

*Доклад на 2-й Международной конференции «Планирование развития энергетики: методология, программное обеспечение, приложения», Москва, ЦНИИАтоминформ, 25-27 октября 2004 г.*

**Методология прогнозирования и оптимизации развития электроэнергетики в рамках топливно-энергетического комплекса России.**

*Ф. В. Веселов, к.э.н., А. Е. Курилов, к.ф.-м.н., А. С. Макарова, к.э.н.  
Институт энергетических исследований РАН*

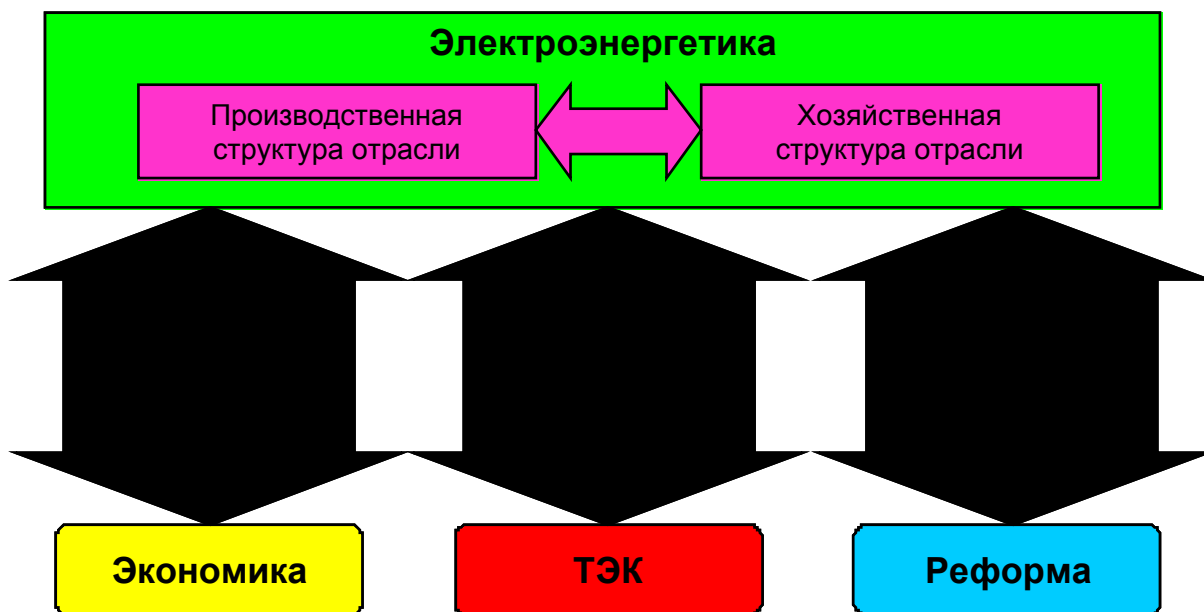
С началом оздоровления экономики России возрастает актуальность разработки долгосрочных стратегий развития отраслей национального топливно-энергетического комплекса (ТЭК), в том числе электроэнергетики.

Именно на основе таких прогнозов при формировании Энергетической стратегии страны, отраслевых и корпоративных стратегий развития, должны быть определены условия и предложены механизмы для надежной энергетической поддержки экономического роста на ближайшие годы и десятилетия.

Необходимо отметить, что в современных условиях методология прогнозирования электроэнергетики существенно усложняется – с развитием рыночных отношений финансово-экономические связи внутри отрасли и с внешней средой оказывают решающее влияние на долгосрочные изменения в ее технологической структуре.

Поэтому новые подходы к разработке прогнозов представляют электроэнергетику как **целостную производственно-хозяйственную систему**, развитие которой должно согласовываться с целым рядом макроэкономических, межотраслевых и структурных условий (рис. 1):

- возможности обеспечения растущего спроса на электроэнергию и тепло, определяемые прогнозными параметрами ценовой и инвестиционной политики в отрасли, не должны приводить к существенному ухудшению макроэкономических показателей, задаваемых сценариями социально-экономического развития страны;
- развитие электроэнергетики как крупнейшего потребителя органического топлива при различных сценариях ценовой политики на топливных рынках должно быть сбалансировано с возможностями развития газовой, угольной, нефтяной отраслей ТЭК страны;
- реализуемые сценарии реформирования отрасли, изменение состава участников и «правил игры» в новой хозяйственной среде не должны увеличивать риски устойчивого и эффективного энергоснабжения экономики и приводить в долгосрочном плане к отрицательным экономическим последствиям.



