

# Построение и использование моделей линейного программирования в задачах развития энергетики

Веселов Ф. В. к.э.н., Курилов А. Е. к.ф.-м.н, Хоршев А. А.

*В статье обсуждаются вопросы применения моделей линейного программирования для актуальных задач оптимизации натуральных и финансовых балансов в электроэнергетике на долгосрочную перспективу. Рассмотрены функциональные блоки динамической производственно-финансовой модели отрасли и особенности ее формирования и применения для многовариантных исследований*

## I. ПРИМЕНЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ СИСТЕМ И МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ В ЗАДАЧАХ СБАЛАНСИРОВАННОГО РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

В современных условиях заметно усложняются задачи прогнозирования развития электроэнергетики как целостной производственно-хозяйственной системы с разнообразными внешними (межотраслевыми) и внутренними технологическими и финансово-экономическими связями. Любой вариант развития отрасли на уровне страны, отдельного региона или компании должен удовлетворять целой совокупности **условий сбалансированности** по спросу на электроэнергию и тепло, ресурсам топлива для электростанций, располагаемым инвестиционным возможностям, приемлемой динамике цен, экологической нагрузке.

Для одновременного учета данных условий формируется система региональных балансов электроэнергии, мощности и тепла, балансов топлива, а также финансовых балансов отрасли и отдельных компаний. Совместный анализ такой системы натуральных и финансовых балансов в динамике является основной частью работы по прогнозированию, в ходе которой возникает необходимость решения отдельных частных взаимосвязанных задач, в том числе:

- выбор экономически эффективных вариантов программ демонтажа, замены, модернизации и реконструкции для электростанций с разным составом оборудования, формирование программ строительства новых электростанций разных типов и межсистемных ЛЭП;
- выбор вариантов использования основного оборудования (чисел часов использования) для производства электроэнергии и тепла с учетом их конкурентоспособности;
- выбор объемов передачи электроэнергии и мощности между энергосистемами;
- выбор вариантов топливоснабжения (вида топлива, источника поступления) с учетом возможностей взаимозамещения на тепловых электростанциях, динамики развития топливных отраслей и цен топлива;

- оценка потребностей в инвестициях, выбор источников их финансирования с учетом требований финансовой устойчивости отрасли и компаний и прогнозируемой динамикой конкурентных цен электроэнергии и тепла.

В соответствии с существующими методиками формирования схем перспективных балансов мощности, энергии, топлива (в рамках, например, имитационно-расчетных систем) применяются итеративные процедуры расчета балансов, основанные на разнообразных локальных методах и моделях. Например, тем или способом устанавливаются приоритеты или ранжировки генерирующего оборудования, выбираются режимы использования, программы демонтажа и замены оборудования, формируются множества «замыкающих» технологий, за счет которых и производится коррекция дефицитов или избытков мощности и энергии для сведения этих балансов. При этом для отдельных групп технологий проводится более подробный анализ, включающий в себя уточнение программ продления или модернизации оборудования, риск-анализ инвестиционных программ и т.п. В целом на эти итерации уходят месяцы работы соответствующих коллективов специалистов. Следует отметить, что новые варианты прогнозов всегда формируются на основе некоторых предыдущих, и тем самым включают в себя многолетний опыт предыдущих разработок.

На рис. 1 приведена схема имитационно-расчетной системы прогнозирования развития электроэнергетики, которая обеспечивает итеративную увязку условий функционирования и развития производственных мощностей с финансово-экономическим состоянием отрасли и условиями топливоснабжения электростанций в разрезе укрупненных энерготехнологий и объединенных электроэнергетических систем (ОЭС) ЕЭС России.

Данная система является составной частью модельно-информационного комплекса EPOS, созданного в ИНЭИ РАН для многовариантных исследований перспектив развития электроэнергетики России.

Успешное использование подобного инструментария в течение последних 15 лет при исследовании стратегических направлений развития электроэнергетики и выбора структуры генерирующих мощностей в ходе разработки Энергетической стратегии России и мониторинга ее реализации предопределено самой технологией итеративного согласования и поиска рационального (как правило, не строго оптимального, но компромиссного) решения. Данный подход наиболее точно отражает реальный процесс формирования решений в рамках государственной энергетической политики.

