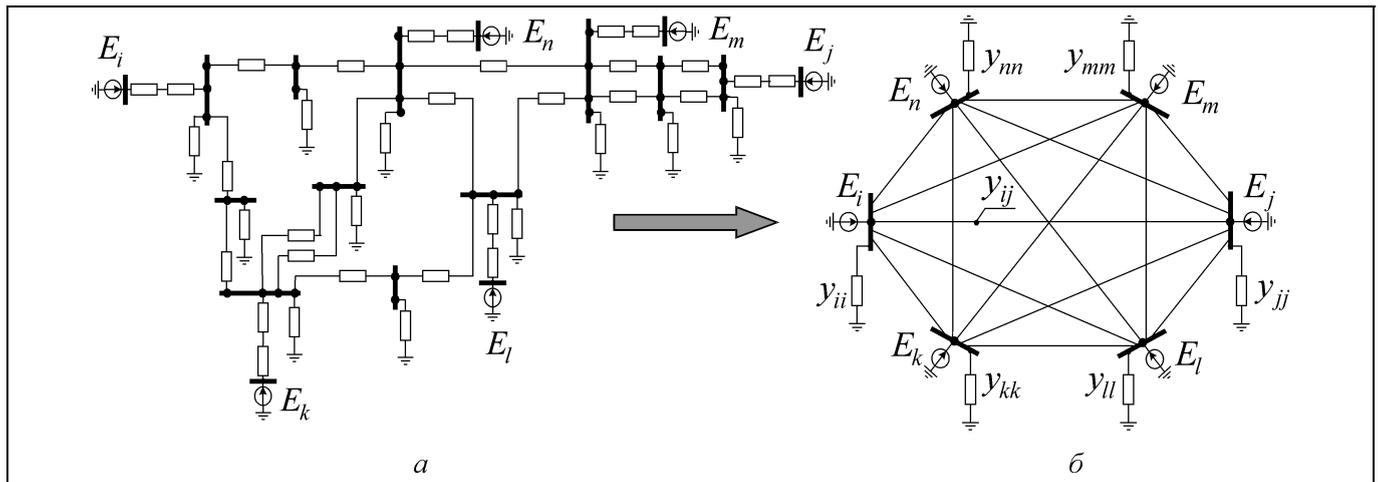
— собственные структурные мощности генераторов [13]:

$$W_{ii} = E_i^2 g_{ii}, \quad (2)$$

где g_{ii} — активная составляющая собственной проводимости узла i (y_{ii}).

Соотношения токов и напряжений схемы замещения электрической сети (рис. 1, а), в которой ее элементы представлены своими электрическими параметрами (проводимостями и ЭДС), описываются системой уравнений узловых напряжений [12]

$$[Y] \begin{bmatrix} \dot{E} \\ \dot{U} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_r \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$


Рис. 1. Схема замещения ЭЭС:

a — расчетная; *б* — эквивалентная (взаимные проводимости узлов с ЭДС изображены сплошными линиями)

где $[\dot{Y}]$ — матрица собственных и взаимных проводимостей (СВП) узлов, \dot{U} — вектор напряжений в узлах, \dot{E} — вектор переходных ЭДС в генераторных узлах, \dot{I}_r — вектор-столбец генерируемых токов в узлах.

Для определения показателей (1) и (2) схема замещения электрической сети, описываемая системой уравнений (3), приводится любым из известных методов эквивалентирования к полному графу, в вершинах которого лежат узлы с ЭДС (рис. 1, б). Эквивалентирование (преобразование исходной схемы в эквивалентную в целях упрощения дальнейшей работы с ней) осуществляется в данном случае для определения эквивалентной матрицы СВП относительно узлов с ЭДС — $[\dot{Y}_3]$.