**Рис. 1. Принципы согласования прогноза развития электроэнергетики в современных условиях**

Организация такого согласования является одной из сложнейших проблем системных исследований, что обусловлено разнообразием внутренних и внешних связей электроэнергетики, трудностями полной формализации большинства из них, дефицитом и низким качеством отчетной и высокой неопределенностью прогнозной информации.

При этом наличие множества несовпадающих и часто противоречащих друг другу требований при согласовании прогнозов развития электроэнергетики существенно ограничивают область применения математически строгих оптимизационных методов. Соответственно, возрастает ценность методов имитационного моделирования, позволяющих вместо формально наилучшего варианта развития сформировать целый ряд допустимых сценариев развития и оценить их как с учетом эффективности, так и с учетом реализуемости в изменяющейся среде.

На рис. 2 представлена действующая в ИНЭИ РАН схема прогнозирования энергетики России и, в частности, электроэнергетики, которая эффективно используется для разработки и мониторинга Энергетической стратегии России и стратегий развития газовой, угольной отраслей и электроэнергетики (включая атомную).

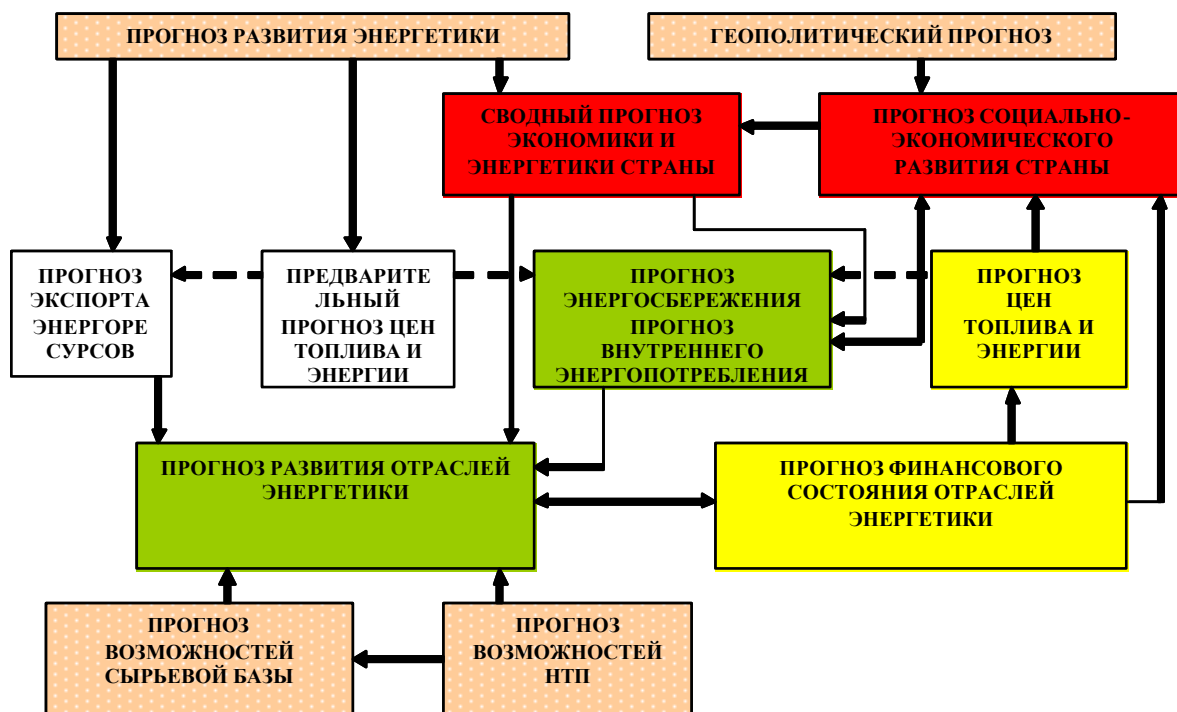
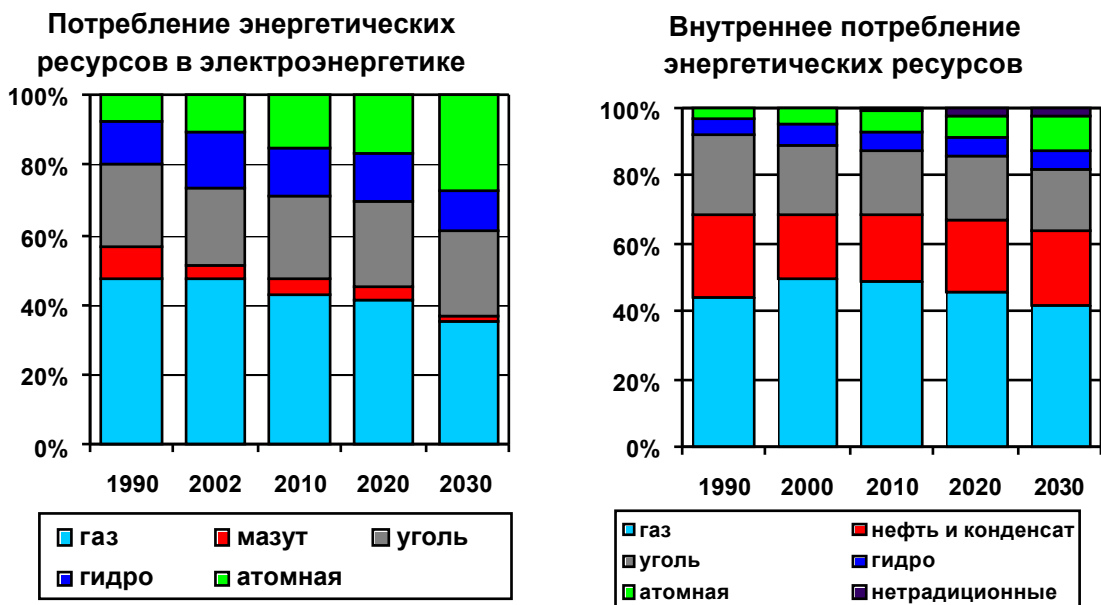