<sup>1</sup> Институт энергетических исследований РАН, ул. Нагорная д.31 корп.2, г. Москва, 113386, РФ, E-mail: info@eriras.ru



Рис. 1. Принципиальная схема имитационно-расчетной системы прогнозирования развития электроэнергетики России.

В то же время сложность и длительность формирования решения в имитационно-расчетных системах ограничивают возможности их применения в многовариантных параметрических исследованиях при одновременном увеличении детализации производственной и хозяйственной структуры (до уровня отдельных электростанций и энергокомпаний).

Это предопределяет актуальность включения в процедуры расчетов **моделей математического программирования**, которые ориентируются на оперативное «сведение» системы балансов как по отдельным видам (мощности, электроэнергия и тепла, топлива, финансовых ресурсов и т.п.), энергосистемам и энергокомпаниям, так и по всей моделируемой системе в целом, в динамике - по годам для рассматриваемого интервала времени. При варьировании целевой функции решение общей задачи совместной оптимизации натуральных и финансовых балансов может быть ориентировано на различные частные задачи оптимального выбора (например, формирование инвестиционной программы отрасли при минимизации капиталовложений).

В качестве примера ниже рассматривается динамическая производственно-финансовая модель развития электроэнергетики. Необходимость совместной оптимизации натуральных и финансовых балансов на перспективу определяет особенности функциональной структуры математической модели линейного программирования в динамической постановке (рис. 2), в которой выделяются:

- статические блоки уравнений: производственный, инвестиционный, финансовый и региональных топливно-энергетических балансов;
- уравнения динамической связи, отражающие условия изменения производственных и финансово-экономических показателей электроэнергетики.

В **производственном блоке** модели для каждого года решается задача сбалансированности отдельных энергосистем по мощности и электроэнергии. При этом *область оптимизации баланса мощности* определяется множеством действующих генерирующих и сетевых объектов,

вариантов их технического перевооружения, а также строительства новых объектов.

Возможности для *оптимизации балансов электроэнергии* обеспечиваются варьированием годовых объемов выработки электростанций разных типов с учетом их конкурентоспособности и ее изменения во времени под влиянием цен топлива.

Через необходимые по балансовым требованиям объемы и структуру вводов генерирующих мощностей обеспечивается связь производственного и инвестиционного блоков.

В **инвестиционном блоке** решается задача выбора состава эффективных инвестиционных решений и определяется потребность в финансировании капиталовложений в разрезе отдельных энергокомпаний.

*Область оптимизации инвестиционных решений* в модели сформирована множеством типовых вариантов технического перевооружения действующих и строительства новых мощностей с различной капиталоемкостью (удельными капиталовложениями), экономичностью и эксплуатационными затратами.

При этом предусматривается возможность «отложенных во времени» действий по техническому перевооружению действующих мощностей, выводимых из эксплуатации по мере достижения предельного ресурса.

Потребность в капиталовложениях обеспечивает связь между инвестиционным и финансовыми блоками.

В **финансовом блоке** решается задача финансовой сбалансированности выбираемой программы развития отрасли и отдельных компаний за счет *оптимизации ресурсов для ее обеспечения из собственных и внешних источников*. При этом естественная система ограничений определяется показателями финансовой устойчивости (доходность активов, собственного капитала, соотношение собственного и заемного капитала, темпы роста активов).

В **блоке топливно-энергетических балансов** регионов решается задача согласования условий поставки и потребления различных видов топлива для тепловых электростанций (ТЭС). При

этом в структуре регионального спроса выделяются переменная часть потребления на электростанциях, и неварьируемая потребность остальных секторов экономики, а также экспорта.

Область оптимизации спроса на топливо электростанций определяется:

- в статическом разрезе – множеством допустимых режимов топливopotребления на ТЭС,

отличающихся соотношением различных видов топлива;

- в динамическом разрезе – альтернативными решениями по техническому перевооружению и новому строительству ТЭС с различной экономичностью.