Эта матрица, в частности, может быть получена из исходной матрицы СВП расчетной схемы замещения

$$[\dot{Y}] = \begin{bmatrix} \dot{Y}_{rr} & \dot{Y}_{cr} \\ \dot{Y}_{rc} & \dot{Y}_{cc} \end{bmatrix}$$

в соответствии с выражением

$$[\dot{Y}_3] = [\dot{Y}_{rr}] - [\dot{Y}_{rc}] [\dot{Y}_{cc}]^{-1} [\dot{Y}_{cr}],$$

где индексом «с» обозначены СВП исключаемых (сетевых) узлов, а индексом «r» — СВП остающихся (генераторных) узлов с ЭДС.

Матрица W , на диагонали которой расположены собственные мощности генераторов (W_{ii}), а остальные элементы ($W_{ij} = W_{ji}$) представляют взаимные мощности между соответствующей парой генераторов, рассчитывается по формуле

$$W = E_{\text{diag}} Y'_3 E_{\text{diag}},$$

где $[E_{\text{diag}}]$ — диагональная матрица модулей ЭДС генераторов, $[Y'_3]$ — матрица, в которой диагональные элементы представляют собой активные составляющие собственных проводимостей (g_{ii}) в матрице $[\dot{Y}_3]$, остальные элементы — модули взаимных проводимостей (y_{ij}) в той же матрице.

Полученная матрица мощностей W является структурной моделью ЭЭС и может быть использована при анализе режимов и устойчивости ЭЭС.

В процессе оптимизации развития СЭС элементы матрицы W позволяют упрощенно определить предельные по условиям статической устойчивости мощности, передаваемые в сечениях электрической сети [20]. Сечением в электрической сети называется такая совокупность ее элементов, одновременное отключение которых разделяет систему на две изолированные части (подсистемы), в каждой из которых имеется хотя бы один генератор.

Сечения, для которых рассчитывается предельная по статической устойчивости мощность, могут быть условно разделены на два типа: генераторные (когда в одной подсистеме находится один генератор) и сетевые (все остальные).

Предельная по статической устойчивости мощность для первого типа сечений

$$P_q^{\text{пред}} = (1 - k_3) W_i, \quad (4)$$

где $W_i = W_{ii} + \sum_{i \neq j} W_{ij}$ — максимальная мощность генератора, равная собственной структурной мощности и сумме взаимных структурных мощностей генератора i по всем его связям в эквивалентной схеме; k_3 — коэффициент запаса по активной



мощности в сечении, который в соответствии с методическими указаниями [20] принимается равным 0,2.

Для второго типа сечений предельная по статической устойчивости мощность в q -м сечении, разделяющем систему на подсистемы A и B при передаче потока мощности из A и B :

$$P_q^{\text{пред}} = (1 - k_3) W_q^A, \quad (5)$$

где $W_q^A = \sum_{i \in A} W_{ii} + \sum_{i \in A, j \neq A} W_{ij}$ — максимальная мощность сечения q , равная сумме собственных мощностей генераторов подсистемы A и сумме взаимных мощностей генераторов подсистем A и B , получаемая при условии

$$W_{ij} \geq \varepsilon_r P_{\text{ном}, i}^{\Gamma}, \quad (6)$$

где $P_{\text{ном}, i}^{\Gamma}$ — номинальная мощность i -го генератора подсистемы A , ε_r — малая величина, применяемая для оценки связности i -го генератора подсистемы A с генераторами подсистемы B .

Введение условия (6) позволяет рассчитать предельную по статической устойчивости мощность в сечении (4), исключив из нее собственные и взаимные мощности генераторов подсистемы A , имеющие слабые связи с подсистемой B (локальные или удаленные генераторы). В соответствии с работой [13] для генераторных узлов мощностью менее 3000 МВт значение ε_r рекомендуется принимать в интервале 0,1...0,15, а для узлов мощностью свыше 3000 МВт — в интервале 0,1...0,05.

2. МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ РАЗВИТИЯ СИСТЕМООБРАЗУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

В статической постановке предлагаемый методический подход к решению задачи оптимизации развития СЭС представлен на рис. 2. Методика включает в себя пять основных этапов.