Рис. 2. Общая схема прогнозирования развития энергетики России

Особенно сильные технологические и экономические связи электроэнергетики с топливными отраслями определяют необходимость формирования прогнозов ее развития как интегрирующей части всего топливно-энергетического комплекса. Естественная для электроэнергетики замыкающая роль, которую она играет в топливно-энергетическом балансе страны и отдельных регионов связана со **значительными возможностями изменения структуры потребляемых энергоресурсов**. В краткосрочной перспективе эта «гибкость» определяется технологическим потенциалом взаимозамены органического топлива на действующих ТЭС, а в долгосрочной – соотношением новых генерирующих мощностей, использующих газ, уголь, атомную или гидроэнергию, а также внедрением новых, более экономичных технологий использования топлива.

В соответствии с Энергетической стратегией России на период до 2020 г. именно инвестиционные решения в электроэнергетике будут играть центральную роль в рационализации структуры энергобаланса, обеспечивая снижение доминирующей доли газа за счет приоритетного развития атомной и угольной генерации (рис. 3).



**Рис. 3. Роль электроэнергетики в изменении структуры энергетического баланса страны**

Однако реализация таких межотраслевых требований к развитию электроэнергетики в быстро меняющейся рыночной среде возможна только при их безусловном согласовании с прогнозом финансово-экономического состояния и инвестиционного потенциала отрасли и отдельных энергетических компаний. Это особенно важно в переходный период реформирования, когда реорганизация электроэнергетики, изменения в структуре собственности, развитие конкуренции создают не только новые возможности, но и новые риски для устойчивого развития отрасли.

Именно эти особенности являются приоритетными для разрабатываемой в ИНЭИ РАН методологии и инструментария прогнозирования электроэнергетики.

Отличительной чертой *методического подхода* является ориентация на поиск взаимосогласованных производственных, инвестиционных и экономических решений в электроэнергетике. При этом в его основу положен анализ изменяющихся во времени статических и динамических производственно-хозяйственных связей не только внутри электроэнергетики, но и ее внешних связей с топливными отраслями (рис. 4).

Формальное описание этих связей позволяет обеспечить требуемое согласование в рамках имитационной или оптимизационной процедуры, в том числе:

- согласовать условия развития электроэнергетики и топливных отраслей на основе оптимизации топливно-энергетических балансов регионов;
- согласовать возможности обеспечения спроса на электроэнергию действующими и новыми электростанциями при оптимизации функционирования и развития электроэнергетики;
- согласовать решения по функционированию и развитию электроэнергетики с финансово-экономическими возможностями при оптимизации результатов операционной, инвестиционной и финансовой деятельности отрасли и отдельных компаний.