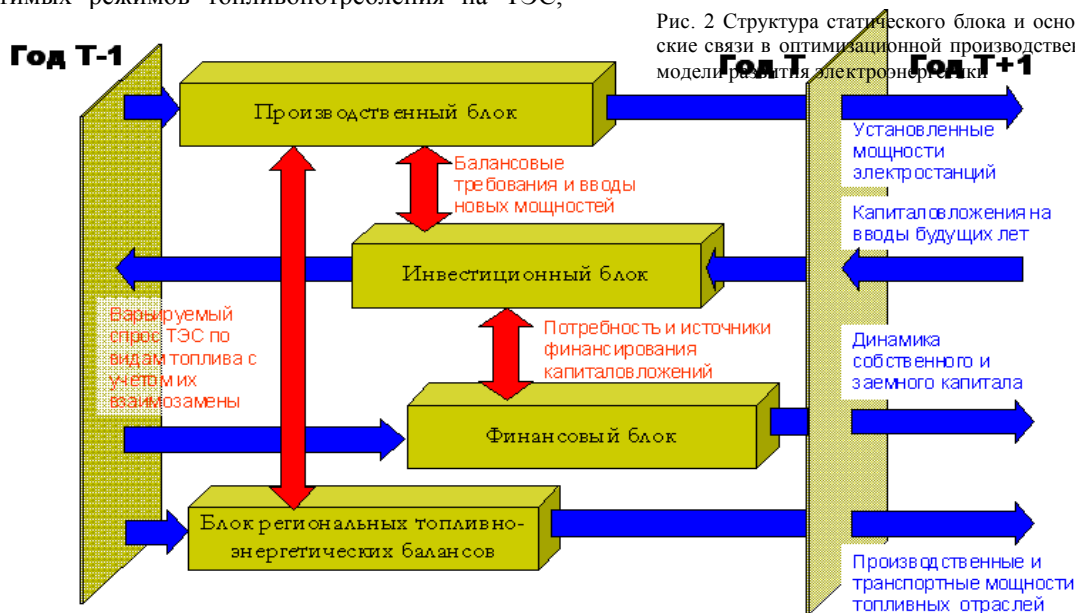


Рис. 2 Структура статического блока и основные динамические связи в оптимизационной производственно-финансовой модели развития электроэнергетики

## II. ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ФИНАНСОВЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ.

### А. Структура и состав моделируемых объектов

Эффективность использования математических моделей в прогнозных исследованиях во многом зависит от адекватности представления реальной производственно-хозяйственной структуры отрасли в виде множества переменных и уравнений задачи ЛП.

Возникающие задачи формирования инвестиционных и производственных программ на уровне отдельных компаний, а не только отрасли в целом, исследования эффективности использования действующих и новых мощностей в условиях конкурентного рынка требуют обеспечить в модели очень высокую степень детализации представления объектов электроэнергетики в балансах мощности и электроэнергии отдельных энергоузлов, включая:

- отдельные действующие электростанции (около 500) с выделением групп энергоагрегатов с однотипным оборудованием (теплофикационные, конденсационные, газомазутные, угольные и т.д.);

- типовые варианты модернизации и технического перевооружения для действующих электростанций; при этом их состав в динамике может быть переменным и учитывать появление новых технологий в форме «матрицы вариантов замены оборудования» для каждого объекта;

- новые энергообъекты (новые электростанции и новые блоки при расширении действующих электростанций) или типовые варианты нового строительства в энергоузлах;

- агрегированные электрические связи (ЛЭП) между выделенными балансовыми узлами; при этом традиционно в виде энергоузлов выступают 7 ОЭС и 3-5 отдельных районных энергосистем со слабыми электрическими связями, но в ряде случаев требуется и более детальное территориальное представление внутри ОЭС.

В условиях высокой децентрализации инвестиционных ресурсов задача финансового обеспечения развития электроэнергетики требует детализации корпоративной структуры отрасли с выделением отдельных компаний (около 30) и определения состава действующих и новых объектов для каждой из них. При этом в условиях продолжающейся реформы обеспечивается возможность изменения состава компаний, а для отдельных энергообъектов - изменения их корпоративной принадлежности в динамике.

Не менее важным для оптимизации вариантов развития генерирующих мощностей и режимов их использования является детальное представление инфраструктуры топливоснабжения электростанций при формировании уравнений региональных балансов топлива (более 20 балансовых узлов) с выделением:

- групп поставщиков газа (по основным центрам добычи);

- агрегированной сети магистральных газопроводов, связывающих балансовые узлы, включая основные экспортные направления;

- групп поставщиков энергетического угля (по основным бассейнам);

- транспортных направлений от центров добычи до регионов потребления по балансовым узлам.