На *I этапе* формируются исходные данные: граф электрической сети, отображающий существующие линии электропередачи (ЛЭП) и избыточный набор новых ЛЭП; располагаемые мощности станций $P_i^{\text{ген}}$; мощности нагрузок в узлах $P_i^{\text{потр}}$; удельные приведенные затраты на единицу передаваемой мощности по ЛЭП $C_{ij}^{\text{лэп}}$, включающие в себя капиталовложения и постоянные издержки, удельные переменные затраты на генерируемую мощность $C_i^{\text{ген}}$; пропускные способности ЛЭП $P_{ij}^{\text{лэп}}$.

В качестве ограничения на пропускную способность существующих ЛЭП выступает наименьшая из предельных мощностей по нагреву провода или по статической устойчивости для отдельной связи с учетом коэффициента запаса.

Сформированные исходные данные используются на *II этапе* для получения решения на линейной модели оптимизации развития электрической сети, целевая функция которой

$$\min \sum_i \sum_j C_{ij}^{\text{лэп}} X_{ij}^{\text{лэп}} + C_i^{\text{ген}} X_i^{\text{ген}}, \quad (7)$$

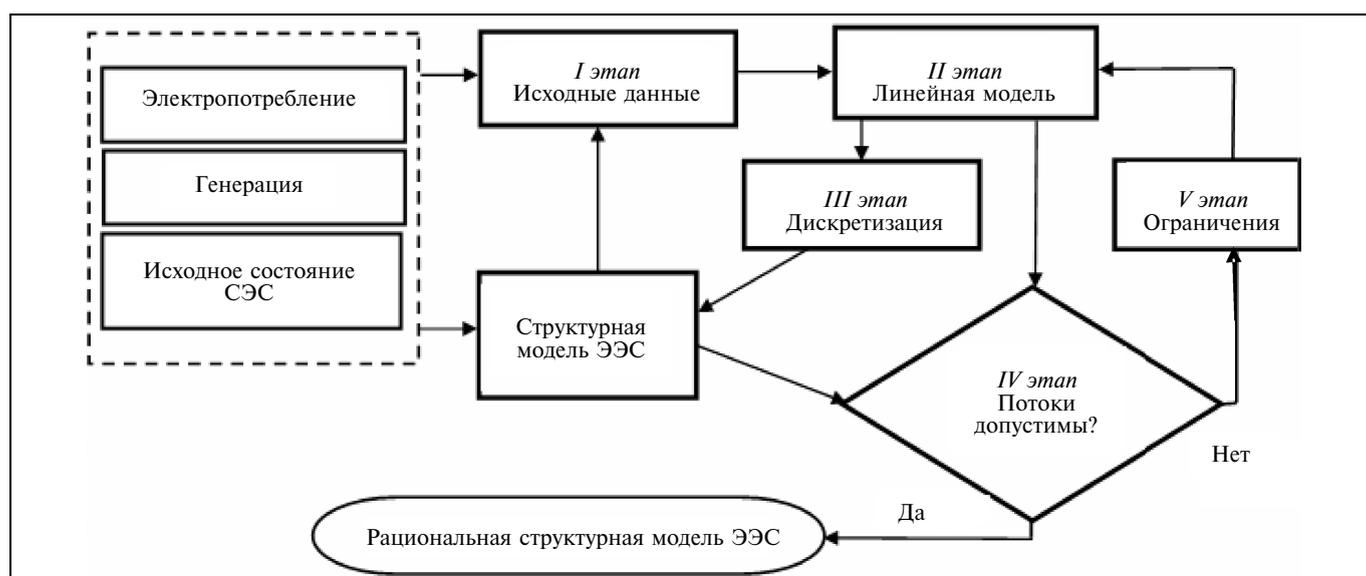


Рис. 2. Схема методики оптимизации развития системообразующей электрической сети

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

$$X_i^{\text{ген}} + \sum_j (1 - p_{ij}) X_{ij}^{\text{ЛЭП}} - \sum_j X_{ij}^{\text{ЛЭП}} = P_i^{\text{потр}}, \quad (8)$$