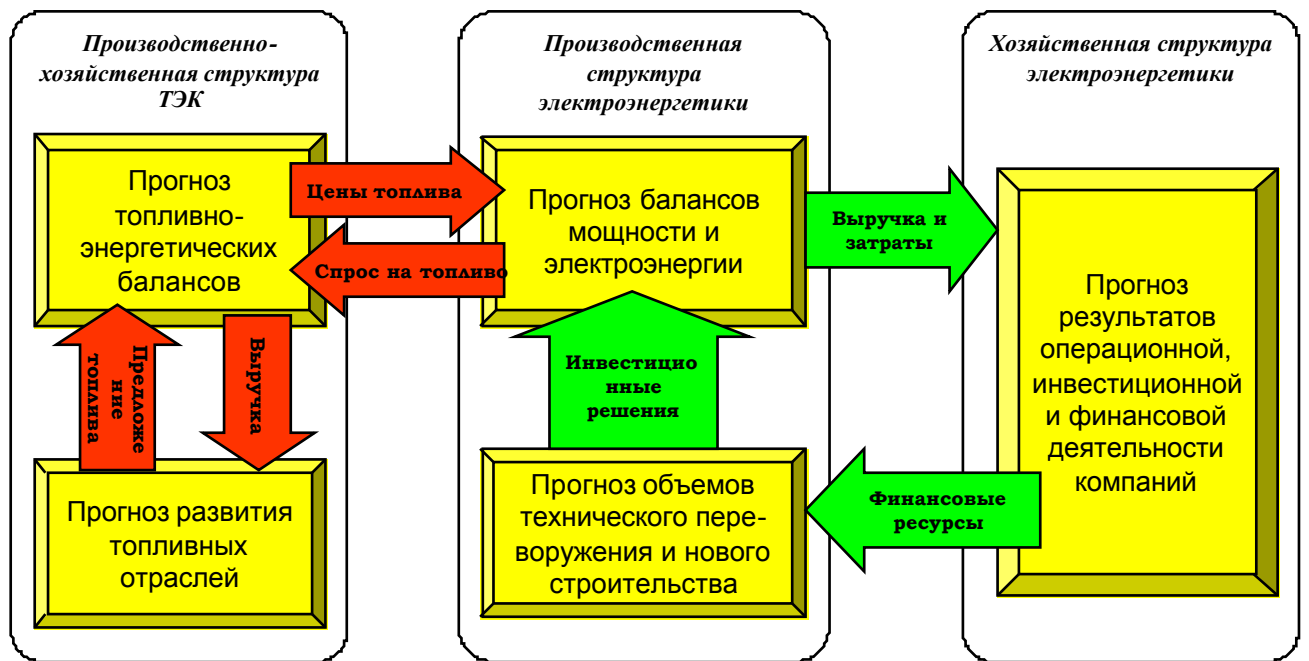


Рис. 4. Основные производственно-хозяйственные связи, рассматриваемые при прогнозировании электроэнергетики как части ТЭК

Разработанная в ИНЭИ РАН *имитационная модель прогнозирования развития электроэнергетики* (включая атомную) предполагает итеративную увязку условий функционирования и развития производственных мощностей с финансово-экономическим состоянием отрасли и условиями топливоснабжения электростанций (рис. 5).