### В. Взаимодействие локальных и глобальных моделей

Электроэнергетика традиционно характеризуется достаточно высоким уровнем системной целостности, обусловленной наличием единого технологического пространства (в масштабах ЕЭС России), рыночного пространства (ФОРЭМ<sup>2</sup>), интегрированной топливной инфраструктуры (ЕСГ<sup>3</sup> страны). Реорганизация РАО «ЕЭС России» и создание экстерриториальных генерирующих компаний, работающих в различных районах страны (т.е. за пределами одной районной энергосистемы) дополнительно увеличивают уровень связности отраслевой производственно-хозяйственной системы.

Именно эти факторы определяют актуальность задачи формирования полноразмерной и глобальной модели математического программирования для электроэнергетики по стране в целом.

Задачи формирования частных локальных моделей, тем не менее, также остаются актуальными – для решения частных задач, для целей отладки программного обеспечения, верификации данных, анализа результатов применения различных целевых функций и т.п. При этом «локализация» может быть, например, региональной (формирование частных моделей для отдельных энергоузлов) или функциональной (формирование частных моделей без отдельных функциональных блоков).

В связи с этим инструментальные средства формирования моделей должны обеспечивать относительно нетрудоемкие процедуры «сборки» глобальных моделей из заданных подмножеств частных и, наоборот, процедуры разбиения глобальных моделей на некоторые составные части.

Собственно говоря, работа по созданию первой версии глобальной модели отрасли предусматривала последовательную разработку, тестирование и калибровку частных моделей в составе производственного и инвестиционного блоков по каждой объединенной энергосистеме (ОЭС), с некоторыми фиксированными, априори заданными уровнями межсистемных перетоков электроэнергии, поставок топлива и т.п.

Поскольку эти частные модели формировались в рассматриваемой единой базе данных, с единой системой индексации и кодировки переменных и ограничений, то при замене некоторых граничных условий в частных моделях на общие «связующие» уравнения ограничений и получается искомая общая глобальная модель.

Аналогичный принцип интеграции локальных моделей был реализован при последующем добавлении блока региональных балансов и финансового блока.

### С. Особенности формирования системы переменных и ограничений в задаче ЛП

<sup>2</sup> Федеральный оптовый рынок электроэнергии и мощности России.

<sup>3</sup> Единая система газоснабжения России.

Необходимость детального представления производственной структуры электроэнергетики России и взаимосвязанных в ней топливных отраслей, подробное представление хозяйственной структуры с выделением отдельных компаний, приводит к резкому увеличению размерности математической модели, как по количеству переменных, так и по количеству ограничений. В динамической постановке размерность практически пропорционально возрастает в соответствии с количеством выделяемых лет.

Традиционный подход, реализуемый в системах моделирования для задач ЛП в области электроэнергетики рассматривает проблемы допустимого уменьшения размерности задачи как первоочередные. Для этого неварьируемые и фиксированные по той или иной причине объекты (кроме начальных условий) просто не включались в модель, а учитывались в составе структуры расчета ограничений ( $b_j^{min}$ ,  $b_j^{max}$ ). Кроме того, ряд объектов можно исключить из модели по причине их высокой эффективности, определенной вне оптимизационных расчетов. В этом случае переменные  $x_i$  для этих объектов также не включались в модель, а соответствующие значения  $a_{ij} * x_i^{(min)}$  и  $a_{ij} * x_i^{(max)}$  вычитались из правых частей ограничений.

Однако при этом для каждого варианта расчета возникает необходимость формирования специальных таблиц и баз данных для этих *a priori* «неварьируемых» объектов, присутствие которых необходимо в выходных документах. Также существенно усложняются процедуры формирования значений ограничений, запросы и процедуры формирования форм и отчетов (особенно в MS Access), процедуры верификации данных и предварительного анализа полученных решений (у специалистов-энергетиков возникает «неузнаваемость» привычных контрольных значений мощностей, выработки энергии, расходов топлива и т.п.). Кроме того, часто даже при относительно небольших вариациях постановки задачи возникает необходимость обратного «перезахода» некоторых «неварьируемых» объектов в разряд варьируемых. Если переменные этих объектов уже созданы (но фиксированы), то для этого изменяются значения ограничений на эти переменные. Если же эти объекты были «включены» в правые части общих ограничений, то необходимо по сути переформировать всю модель в целом.