и ограничений на потоки мощности по ЛЭП и рабочие мощности станций:

$$0 \leq X_{ij}^{\text{ЛЭП}} \leq P_{ij}^{\text{ЛЭП}}, \quad (9)$$

$$0 \leq X_i^{\text{ген}} \leq P_i^{\text{ген}}. \quad (10)$$

Неизвестными величинами являются потоки мощности по связям $X_{ij}^{\text{ЛЭП}}$ из узла i в узел j и мощности генерации в узлах $X_i^{\text{ген}}$. В формуле (8) p_{ij} — удельный коэффициент потерь мощности при передаче по связи между узлами i и j (в относительных единицах).

Получаемое решение будет непрерывным — в виде минимально необходимых пропускных способностей межузловых связей электрической сети. В модели отсутствует алгоритм превращения этого непрерывного решения в дискретное (оптимальный вариант развития сети).

Поэтому *III этап* представляет собой дискретизацию решения, которая выполняется экспертом на основе данных о пропускной способности сечений СЭС, размере неиспользованной рабочей мощности станций в каждой из подсистем с учетом характеристик новых ЛЭП (номинального напряжения, пропускной способности, требуемых капиталовложений и др.). Эта процедура позволяет сформировать совокупность наиболее рациональных вариантов схем развития сети на основании значений потоков мощности по новым ЛЭП, а также учесть требования надежности в соответствии с требованиями [4]. Наличие потока, отличного от нуля, как правило, говорит о необходимости сооружения ЛЭП. При дискретизации решения определяется группа новых ЛЭП, которые

войдут в расчетную схему электрической сети, соответствующую одному из намеченных вариантов развития сети.

Для удобства графического представления сформированные варианты развития электрической сети отображаются на карте посредством модуля ГИС, связанного с программой «Сети», в которой реализован алгоритм рассматриваемой оптимизационной задачи. Этот модуль (рис. 3) входит в состав геоинформационного блока программно-вычислительного комплекса, содержащего также ряд специальных программ по геокодированию, обработке и выводу информации, необходимых для реализации ГИС-технологий [15].

В качестве ГИС-инструментария применяется пакет «MapInfo Professional». Этот программный продукт предоставляет для разрабатываемой системы достаточно графических возможностей и средств связывания объектов карты с атрибутивной информацией, адресного геокодирования, непосредственной работы с базой данных (БД), а также вывода на печать картографических материалов, их экспорта и импорта. Большое преимущество заключается в наличии прикладного языка программирования MapBasic. Если сравнивать «MapInfo» с другими ГИС-пакетами, то одним из лидеров по функциональным возможностям и использованию является пакет «ArcGIS» (целое семейство программных ГИС-продуктов ESRI). Эти ГИС-продукты целесообразно применять для расширенной обработки, анализа и моделирования геоданных с учетом топологических отношений [19]. В рамках настоящей работы базового набора функций пакета «MapInfo» достаточно для картографирования, визуализации и анализа данных, характеризующих СЭС.

На прикладном языке программирования MapBasic разработаны четыре программы — «GeoCode», «DrawUzel», «DrawLeps» и «SelVarT», позволяющие автоматизировать процессы картографирования узлов, ЛЭП и выбирать необходимый вариант расчета сети. Эти программы автоматически вызываются при работе геоинформационного модуля, первоначально загружающего пакет «MapInfo», который обрабатывает поступающие сообщения в фоновом режиме. Интерфейс модуля ГИС и пакета MapInfo осуществляется по технологии OLE Automation. После расчета варианта электрической сети посредством программы «Сети» при нажатии кнопки «ГИС» происходит географическое отображение линий электропередачи, стиль которых определяется программой «DrawLeps» на основе табличных данных, характеризующих тип линий, напряжение, наличие параллельных ЛЭП и другие признаки.