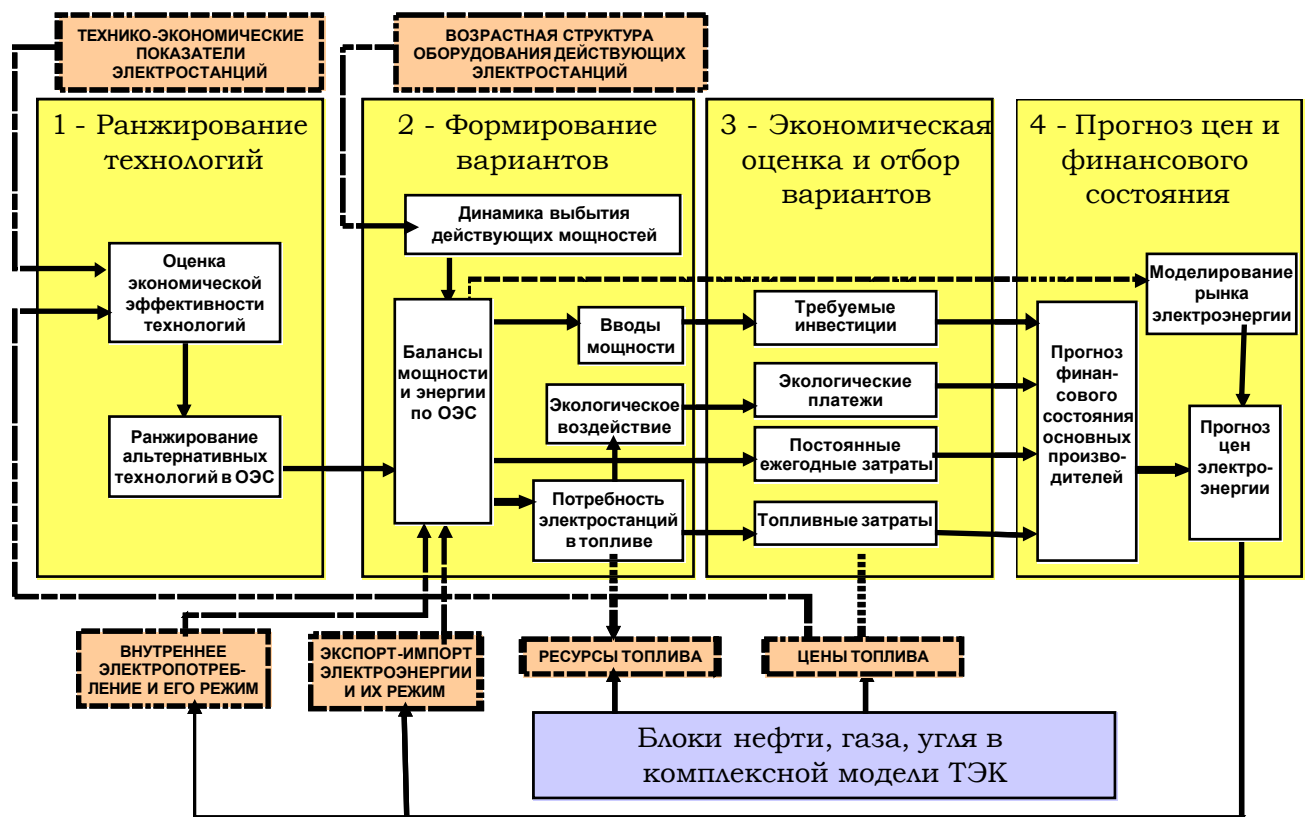
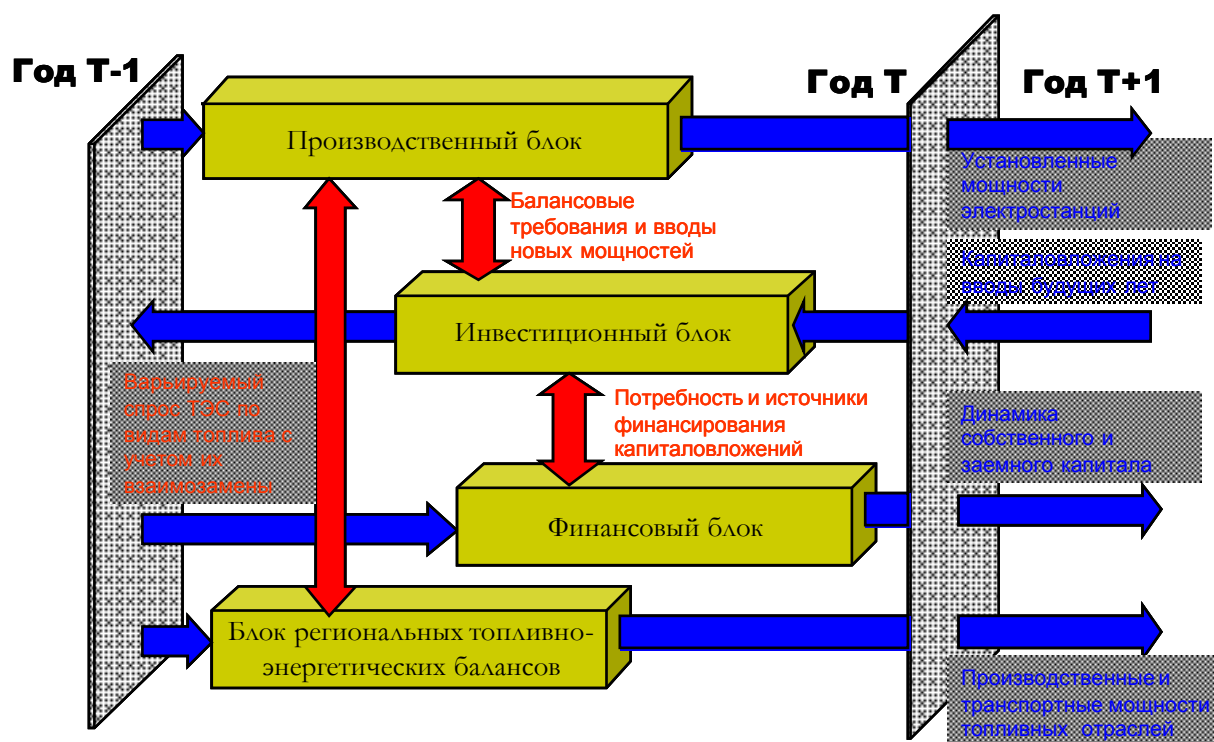