С учетом этих недостатков формирование модели для многовариантных расчетов при постоянной корректировке условий формирования перспективных балансов мощности, энергии, топлива, финансовых потоков должно обеспечить:

1). Оперативную интерпретацию и содержательный анализ решения специалистами-энергетиками. Для этого в модель введены некоторые дополнительные функционально-зависимые переменные и несущественные ограничения, которые обеспечивают как можно более полное соответствие состава переменных и

ограничений модели ЛП структуре и составу используемых на практике документов балансов мощности, энергии и топлива и сокращают объем дополнительной вычислительной работы при формировании выходных отчетов. Для удобства отладки, формирования выходных документов и унификации программного обеспечения некоторые неравенства преобразуются в эквивалентные равенства путем определения дополнительных фиктивных переменных (*slack variables*).

2). Максимально широкое поле для оптимизации в каждом функциональном блоке за счет включения дополнительных переменных, представляющих «неварируемые» объекты, варианты их развития и режимы функционирования (например, при формировании инвестиционной программы РАО «ЕЭС России» такими объектами являются АЭС, мощности независимых энергокомпаний и блок-станции промышленных потребителей). В этом случае изменение области оптимизации для каждого варианта расчета не требует переформатирования всей модели, а только переопределения граничных значений переменных ( $x_i^{min}$ ,  $x_i^{max}$ ). Кроме того, ряд объектов может быть и исключен из оптимизации, но не через удаление элементов матрицы, а определение нулевой верхней границы ( $x_i^{max} = 0$ ).

Таким образом, принятие принципа соответствия структуры модели ЛП структуре практических балансовых расчетов и упомянутых выше требований унификации структуры моделей, а также избыточность множества моделируемых объектов в целом приводит к необходимости ориентации на размерности порядка несколько сот тысяч переменных и ограничений. Это стало определяющим требованием для разработки соответствующих инструментальных средств формирования моделей ЛП большой размерности и использования пакетов линейного программирования, имеющих средства эквивалент-

ных преобразований «*presolver*» (набор предварительных эквивалентных преобразований задачи ЛП).

В настоящее время большинство пакетов линейного программирования имеют режим «*presolver*», и поэтому требования минимизации размерности задачи можно считать несущественными. В целом для рассматриваемых задач ЛП операции «*presolver*» в среднем уменьшают размерность задачи в два раза, что свидетельствует о достаточно большом количестве фиксированных и формально «лишних» элементов модели, но необходимых для реализации намеченной информационной технологии математического моделирования рассматриваемого класса задач.

#### *D. Характеристика информационной технологии для организации многовариантных оптимизационных расчетов.*

Внедрение в практику прогнозных работ оптимизационных моделей большой размерности, их использование в режиме многовариантных расчетов, высокая степень информационной интеграции с другими средствами комплекса EPOS поставили задачу создания специальной информационной технологии, обеспечивающей максимальную автоматизацию процедур формирования задачи ЛП, поиска решения и выдачи результатов.

Основные элементы такой технологии, используемой в ИНЭИ РАН, представлены на рис. 3. Ее ядром является информационно-аналитическая система «СтратЭК» с иерархической стратифицированной структурой данных и встроенными алгоритмами организации многовариантных имитационных или оптимизационных расчетов различной степени агрегирования (с выходом на задачи размерностью порядка  $10^5$  переменных).



Рис. 3. Принципиальная схема технологии организации многовариантных оптимизационных расчетов при прогнозировании развития электроэнергетики

Информационное обеспечение модельного комплекса составляют мощные и регулярно обновляемые базы данных по производственным и

экономическим показателям объектов генерации и отрасли в целом, включая уникальную базу отчетных технико-экономических показателей

всех электростанций страны за период 1990-2005 гг.

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Созданный в ИНЭИ РАН мощный инструмент для оптимизации вариантов развития электроэнергетики на основе модели ЛП в динамической постановке отличается:

- оригинальной структурой функциональных блоков модели, обеспечивающих совместную оптимизацию балансов мощности и электроэнергии, балансов топлива и финансовых потоков компаний;

- спецификой представления совокупности объектов моделирования в задаче ЛП, обеспечивающей минимизацию работы по переконфигурации модели ЛП в многовариантных расчетах при изменении постановки задачи;

- высокой автоматизацией процедур формирования модели ЛП при приемлемых временных затратах.

Все это обеспечивает уникально широкие возможности по использованию данного инструментария в задачах стратегического планирования в электроэнергетике на уровне отдельных компаний, отрасли и ТЭК страны.