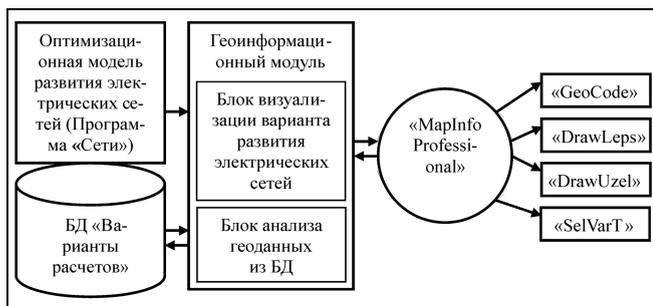


Рис. 3. Структура геоинформационного модуля

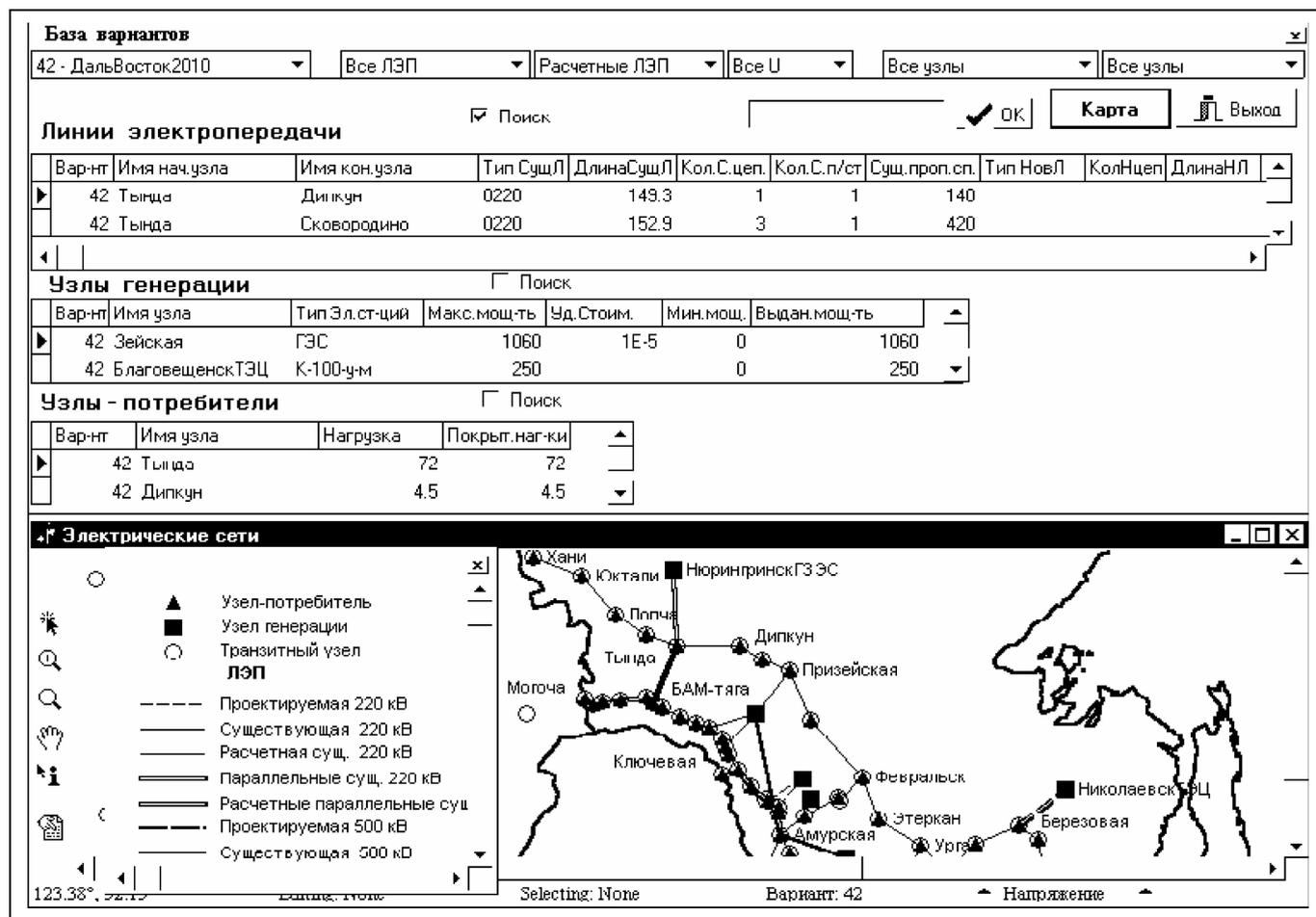


Рис. 4. Фрагмент работы геоинформационного модуля

Кроме того, имеется возможность непосредственной работы с БД «Варианты расчетов», когда вызываются необходимые таблицы из БД с соответствующей фильтрацией и пространственной привязкой данных. При этом в диалоговом окне «База вариантов» (программа «Сети») размещаются таблицы: «Варианты», «ЛЭП», «Генерация», «Потребители» и предоставляются соответствующие инструменты для выбора из таблиц требуемой информации (рис. 4).

Для выбранного варианта развития электрической сети возможны следующие тематические представления:

- ЛЭП — все ЛЭП; существующие ЛЭП; новые ЛЭП; ЛЭП с развитием;
- перетоки — все перетоки; линии с ненулевыми потоками; максимальный переток; минимальный переток;
- напряжение — все напряжения; 220; 330; 500; 750; 1150 кВ;

— генерация — все узлы генерации; узлы с максимальной мощностью; узлы с неиспользованной вырабатываемой мощностью;

— потребление — все узлы потребления; дефицитные узлы; самобалансирующиеся узлы; выдающие узлы; принимающие узлы (т. е. в зависимости от соотношения нагрузки и мощности генерирующих узлов).

Энергетические объекты наносятся на карту символами, специально созданными в соответствии с принятым стандартом графических обозначений электрических сетей ЭЭС. Геоинформационный модуль позволяет не только визуализировать варианты развития электрической сети, но и выполнить их анализ, используя средства графики, редактирования и обработки информации об энергетических объектах.