Рис. 5. Принципиальная схема имитационной модели прогнозирования развития электроэнергетики (включая атомную)

Вместе с тем, аналогичное согласование может быть реализовано и в рамках **динамической оптимизационной производственно-финансовой модели** развития электроэнергетики в ТЭЖе (рис. 6). При этом выполняется **совместная оптимизация** топливно-энергетических балансов регионов, балансов мощности и энергии энергосистем и финансовых балансов энергокомпаний, которая выполняется на перспективу до 15-20 лет.

Необходимость совместной оптимизации в динамике натуральных и финансовых балансов определяет особенности функциональной структуры модели, в которой выделяются:

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



**Рис. 6. Основные статические и динамические связи в динамической оптимизационной производственно-финансовой модели развития электроэнергетики в ТЭЖе**

В **производственном блоке** модели для каждого года решается задача обеспечения балансов мощности и электроэнергии отдельных энергосистем за счет наиболее эффективного использования генерирующих и сетевых мощностей.

При этом область оптимизации баланса мощности определяются множеством моделируемых действующих генерирующих и сетевых объектов, вариантов их технического перевооружения, а также 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 наиболее 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) и технико-экономическими показателями.

Потребность в финансировании капиталовложений обеспечивает связь между инвестиционным и финансовым блоками.

В *финансовом блоке* решается задача оптимизации результатов операционной, инвестиционной и финансовой деятельности отдельных компаний и определяются возможности финансирования капиталовложений за счет варьирования собственных и внешних источников.

Система ограничений по показателям финансовой устойчивости (доходность активов, собственного капитала, соотношение собственного и заемного капитала, темпы роста активов) обеспечивает выбор производственных и инвестиционных решений, которые в перспективе не приводили бы к финансовому кризису компаний.

Наконец, в блоке *топливно-энергетических балансов* регионов решается задача согласования условий поставки и потребления различных видов топлива.

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 в модели определяется:

- в статическом разрезе – множеством допустимых режимов топливопотребления на ТЭС, отличающихся соотношением различных видов топлива;
- в динамическом разрезе – альтернативными решениями по техническому перевооружению и новому строительству ТЭС с различной экономичностью.

Подробное описание добывающей и транспортной инфраструктуры топливных отраслей обеспечивает варьирование объемов и стоимости предложения различных видов топлива. Это позволяет, в частности, учесть при оптимизации топливно-энергетических балансов влияние электроэнергетики на использование существующих и развитие новых добывающих и транспортных мощностей и, следовательно, на уровень цен топлива.

Динамический характер производственно-финансовой модели обеспечивает выбор оптимальной стратегии развития электроэнергетики, исходя из *интегрального за период экономического эффекта*. При задаваемой динамике цен электроэнергии и тепла максимизация дисконтированного дохода позволяет получить наилучшие производственные, инвестиционные и экономические решения при различных сценариях реформирования отрасли.

В свою очередь, решение модели позволяет определить параметры оптимальной ценовой политики в электроэнергетике и топливно-энергетическом комплексе и сформировать на основе долгосрочных предельных затрат *систему сбалансированных цен на топливо и энергию, отражающую условия долгосрочного конкурентного равновесия*. Значения этих цен могут рассматриваться как целевые ориентиры в процессе либерализации рынков электроэнергии и газа и совершенствовании «правил игры» на рынке угля.

*Компьютерная реализация* такого мощного модельного инструментария для регулярного использования в задачах прогнозирования развития электроэнергетики и ТЭК страны требует комплексного решения целого ряда задач по информационному обеспечению и организации оптимизационных расчетов, включая:

- подготовку локальных баз данных исходной информации различного уровня агрегирования;

- автоматизированное формирование матрицы задачи линейного программирования (ЛП-задачи) большой размерности (до нескольких сотен тысяч переменных и уравнений);
- автоматизацию параметрических и многовариантных расчетов;
- детальный постоптимизационный анализ и анализ чувствительности решения.

Множество рассматриваемых в модели взаимодействующих производственных и хозяйственных объектов электроэнергетики, режимов их функционирования и развития, определяет необходимость разработки процедур **многоуровневого агрегирования исходной информации и характеристик оптимального решения** в технологическом, территориальном и корпоративном разрезах. Как показано на рис. 7, при этом выделяется до шести уровней агрегирования.



**Рис. 7. Многоуровневое агрегирование исходной информации и характеристик оптимального решения при формировании прогноза развития электроэнергетики.**

Поэтому важнейшим элементом созданного программного комплекса производственно-финансовой модели является **иерархическая стратифицированная база данных моделируемых объектов**, содержащая:

- первичные исходные данные и характеристики оптимального решения в категориях натуральных и стоимостных показателей;
- расчетные показатели для формирования коэффициентов матрицы ЛП-задачи.

База данных моделируемых объектов является частью **системы формирования матрицы ЛП-задачи и постоптимизационных расчетов**, которая реализована средствами СУБД постреляционного типа Advanced Revelation (рис. 8).

В рамках этой системы выполняется основной объем обработки исходных данных и формирования матрицы ЛП-задачи, а также формирование на основе оптимального решения комплексного прогноза развития электроэнергетики. Поэтому в ее состав входят также:

- специализированная база данных ЛП-задачи в категориях элементов матрицы математической модели.
- алгоритмы агрегирования и обработки показателей БД моделируемых объектов для расчета значений элементов матрицы ЛП-задачи и расчета характеристик оптимального решения в технологическом, территориальном и корпоративном разрезе.

Необходимо отметить, что наличие альтернативных алгоритмов обработки исходных данных и оптимального решения, обеспечивает «гибкость» (адаптивность) модели к

изменению постановки задачи (изменение уровня детализации, критерия оптимальности, состава уравнений и проч.).

Другая часть программного комплекса представляет собой *систему оперативной работы с текущим вариантом ЛП-задачи*, которая реализована в среде реляционной СУБД MS Access и обеспечивает выдачу стандартных выходных отчетов о результатах оптимизации, предоставляет возможности для отображения, анализа и оперативной корректировки значений элементов матрицы (в том числе при параметрических исследованиях).

В состав этой системы входят базы данных текущего варианта матрицы ЛП-задачи и оптимального решения, средства запросов, визуализации и корректировки элементов матрицы, а также библиотека запросов для автоматизированного формирования стандартного множества экспресс-отчетов об оптимальном решении.



**Рис. 8. Схема компьютерной реализации производственно-финансовой модели развития электроэнергетики**

Для поиска оптимального решения используется *пакет линейной оптимизации задач большой размерности* до нескольких сотен тысяч переменных. Поскольку в рамках программного комплекса обмен данными с пакетом оптимизации (входной файл матрицы/выходной файл оптимального решения) выполняется в стандартном формате MPS fixed, это позволяет использовать различные программы-оптимизаторы с учетом их производительности, вычислительных ограничений и доступности для исследователей.

В настоящее время в ИНЭИ РАН апробация рассмотренного методического подхода и модельного инструментария для прогнозирования развития электроэнергетики во взаимодействии с моделями развития экономики, производственно-финансовыми моделями развития топливных отраслей выполняется в рамках ряда научно-практических исследований, включая:

- разработку среднесрочной программы развития РАО «ЕЭС России»;
- разработку интерактивного модельно-компьютерного комплекса для анализа стратегий развития отраслей ТЭК во взаимосвязи с экономикой и оценки последствий оперативных решений (МКК «Отклик»).

Представляется также крайне перспективным использование данного подхода для разработки долгосрочных прогнозов развития АЭС как части электроэнергетики и ТЭК России с учетом изменений в ее организационной структуре и участия в рынке электроэнергии.