На IV этапе осуществляется проверка сформированных вариантов развития сети с точки зрения возможности передачи расчетных потоков мощности, включающая несколько стадий:

— определение контролируемых сечений и суммарного потока мощности в них по результатам расчета на линейной модели;

— составление расчетных схем замещения для сформированных вариантов электрической сети;

— расчет с помощью матрицы W предельно допустимых по статической устойчивости мощностей для контролируемых сечений (4) и (5);

— сравнение этих мощностей с полученными в линейной модели потоками мощности в тех же сечениях.

Если потоки мощности, рассчитанные по линейной модели, меньше допустимых для всех контролируемых сечений, то данный вариант схемы развития электрической сети считается обеспечивающим передачу расчетных потоков мощности, он включается в совокупность наилучших вариантов развития сети, подлежащих детальным проектным исследованиям на этапе их технико-экономического сравнения. В противном случае рассматриваемый вариант сети должен быть скорректирован (усилен).

Оптимальный способ усиления может быть получен посредством нового цикла оптимизации развития электрической сети, начиная с решения на линейной модели (II этап) с измененными значениями пропускных способностей сечений, в которых требуется усиление.

Для этого на V этапе модель (7)—(10) должна быть дополнена ограничениями вида

$$0 \leq \sum_{X_{ij}^{\text{лэп}} \in q} X_{ij}^{\text{лэп}} \leq P_q^{\text{пред}},$$

где $P_q^{\text{пред}}$ — предельно допустимая по статической устойчивости мощность q -го сечения (4), (5).

После корректировки ограничений на потоки мощности в сечениях производится следующий цикл оптимизации развития электрической сети, т. е. осуществляется переход на II этап. На основе его результатов формируется новый вариант (группа вариантов) развития сети с увеличенными пропускными способностями сечений. Эта группа вариантов затем также должна быть проверена с помощью структурной модели ЭЭС. Итеративный процесс проверки и отбора совокупности наиболее рациональных вариантов развития сети продолжается до тех пор, пока все варианты развития сети, вошедшие в эту группу, не будут нуждаться в корректировке.

Учет фактора динамики (временного аспекта) развития электрической сети в работе предлагается осуществлять упрощенно — псевдодинамически. При этом последовательно рассматриваются

несколько этапов развития электрической сети, для каждого из которых применяется предложенная методика.

3. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Представленная методика и пакет программ оптимизации развития СЭС использовались при решении задачи развития электрической сети ОЭС Востока на среднесрочную перспективу [21], а также при разработке предложений по перспективам развития системообразующей электрической сети ЭЭС России на период до 2030 г.

Для проверки допустимости использования показателей структурного анализа для расчета пропускных способностей сечений (4) и (5) выполнены детализированные расчеты установившихся режимов и статической устойчивости с помощью специализированного программно-вычислительного комплекса АНАРЭС [22]. Эти расчеты подтвердили, что полученные с помощью предложенной методики схемы развития электрической сети удовлетворяют требованиям к эксплуатации оборудования и нормативам по статической устойчивости ЭЭС.

Вместе с тем, получаемые при использовании показателей структурного анализа значения пропускных способностей сечений отличаются от значений, полученных более точным методом [22], примерно на 15 % в сторону завышения. Как показали расчеты, такая погрешность при оптимизации развития электрической сети на период 15—20 лет допустима, поскольку в перспективе недостаток пропускной способности сечений может быть ликвидирован изменением состояния и режима существующих устройств регулирования напряжения в узлах (отключением шунтирующих реакторов, подключением статических компенсаторов, увеличением мощности синхронных компенсаторов и др.), а также вводом новых устройств. Кроме того, в редких случаях, когда дальнейшее увеличение числа новых линий не оказывает существенного влияния на прирост пропускной способности сечения, может потребоваться установка устройств продольной компенсации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ: ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Предложен методический подход к решению задачи оптимизации развития системообразующей электрической сети. Его главная идея состоит в совместном использовании линейной модели оптимизации развития сети, структурной модели электроэнергосистемы и геоинформационных тех-



нологий в целях формирования совокупности наиболее рациональных вариантов развития системообразующей электрической сети, удовлетворяющих ограничениям на предельные по условиям статической устойчивости передаваемые мощности в сечениях электрической сети. Подход реализован в виде пакета программ, позволяющего более полно учитывать условия перспективного функционирования электрической сети.

Показана возможность использования при оптимизации развития электрической сети показателей структурного анализа для определения предельных мощностей в сечениях электроэнергосистемы. Полученные схемы развития электрической сети с помощью предложенной методики удовлетворяют требованиям к эксплуатации оборудования и нормативам по статической устойчивости системы.

Основные направления развития предложенного методического подхода и разработанных программных средств состоят в совершенствовании учета факторов надежности, многорежимности и динамики; учете особенностей развития электрической сети в условиях рынка; автоматизации формирования схем замещения электрической сети; интеграции линейной модели и структурной модели электроэнергосистемы в единый программный комплекс для анализа и оптимизации развития системообразующей электрической сети.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Системный* подход при управлении развитием электроэнергетики / Л.С. Беляев, Г.В. Войцеховская, В.А. Савельев и др. — Новосибирск: Наука, 1980.
2. *Постановление* Правительства Российской Федерации от 17 октября 2009 г. № 823 « О схемах и программах развития электроэнергетики ».
3. *Справочник* по проектированию электроэнергетических систем / В.В. Ершевич, А.Н. Зейлигер, Г.А. Илларионов и др. — М.: Энергоатомиздат, 1985.
4. *Методические* рекомендации по проектированию развития энергосистем. — М.: Минэнерго России, 2003.
5. *Практические* рекомендации по оценке эффективности и разработке инвестиционных проектов и бизнес-планов в электроэнергетике (с типовыми примерами). Кн. 1. Методические особенности оценки эффективности проектов в электроэнергетике. — М.: НЦПИ, 2000.
6. *Лазебник А.И.* Применение метода ветвей и границ для выбора оптимальной электрической сети. — Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. — 1969. — № 2. — С. 138—143.
7. *Акишин Л.А., Макаревич А.Д., Молодюк В.В.* Статическая модель оптимизации конфигурации развивающейся электрической сети. — Тр. Иркутского политехнич. ин-та. — 1971. — Вып. 72. — С. 162—173.
8. *Дале В.А., Кришан З.П., Паэгле О.Г.* Оптимизация развития электрических сетей объединенных электроэнергетических систем методом динамического программирования. — Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. — 1970. — № 4. — С. 91—96.
9. *Моцкус И.Б.* О покоординатном методе оптимизации развития электрических сетей. — Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. — 1969. — № 1. — С. 54—60.
10. *Салливан Р.* Проектирование развития электроэнергетических систем. — М.: Энергоиздат, 1982.
11. *Попова О.М., Такайшвили В.Р., Труфанов В.В.* Пакет программ для анализа развития электрических сетей с использованием геоинформационных технологий: Препр. № 8 / ИСЭМ СО РАН. — Иркутск, 2001.
12. *Веников В.А.* Переходные электромеханические процессы в электрических системах. — М.: Энергия, 1964.
13. *Абраменкова Н.А., Вороний Н.И., Заславская Т.Б.* Структурный анализ электроэнергетических систем: В задачах моделирования и синтеза. — Новосибирск: Наука, 1990.
14. *Абраменкова Н.А., Вороний Н.И., Заславская Т.Б.* Структурно-режимный анализ электроэнергетических систем для выбора принципов противоаварийного управления. — Новосибирск: НГТУ, 1996.
15. *Попова О.М.* Построение геоинформационной системы электрических сетей // Вестник ИргТУ. — 2006. — № 2 (26). — С. 101—104.
16. *Геоинформатика* / А.Д. Иванников, В.П. Кулагин, А.Н. Тихонов, В.Я. Цветков. — М.: МАКС Пресс, 2001.
17. *Прикладная геоинформатика* / А.Д. Иванников, В.П. Кулагин, А.Н. Тихонов, В.Я. Цветков. — М.: МАКС Пресс, 2005.
18. *Цветков В.Я.* Геоинформационные системы и технологии. — М.: Финансы и статистика, 1998.
19. *Лурье И.К.* Геоинформационное картографирование. — М.: КДУ, 2010.
20. *Методические* указания по устойчивости энергосистем. — М.: ЦПТИ ОРГРЭС, 2004.
21. *Usov I.Yu.* A Linear Model and Structural Analysis for Main Grid Expansion Optimization // Liberalization and Modernization of Power Systems: Congestion Management Problems. The Intern. Workshop Proc. — Irkutsk: Energy System Institute, 2003. — P. 113—116.
22. *Программно-вычислительный* комплекс АНАРЭС—2000 для расчета и анализа нормальных и аварийных режимов ЭЭС / О.Н. Шепилов и др. // Современные программные средства для расчетов и оценивания состояния режимов ЭЭС: Сб. докладов II междунар. науч.-практ. семинара. — Новосибирск, ИДУЭС, 2002. — С. 5—14.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Б.В. Павловым.

Попова Ольга Михайловна — канд. экон. наук, ст. науч. сотрудник, ☎ (3952) 42-63-80, ✉ POM@isem.sei.irk.ru,

Усов Илья Юрьевич — канд. техн. наук, мл. науч. сотрудник, ☎ (3952) 24-12-51, ✉ usov@govirk.ru,

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск.