

ДОЛГОСРОЧНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СПРОСА НА ЭНЕРГИЮ НА ОСНОВЕ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА¹

© 2021 г. С. П. Филиппов^a, *, В. А. Малахов^a, Ф. В. Веселов^a

^aИнститут энергетических исследований Российской академии наук,
Нагорная ул., д. 31, корп. 2, Москва, 117186 Россия

*e-mail: fil@eriras.ru

Поступила в редакцию 27.04.2021 г.

После доработки 08.05.2021 г.

Принята к публикации 26.05.2021 г.

Прогнозирование спроса на энергию играет ключевую роль при решении большинства задач, связанных с определением перспектив развития экономики и энергетики. Из-за высокой инерционности и капиталоемкости энергетического производства необходимо рассматривать изменения в структуре и темпах энергопотребления на достаточно длительную перспективу — не менее 15 лет. Это существенно усложняет задачу разработки таких прогнозов, поскольку требуется учитывать возможные результаты технологического прогресса в разных отраслях экономики и изменения в ее структуре. В основе предлагаемого подхода к прогнозированию спроса на энергию лежат методы системного анализа. Потребители энергии дезагрегируются по отраслям экономики, регионам страны, энергоносителям и направлениям их использования. Это позволяет учитывать возможные в будущем технологические и структурные изменения в экономике, ее региональные различия, взаимные замещения энергоносителей, энергосбережение. Важнейшей особенностью подхода является разделение экономических и энергетических переменных. Первые определяют масштабы развития отраслей экономики, вторые — интенсивности потребления ими энергии. Разделение переменных существенно повышает корректность прогнозов, поскольку позволяет учесть различия в тенденциях изменения этих переменных в прогнозный период. Для прогнозирования экономических переменных применяется нелинейная условно-динамическая модель взаимосвязей экономики и энергетики. Прогнозирование энергетических переменных осуществляется на основе их связей с экономическими факторами, например с кумулятивными инвестициями в основной капитал рассматриваемых отраслей экономики. Обсуждаемый подход был реализован в виде совокупности имитационных моделей адаптивного типа, объединенных в вычислительную систему EDFs. Он многократно и достаточно успешно использовался для прогнозирования спроса на энергию на перспективу до 10–20 лет при решении разнообразных задач. Накопленный опыт показал корректность применения подхода для решения прогнозных задач на долгосрочную перспективу. Для иллюстрации возможностей подхода представлен подготовленный на его основе прогноз спроса на электрическую энергию на период до 2040 г. для базового варианта социально-экономического развития экономики России.

Ключевые слова: энергетика, энергоноситель, экономика, спрос, прогнозирование, методология, системный анализ, эффективность, удельное потребление энергии, энергоемкость, долгосрочная перспектива

DOI: 10.1134/S0040363621120043

Оценки будущих потребностей в энергии, которые строятся на основе прогнозов спроса на электроэнергию, тепловую энергию, топливо различных видов, необходимы для решения многих задач, связанных с развитием экономики и энергетики страны и регионов [1, 2]. Однако получение таких оценок, особенно на долгосрочную перспективу, сопряжено с существенными трудностями. Они обусловлены, в частности, большим разнообра-

зием потребителей энергии и рыночными механизмами формирования спроса на нее, значительным количеством конкурирующих энергоносителей и широкими возможностями их взаимного замещения, активной политикой энергосбережения, неопределенностью будущего экономического и технологического развития страны. Для больших стран, например России, дополнительные сложности возникают в связи с необходимостью учета существенных различий регионов по климату, сложившейся структуре экономики и тем-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-79-30013 от 17.03.2021).

пам экономического развития. В результате задача разработки прогнозов спроса на энергию оказывается большой размерности, нелинейной, требующей трудоемкой обработки значительных массивов разнородной информации и ее последующего надежного хранения. Решение такой задачи невозможно без создания соответствующей методологии и адекватных вычислительных инструментов.

Имеется достаточно много методологических подходов и математических моделей для прогнозирования спроса на энергию [3–11]. Некоторые из них довольно давно и успешно используются [12–14], в том числе в составе таких известных математических моделей, как MARKAL [15], MESSAGE [16], GEM [17], NEMS [18], TIMES [19], WEM [20] и др. Они различаются составом решаемых задач, детальностью описания структуры энергопотребления и рассматриваемой территории, глубиной прогнозирования, используемым математическим аппаратом, информационным обеспечением и т.д.

Более 10 лет назад в Институте энергетических исследований Российской академии наук (ИНЭИ РАН) был предложен интегрированный подход к прогнозированию спроса на энергию на долгосрочную перспективу [21, 22]. Его особенностью был достаточно детальный учет ключевых факторов, влияющих на будущий спрос на энергию, прежде всего перспектив развития экономики страны и регионов и прогнозируемых изменений энергоемкостей производимой продукции. Применительно к прогнозированию спроса на электроэнергию данный подход был представлен в [23].

Обсуждаемый подход был реализован в виде совокупности имитационных моделей адаптивного типа, объединенных в вычислительную систему с распределенной архитектурой EDFS (Energy Demand Forecasting System) [24]. Система EDFS интегрирована в модельно-информационный комплекс SCANNER (Super Complex for Active Navigation in Energy Research), разработанный в ИНЭИ РАН и используемый для проведения фундаментальных и прикладных исследований [25].

Данный подход многократно и довольно успешно применялся для прогнозирования спроса на энергию на перспективу до 10–20 лет при выполнении разнообразных научных исследований и прикладных работ [26–28]. В связи с ожидаемыми серьезными изменениями в объеме и структуре спроса на энергию, происходящими под воздействием новой технологической революции [29] и декарбонизации мировой экономики, появилась необходимость обобщения опыта использования обсуждаемого подхода и дальнейшего его развития. Прежде всего, это касается более корректного учета долгосрочных технологических и струк-

турных изменений в экономике, а также ее территориальных особенностей.

Поскольку энергетика является одной из наиболее инерционных и капиталоемких отраслей экономики, то при определении перспектив ее развития необходимо рассматривать довольно далекую перспективу — не менее 15 лет. В течение такого периода неизбежны существенные изменения отраслевой и территориальной структур экономики страны, а также удельных расходов энергии по отраслям экономики под воздействием технологического прогресса. Требуется корректный учет таких изменений.

По этим причинам часто малоинформативным и недостаточно корректным оказывается подход к прогнозированию спроса на энергоносители на основе ретроспективного тренда эластичности энергопотребления по валовому внутреннему продукту (ВВП) [26]. Такой подход, простой в использовании и требующий минимальной информации, вполне уместен для применения при отсутствии значимых структурных и технологических изменений в экономике, масштабного энергозамещения, а также возмущений, связанных с экономическими кризисами. Прежде всего, это касается рассмотрения ближней перспективы. В иных случаях обоснованность получаемых с его помощью прогнозных оценок всегда будет вызывать сомнения. В условиях коренной трансформации структуры экономики и энергетики под воздействием мощных технологических сдвигов применение такого подхода едва ли целесообразно. Также его применение ограничивается разработкой прогнозов для страны в целом, так как на региональном уровне заметное дискретное влияние оказывают крупные инвестиционные проекты у потребителей, влияющие на сложившиеся тенденции в динамике валового регионального продукта и энергоемкостей отраслей.

ОПИСАНИЕ МЕТОДОЛОГИИ

Совокупность потребителей энергии, формирующих спрос на нее, представляет собой иерархическую систему с разнородной внутренней структурой, сложным поведением и большим количеством внешних связей. Потребители энергии существенно различаются своими свойствами. Среди них важно выделить удельное энергопотребление (энергетическую эффективность) для производства продуктов и услуг, а также возможности использования различных энергоресурсов (взаимное замещение). Изменение этих свойств в динамике обусловлено как научно-техническим прогрессом, так и изменением структуры продуктов, производимых в рассматриваемых отраслях.

Следует отметить, что накоплен богатый опыт исследования подобных сложных систем с ис-



Рис. 1. Дезагрегирование спроса на энергию по отраслям экономики

пользованием методов системного анализа [12, 30, 31]. Важнейшими его принципами применительно к энергетике являются:

представление объекта исследования в виде системы;

структурирование системы с выделением иерархических уровней;

определение свойств элементов системы и установление связей между ними;

определение внешних связей;

описание поведения системы и ее взаимодействия с внешним окружением;

определение целей развития системы и граничных условий;

учет свойства эмерджентности (целостности) системы, неопределенностей разной природы и фактора времени, межтопливной конкуренции (взаимозаменяемости энергоносителей у потребителей);

дезагрегирование системы в целях упрощения решаемой задачи.

В обсуждаемом подходе совокупность потребителей энергии представляется в виде системы, образованной отраслями экономики. Из них формируются три большие группы, существенно различающиеся своими свойствами и потому требующие разных подходов к прогнозированию спроса на энергию: производственные отрасли, производящие неэнергетические товары и услуги, домашние хозяйства и энергетические отрасли, обеспечивающие потребителей энергоносителями в нужных объемах и требуемого качества (рис. 1). Производственные отрасли совместно с домашними хозяй-

ствами формируют сектор конечного потребления энергии.

Дезагрегирование спроса на энергию по отраслям экономики призвано учесть неравномерность их развития и различия в указанных выше свойствах. Уровень отраслевой дезагрегации экономики должен быть достаточным, чтобы корректно учесть возможные в будущем структурные и технологические сдвиги в ней.

Производственные отрасли включают добычу неэнергетических полезных ископаемых, обрабатывающие производства без переработки ископаемых топлив, транспорт без трубопроводного транспортирования энергоносителей, сельское хозяйство и др. При необходимости имеется возможность их дальнейшего дезагрегирования. Прежде всего, это касается обрабатывающей промышленности и транспорта, которые являются крупными потребителями энергии и характеризуются большой внутренней неоднородностью.

Выделение энергетического сектора обусловлено его важным местом в экономике России и значительной экспортной активностью. На его долю в последние годы приходилось около 21–25% производимой в стране добавленной стоимости, более половины потребляемого топлива и 31–32% используемой электроэнергии. Экспортируется около половины добываемых в стране топлив и продуктов их переработки. В энергетическом секторе выделены:

добывающие отрасли по основным видам ископаемого топлива, включая добычу нефти, природного газа и угля;

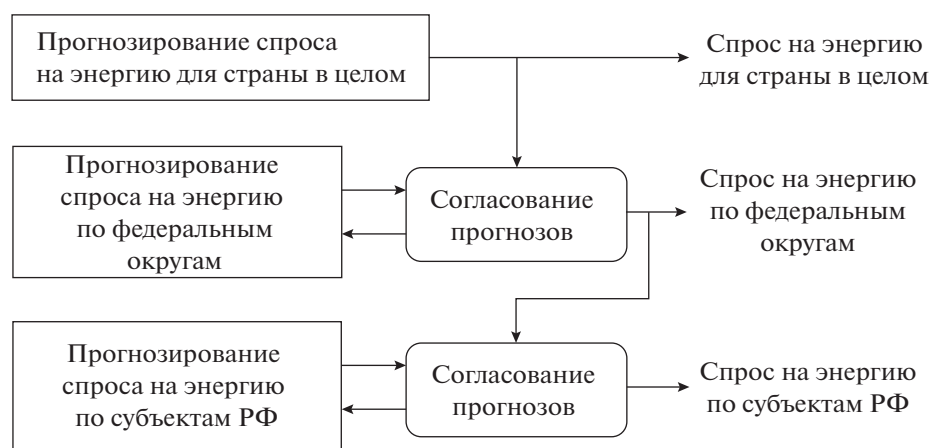


Рис. 2. Схема согласования прогнозов спроса на энергоносители для страны и регионов

отрасли по переработке топлива;
 трубопроводное транспортирование природного газа, нефти и нефтепродуктов;
 производство электрической и тепловой энергии;
 производство и распределение водорода и других новых энергоносителей.

Основными внешними факторами, определяющими спрос на энергию на долгосрочную перспективу, являются:

экономическая активность действующих производств, регулируемая рыночными силами;

введение в эксплуатацию новых производств как результат реализации инвестиционных проектов;

технический прогресс, влияющий на интенсивность потребления энергии отраслями экономики и расширяющий состав используемых энергоносителей;

демографические тенденции, отвечающие за изменения численности населения;

доходы населения, формирующие потребности домашних хозяйств в энергии;

внешние рынки, определяющие объемы экспорта энергоносителей;

нормативно-правовое регулирование, способное, как показывает практика, оказывать большое влияние на объемы и структуру спроса на энергию.

В предлагаемом подходе прогноз спроса на энергию дезагрегируется не только по отраслям экономики, но и по энергоносителям (энергетическим продуктам), направлениям использования энергоносителей и регионам страны.

Рассматриваются следующие энергоносители:

первичные (природные топлива): нефть, газ, уголь, биомасса (древесина, торф и др.);

вторичные (продукты преобразования природных топлив и возобновляемых источников энергии): автомобильный бензин, дизельное топливо, авиационный керосин, мазут, сжиженные углеводородные газы, кокс, твердое и жидкое биотопливо, водород, электроэнергия, тепловая энергия (централизованное теплоснабжение).

Разработка отраслевых прогнозов спроса на энергию ведется с учетом территориальных различий (в структуре экономики, климате и др.) по следующим иерархическим уровням: страна, федеральные округа, субъекты Российской Федерации (рис. 2). Прогнозы разрабатываются методом “сверху вниз”. В качестве обязательной процедуры предусмотрено согласование прогнозов смежных уровней. Балансирование производится по всем рассматриваемым энергоносителям и отраслям экономики. При выполнении согласительных процедур приоритет отдается требованиям вышестоящего уровня.

Для каждой p -й отрасли и t -го года балансовое уравнение для согласования прогнозов спроса на i -й энергоноситель для страны E_{tpi} и федеральных округов E_{trpi} имеет вид

$$E_{tpi} - \sum_r E_{trpi} = 0 \forall t \in T, \quad r \in R, \quad p \in P, \quad i \in I,$$

где T, P, I, R — множества рассматриваемых периодов времени, отраслей экономики, энергоносителей и регионов; r — индекс региона.

Аналогичные балансовые уравнения записываются для каждого федерального округа в целях согласования прогнозов “федеральный округ” — “субъекты Российской Федерации, образующие данный округ”.

Такая схема прогнозирования оказалась достаточно гибкой. Она позволяет при необходимости ограничиться разработкой прогнозов только двух верхних уровней — страны и федеральных

округов. Это дает возможность существенно сократить трудоемкость формирования прогноза и требования к информационному обеспечению. В некоторых задачах вообще оказывается достаточным подготовить прогноз только для страны в целом, т.е. только для одного верхнего уровня.

В общем случае в каждой отрасли экономики выделены следующие направления использования энергоносителей: производство электрической и тепловой энергии (стационарная энергетика) E^s , обеспечение мобильных нужд (мобильная энергетика) E^m , нетопливные нужды, т.е. в качестве сырья, восстановителя и т.д. E^{nf} . Например, природный газ или водород могут использоваться в качестве топлива в стационарной и мобильной энергетике и применяться в качестве сырья. Электроэнергия может направляться для покрытия стационарных нужд и привода транспортных средств.

Суммарный спрос p -й отрасли на i -й энергоноситель в t -м году составляет

$$E_{tpi} = E_{tpi}^s + E_{tpi}^m + E_{tpi}^{nf}.$$

Потребители обладают широкими возможностями взаимного замещения энергоносителей. Это существенно усложняет задачу прогнозирования спроса на энергию. Проблема энергозамещения имеет технические и экономические аспекты и является оптимизационной. В частности, на транспорте нефтепродукты могут вытесняться электроэнергией, природным газом, водородом, биотопливом. В металлургии вместо кокса и природного газа можно в определенных масштабах использовать водород. Такой же многогранной является проблема энергосбережения. Она тоже требует поиска оптимальных решений.

Спрос на энергоносители определяется на основе прогнозов социально-экономического развития страны и регионов. Таким образом учитываются рыночные механизмы его формирования, так как внутренний и внешний рынки в решающей степени определяют объемы выпусков неэнергетической продукции и значения других макроэкономических факторов. Поскольку значительная часть производимых в России топлив экспортируется, то объемы их производства будут также зависеть от ситуации на мировых рынках. Спрос на электрическую и тепловую энергию практически полностью определяется внутренним рынком.

Важнейшая особенность предлагаемого подхода — разделение экономических и энергетических переменных. Экономические (производственные) переменные являются экстенсивными и определяют масштабы развития отраслей экономики (выпуски продукции по секторам экономики, инвестиции в основной капитал и др.). Они могут выражаться в денежной или натуральной

форме. Первая форма используется для описания многопродуктовых отраслей, вторая — для конкретных продуктов, например нефти. Энергетические переменные (энергоёмкости) характеризуют интенсивности потребления энергии в отраслях экономики, т.е. определяют ее удельное потребление на выпуск продукции (товаров и услуг).

Разделение экономических и энергетических переменных существенно повышает корректность прогнозов спроса на энергию, поскольку позволяет учесть различия в их изменении в прогнозный период, тем более что часто такие тенденции оказываются противоположными (выпуски растут, а энергоёмкости падают), так как обусловлены разными силами. Тогда спрос p -й отрасли экономики на i -й энергоноситель в t -м году по стране в целом можно представить как

$$E_{tpi} = e_{tpi} V_{tp},$$

где e_{tpi} — удельный расход i -го энергоносителя на выпуск продукции p -й отрасли в t -м году; V_{tp} — выпуск продукции p -й отрасли в t -м году.

Аналогичным образом определяется спрос на каждый энергоноситель для всех направлений его использования во всех рассматриваемых отраслях экономики. Суммарный по стране спрос на i -й энергоноситель в t -м году E_{ti} вычисляется по формуле

$$E_{ti} = \sum_p (E_{tpi}^s + E_{tpi}^m + E_{tpi}^{nf}).$$

Применяемые подходы к прогнозированию экономических и энергетических переменных обсуждаются далее.

Разработанная схема прогнозирования спроса на энергию показана на рис. 3. Прогнозный спрос на каждый рассматриваемый энергоноситель представляет собой совокупный результат отраслевых прогнозов, т.е. сумму оценок спроса на него со стороны всех выделенных отраслей экономики, сгруппированных в сектор конечного потребления энергии и энергетический сектор (см. рис. 1).

При прогнозировании на отдаленную перспективу всегда важной проблемой остается корректный учет неопределенностей, источником которых являются неточные знания будущих условий развития экономики страны и регионов и возможных технологических изменений в отраслях экономики, определяющих их энергоэффективность. Для учета неопределенностей могут использоваться как сценарный, так и целевой подходы. В первом случае формируется несколько сценариев, отличающихся один от другого сочетанием внешних условий, во втором — на изначально определенную целевую траекторию социально-экономического развития страны и регионов накладываются внешние воздействия. Вторым подход



Рис. 3. Схема прогнозирования спроса на энергию

информативнее, но сложнее в разработке и последующем использовании. Поэтому он не получил широкого применения. К тому же его можно адекватно заменить первым подходом с расширенным количеством рассматриваемых сценариев.

Сценарные условия определяют границы для формирования прогнозов развития экономики страны и регионов. Состав условий разнообразен и включает демографические, макроэкономические и другие факторы. Важная задача разработки сценариев — получение предварительных оценок развития энергетических отраслей, включая объемы добычи и преобразования топлив, их экспорта и т.д. Они определяются с использованием имеющихся в ИНЭИ РАН модельных инструментов для исследования отраслей энергетики и мировых энергетических рынков [25]. Предусмотрена возможность корректировки сценарных условий по результатам прогнозирования развития экономики страны и спроса на энергию.

В схеме, показанной на рис. 3, важное место отводится анализу перспектив технологического развития мировой экономики и энергетики, а также планируемых и возможных программ энергосбережения и энергозамещения в экономике России. Результаты такого анализа позволяют оценить достигнутый уровень эффективности потребления энергии в рассматриваемых отраслях экономики России и определить для них прогнозные значения годовых темпов энергосбережения и энергозамещения. Данная информация необходима для

более корректного прогнозирования энергоемкости этих отраслей.

На основе анализа инвестиционных проектов формируются дискретные возмущения, которые могут существенным образом влиять на сложившиеся тренды изменения экономических показателей и энергоемкости рассматриваемых отраслей экономики. Особенно сильно это влияние проявляется на региональном уровне.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ И ЭНЕРГОЕМКОСТЕЙ ОТРАСЛЕЙ ЭКОНОМИКИ

Для прогнозирования экономических показателей (переменных), необходимых для прогнозирования спроса на энергию, могут применяться различные экономико-математические модели, например классические модели межотраслевого баланса, равновесные макроэкономические модели (CGE-models) или нелинейные модели оптимизации системы продуктовых и финансовых балансов по отраслям экономики. К последнему типу относится разработанная в ИНЭИ РАН нелинейная условно-динамическая модель взаимосвязей экономики и энергетики МЭНЭК (модель энергетики в экономике), которая используется в составе обсуждаемого подхода к прогнозированию спроса на энергию [32]. Основные функциональные блоки МЭНЭК следующие:

целевые ограничения;

финансовые балансы отраслей экономики, государственных учреждений и домашних хозяйств;

балансы производства и распределения товаров и услуг, инвестиционных и кредитных средств экономики;

денежно-кредитная система.

Основой для расчетов нужных экономических показателей являются прогнозы социально-экономического развития страны, разрабатываемые Министерством экономического развития России на долгосрочную перспективу. Обычно эти прогнозы включают в себя только общие для страны макроэкономические и некоторые отраслевые показатели (динамику производства сельского хозяйства, отраслей промышленности, части услуг). В них не рассматриваются региональные особенности развития страны. Таких прогнозов недостаточно для определения будущего спроса на энергию по федеральным округам и тем более по субъектам Российской Федерации. Поэтому привлекаются дополнительные экономические модели.

Сначала с помощью МЭНЭК рассчитывается для страны в целом весь необходимый набор экономических показателей, включая прогнозную динамику выпусков и инвестиций по отраслям экономики, добавленные стоимости, доходы населения и др. Затем полученные на МЭНЭК прогнозные показатели подвергаются двухуровневой территориальной детализации. На первом уровне они дифференцируются по федеральным округам, а далее выступают в роли задающих значений по каждому федеральному округу и дифференцируются по всем входящим в его состав субъектам РФ. Методика дифференциации задающих значений показателей реализована с помощью совокупности экономико-математических моделей, описывающих экономику соответствующих федеральных округов. Модели эти идентичны и отличаются одна от другой лишь составом субъектов РФ.

Прогнозирование экономических показателей, описывающих социально-экономическое развитие страны и регионов с требуемой детализацией, основано на сочетании следующих принципов:

согласование перспективных показателей, определяющих экономическое развитие страны в целом и ее регионов;

учет сложившихся в ретроспективе тенденций в динамике региональной структуры экономики, определяемых изменениями в отраслевой структуре экономики регионов;

учет принятых к реализации крупных инвестиционных проектов, обуславливающих в прогнозном периоде существенные изменения отраслевой и региональной структур экономики.

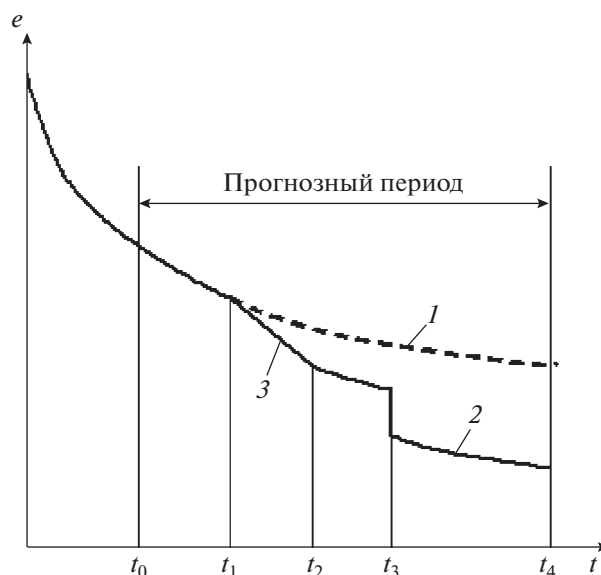


Рис. 4. Прогнозирование энергоемкости e отраслей экономики на период t .
1, 2 — базовая и прогнозная энергоемкость; 3 — учет энергосбережения (энергозамещения); t_0, t_4 — начало и завершение прогнозного периода; t_1-t_2 — период выполнения программы энергосбережения (энергозамещения); t_3 — реализация инвестиционного проекта

При реализации данных принципов возникают серьезные трудности, для преодоления которых приходится применять различные методические приемы [33]. Полученные первичные данные по инвестиционным проектам подвергаются двухуровневому агрегированию для использования в последующих расчетах [34].

Энергоемкости отраслей экономики с течением времени не остаются постоянными. Они изменяются под воздействием многих факторов (технологических, структурных и др.). Предлагается прогнозную динамику изменения энергоемкостей отраслей экономики представлять в виде базового тренда и накладываемых на них возмущений (рис. 4). Возмущения могут быть как статическими (импульсными), так и динамическими (длительными). Первые определяются крупными инвестиционными проектами, реализуемыми, как правило, в довольно сжатые сроки, вторые — мероприятиями длительного характера, прежде всего энергосберегающими и энергозамещающими, отсутствующими в базовом тренде. Такой подход позволяет более корректно описать динамику изменения прогнозных энергоемкостей и, следовательно, спрос на энергию. Это становится особенно важным при прогнозировании спроса в региональном разрезе, когда вклад крупных энергоемких проектов оказывается значительным. Если прогноз базовой энергоемкости был определен как интервальный, то и окончатель-

ный прогноз энергоемкости с учетом возмущений также останется интервальным.

Важной проблемой является корректное описание связи энергоемкости отрасли с изменением загрузки имеющихся производственных мощностей, снижение которой обычно приводит к росту энергоемкости, что обусловлено условно-постоянными расходами энергии при производстве продукции, т.е. не зависящими от объемов производства. Их можно определить на основе ретроспективной информации линейной аппроксимацией энергопотребления отрасли от выпуска продукции. Таким образом удастся учесть влияние кризисных явлений в экономике на энергоемкость. В итоге появляется возможность распространения разработанной методики прогнозирования энергопотребления на стагнирующую и падающую экономику.

Для производственных и энергетических отраслей экономики прогнозные энергоемкости по каждому i -му энергоносителю определяются путем решения следующей системы уравнений:

$$\begin{aligned} e_{ipi} &= k_{ipi}^{inv} k_{ipi}^{es} k_{ipi}^{ex} k_{ipi}^{pr} e_{ipi}^o; \quad e_{ipi}^o = f_{ep}(e_{pi}^{ret}, \Phi); \\ k_{ipi}^{inv} &= 1 + \sum_u \sigma_{ipu}^{inv} (e_{ipu}^{inv} / e_{ipi}^o - 1), \quad u \in U_p; \\ k_{ipi}^{es} &= 1 - \alpha_{ipi}^{es} / 100; \quad k_{ipi}^{ex} = 1 - \alpha_{ipi}^{ex} / 100; \\ k_{ipi}^{pr} &= (\beta_{ipi} \sigma_{ip}^V + 1) / (\beta_{ipi} + 1), \quad \text{если } V_{ip} < V_p^*; \\ k_{ipi}^{pr} &= 1, \quad \text{если } V_{ip} \geq V_p^*; \\ \beta_{ipi} &= \sigma_{ipi}^E / (1 - \sigma_{ipi}^E); \quad \sigma_{ipu}^{inv} = V_{ipu} / V_{ip}; \\ \sigma_{ip}^V &= V_{ip} / V_p^*; \quad \sigma_{ipi}^E = E_p^{con} / E_{ipi}, \end{aligned}$$

где e_{ipi}^o — базовая энергоемкость p -й отрасли экономики по i -му энергоносителю, полученная на основе анализа соответствующих ретроспективных данных e_{pi}^{ret} и их связей с макроэкономическими факторами Φ ; k_{ipi}^{inv} , k_{ipi}^{es} , k_{ipi}^{ex} — поправки энергоемкости отрасли соответственно на крупные инвестиционные проекты, энергосберегающие мероприятия и энергозамещение; k_{ipi}^{pr} — коэффициент, учитывающий влияние загрузки производственных мощностей на энергоемкость отрасли; e_{ipu}^{inv} — энергоемкость u -го инвестиционного проекта по i -му энергоносителю; U_p — множество рассматриваемых инвестиционных проектов в p -й отрасли; α_{ipi}^{es} , α_{ipi}^{ex} — годовые темпы энергосбережения и энергозамещения в рассматриваемой отрасли; σ_{ipu}^{inv} — доля u -го инвестиционного проекта V_{ipu} в выпуске продукции p -й отрасли; σ_{ip}^V — падение загрузки производственной мощности p -й отрасли относительно выпуска продукции в последний предкризисный год V_p^* ; σ_{ipi}^E — доля энергопотреб-

ления отрасли, не зависящая от степени загрузки производственной мощности, которая определяется как отношение постоянной части энергопотребления отрасли E_p^{con} к его суммарному значению.

Возмущения, накладываемые крупными инвестиционными проектами на базовую энергоемкость отрасли, количественно определяются коэффициентом k_{ipi}^{inv} . Он учитывает отличие энергоемкости реализуемых инвестиционных проектов e_{ipu}^{inv} от базовой энергоемкости отрасли e_{ipi}^o и вклад этих проектов в суммарный выпуск продукции данной отрасли σ_{ipu}^{inv} . Это — интегральный показатель, суммирующий возмущения от всех рассматриваемых инвестиционных проектов, реализуемых в данной отрасли. Если энергоемкость инвестиционных проектов не будет отличаться от средней по отрасли, то $k_{ipi}^{inv} = 1$.

Базовые энергоемкости отраслей экономики e_{ipi}^o прогнозируются на основе установления их связей с макроэкономическими показателями. При этом учитываются существующие территориальные различия между энергоемкостями отраслей и неравномерностями изменения этих показателей в будущем. Согласно выполненным авторами исследованиям, для производственных отраслей (см. рис. 1) решающей оказывается связь энергоемкости с кумулятивными инвестициями в основной капитал данной отрасли, рассчитанными в сопоставимых ценах [26]. Рост цен на энергоносители является только побудительным мотивом для повышения энергоэффективности производства (снижения его энергоемкости). Средством для достижения этой цели являются инвестиции. Поскольку получаемый энергетический эффект от инвестиций в виде снижения энергоемкостей является накопительным, то следует принимать в расчет кумулятивные инвестиции (естественно, измеренные в сопоставимых ценах). Длительность ретроспективного периода накопления инвестиций выбирается для каждой отрасли индивидуально исходя из наилучшей аппроксимации ретроспективных значений энергоемкости. Связь энергоемкости с инвестициями будет тем сильнее, чем большая доля инвестиций будет направляться на техническую модернизацию действующих производств и расширение производства на основе новых технологий.

В качестве примера на рис. 5 приведена динамика изменения электроемкости e_{el} обрабатывающей промышленности в 2000–2020 гг. Электроемкость определяется как отношение потребления электроэнергии отраслью к выпуску ею продукции в сопоставимых ценах в соответствующем году. Отчетливо виден всплеск электроемкости в период экономического кризиса 2008–2009 гг. вследствие сокращения загрузки производственных мощно-

стей. Возвращение ее к трендовой траектории затянулось вплоть до 2012 г. В 2009 г. выпуск продукции обрабатывающей промышленностью сократился в 1.25 раза по сравнению с предкризисным 2007 г. и восстановился только в 2012 г.

На рис. 6 показана зависимость электроемкости обрабатывающей промышленности от кумулятивных инвестиций K_{ip}^c в эту отрасль. При аппроксимации отчетных данных зависимостью $y = ax^b$ и учете изменения загрузки производственных мощностей в кризисный период значение квадрата коэффициента корреляции составляет примерно 0.97.

Как показала практика, в некоторых случаях может иметь место неудовлетворительная корреляция ретроспективных значений энергоемкости отрасли с макроэкономическими показателями. Тогда прогнозные значения энергоемкостей отраслей могут определяться на основе показателей их эластичности по соответствующим макроэкономическим показателям, например по кумулятивным инвестициям:

$$e_{ipi}^o = e_{i-1,pi}^o \left[1 + L_{pi}^o \left(K_{ip}^c / K_{i-1,p}^c - 1 \right) \right],$$

где L_{pi}^o — эластичность энергоемкости p -й отрасли для i -го энергоносителя по кумулятивным инвестициям.

Показатели эластичности вычисляются на основе ретроспективных данных. При этом они могут рассчитываться как среднее арифметическое значение годовых эластичностей за определенный ретроспективный период n или как среднее значение эластичности за период, который обычно выбирается равным 2–5 годам:

$$L_{pi}^o = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left[\left(e_{ipi}^o / e_{i-1,pi}^o \right) / \left(K_{ip}^c / K_{i-1,p}^c \right) \right];$$

$$L_{pi}^o = \left(e_{ipi}^o / e_{i-n,pi}^o \right) / \left(K_{ip}^c / K_{i-n,p}^c \right).$$

Для повышения обоснованности выбора прогнозных значений эластичностей целесообразно рассчитывать их скользящие средние значения за весь рассматриваемый ретроспективный период.

Для домашних хозяйств прогнозные энергоемкости определяются по выражению

$$e_{ipi} = k_{ipi}^{es} k_{ipi}^{ex} e_{ipi}^o,$$

в котором используются те же обозначения, что и в приведенных ранее формулах.

Базовые энергоемкости домашних хозяйств e_{ipi}^o также прогнозируются на основе установления их связей с макроэкономическими показателями. Применительно к электрической и тепловой энергии имеет место достаточно хорошая корреляция их с площадью жилых зданий, а так-

e_{el} , кВт · ч/тыс. руб.

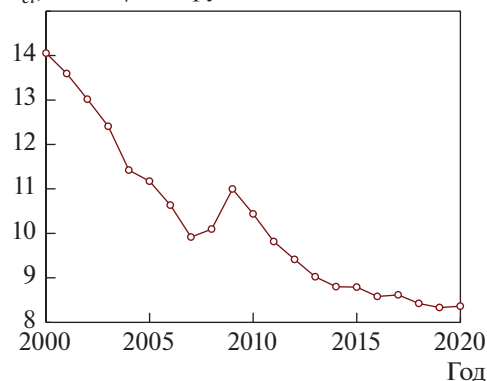


Рис. 5. Электроемкость обрабатывающей промышленности e_{el} в период 2000–2020 гг.

e_{el} , кВт · ч/тыс. руб.

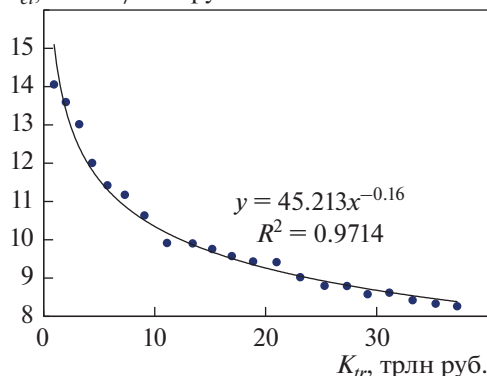


Рис. 6. Зависимость электроемкости обрабатывающей промышленности e_{el} от кумулятивных инвестиций (с поправкой на загрузку производственных мощностей)

же с доходами населения. Учет цены энергоносителя позволяет дополнительно улучшить эти корреляции.

Предлагаемый подход к прогнозированию спроса на энергию отраслями экономики является комплексным. Он представляет собой сочетание эконометрических и аналитических методов и эвристических процедур. Этим достигается более высокая обоснованность прогнозных оценок, что особенно важно при прогнозировании на долгосрочную перспективу. Предельный горизонт корректного применения данного подхода составляет, по мнению авторов, около 15–20 лет.

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ПОДХОДА

Как указывалось выше, предложенный подход многократно и достаточно успешно применялся для прогнозирования спроса на энергию

Таблица 1. Структура производственных отраслей по выпуску продукции и их электроемкости

Производственная отрасль	Структура, %*		Электроемкость, кВт · ч/тыс. руб.	
	2019 г.	2040 г.	2019 г.	2040 г.
Добыча неэнергетических продуктов	1.2	1.0	14.4	12.1
Обрабатывающая промышленность	24.5	24.7	8.3	6.1
Сельское хозяйство	4.2	3.9	3.1	3.1
Строительство	8.6	7.8	1.0	0.8
Транспорт	7.1	6.9	6.3	4.6
Связь	1.5	1.4	2.8	2.3
Прочие услуги	52.9	54.3	2.2	1.6
Всего	100.0	100.0	4.1**	3.1**

* По стоимости производимой продукции.

** Средняя электроемкость по производственным отраслям.

при решении различных задач. С его использованием разработан прогноз внутреннего спроса на электроэнергию на период до 2040 г. для базового сценария развития экономики России. Данный сценарий построен на основе базового варианта Прогноза социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2036 г., утвержденного Правительством России 22.11.2018. При разработке сценария были учтены показатели среднесрочного прогноза развития экономики страны (2019 г.) и кризисные явления в экономике мира и России в 2020 г., обусловленные пандемией коронавируса. Сценарий характеризуется следующими значениями среднегодовых темпов роста ВВП России по периодам, %:

2020–2025 гг.	2.5
2026–2030 гг.	3.2
2031–2035 гг.	3.0
2036–2040 гг.	2.9

Опережающими темпами будут расти обрабатывающая промышленность и сфера услуг — наиболее крупные отрасли. Их доля в суммарном выпуске продукции производственными отраслями в настоящее время превышает 77% и к 2040 г. возрастет до 79%.

Результаты прогнозирования электроемкостей производственных отраслей экономики представлены в табл. 1. Сопоставимость приведенных значений электроемкостей обусловлена их расчетами на основе выпусков продукции, выраженных в постоянных ценах. Средняя электроемкость в целом всех производственных отраслей в 2019 г. составила 4.1 кВт · ч/тыс. руб., и к 2040 г. ожидается ее снижение до 3.1 кВт · ч/тыс. руб., т.е. в 1.3 раза.

В табл. 2 приведены прогнозные значения для деагрегированной обрабатывающей промышлен-

ности, включая структуру выпуска продукции по отраслям в стоимостном выражении и электроемкости. Данные табл. 1, 2 наглядно демонстрируют большое различие производственных отраслей по электроемкости, превышающее 14 раз. Учет этого фактора при значительных структурных изменениях в экономике имеет важное значение для повышения корректности прогнозов спроса на энергию.

Изменения средних по стране значений электроемкости энергетических отраслей в течение рассматриваемого периода отражены в табл. 3. Наиболее сильным ожидается рост удельных расходов электроэнергии при добыче и переработке нефти, что связано, во-первых, с расширением использования вторичных и третичных методов добычи, а во-вторых — с увеличением глубины переработки нефти.

Ожидается повышение среднего по стране душевого потребления электроэнергии домашними хозяйствами с 1090 кВт · ч/(чел · год) в 2019 г. до 1385 кВт · ч/(чел · год) в 2040 г. Это является следствием роста жилищного фонда и продолжающейся электрификации данного сектора (расширение применения средств климат-контроля и т.д.).

Результаты прогнозирования внутреннего спроса на электроэнергию до 2040 г. для базового сценария развития экономики России представлены на рис. 7. Расчеты показали, что в базовом сценарии можно ожидать роста внутреннего спроса на электроэнергию в России с 1110 ТВт · ч в 2019 г. до 1326 ТВт · ч в 2035 г. и 1413 ТВт · ч в 2040 г., т.е. в 1.19 и 1.27 раза соответственно. Следует отметить, что действующей Энергетической стратегией России на период до 2035 г., утвержденной распоряжением Правительства России от 09.06.2020 № 1523-р, предполагается увеличение электропотребления в стране к 2035 г. до 1310–1380 ТВт · ч/год.

Таблица 2. Прогнозные показатели дезагрегированной обрабатывающей промышленности

Отрасль обрабатывающей промышленности	Структура, %*		Электроемкость, кВт · ч/тыс. руб.	
	2019 г.	2040 г.	2019 г.	2040 г.
Производство пищевых продуктов	21.9	23.5	1.9	1.3
Текстильное, швейное и обувное производство	1.7	1.6	12.5	9.7
Обработка древесины	2.2	1.6	5.2	5.5
Производство целлюлозы и бумаги	3.7	3.4	12.5	9.7
Химическое производство	10.4	16.6	10.6	5.9
Производство резиновых и пластмассовых изделий	3.2	4.7	3.8	2.2
Производство прочих неметаллических продуктов	4.6	3.7	9.6	7.8
Металлургическое производство	26.1	21.7	15.2	12.5
Производство машин и оборудования	3.3	2.8	2.8	2.5
Производство электрооборудования и электроники	6.7	6.1	2.0	2.1
Производство транспортных средств	12.0	10.1	2.7	2.2
Прочие обрабатывающие производства	4.2	4.0	26.6	20.2
Всего	100.0	100.0	8.3**	6.1**

* По стоимости производимой продукции.

** Средняя электроемкость по обрабатывающей промышленности.

В табл. 4 прогноз внутреннего спроса на электроэнергию детализирован по отраслям экономики с выделением энергетического и конечного секторов потребления энергии. Ожидается сокращение доли энергетического сектора в суммарном по стране потреблении электроэнергии с 30.8% в 2019 г. до 27.3% в 2040 г., что отражает курс на опережающий рост неэнергетических производств в рассматриваемом сценарии.

В табл. 5 представлена структура спроса на электроэнергию по секторам экономики. В энергетическом секторе прогнозируется увеличение доли добывающих и перерабатывающих отраслей при сокращении доли транспортирования энергоносителей. В секторе конечного потребления энергии можно ожидать роста доли сельского хозяйства и транспортного сектора. Сократится доля домашних хозяйств, что отражает процесс стагнации численности населения страны при продолжающемся росте экономики.

Следует отметить, что рассмотренный базовый сценарий свободен от мероприятий, обуславливающих “новую электрификацию” экономики, включая развитие электротранспорта, переход на электроотопление, массовое применение промышленных и бытовых роботов, цифровую трансформацию общества с переходом на стандарты 5G и далее на 6G, производство водорода электролизом и т.д. Реализация этих направлений может привести к взрывному росту спроса на электроэнергию. В базовом сценарии нет также мероприятий, определяющих политику активного энергосбережения и энергозамещения. Поэтому прогнозные потребности в электроэнергии в нем

Таблица 3. Электроемкость энергетических отраслей

Отрасль	2019 г.	2040 г.
Добыча:		
нефти, кВт · ч/т	138.1	194.2
природного газа, кВт · ч/тыс. м ³	4.5	5.5
угля, кВт · ч/т	16.2	15.2
Переработка:		
нефти, кВт · ч/т	56.5	75.7
природного газа, кВт · ч/тыс. м ³	132.2	112.8
Коксование угля, кВт · ч/т	53.2	52.6
Трубопроводное транспортирование:		
нефти и нефтепродуктов, кВт · ч/(тыс. т · км)	9.6	9.5
природного газа, кВт · ч/(млн м ³ · км)	3.9	3.5

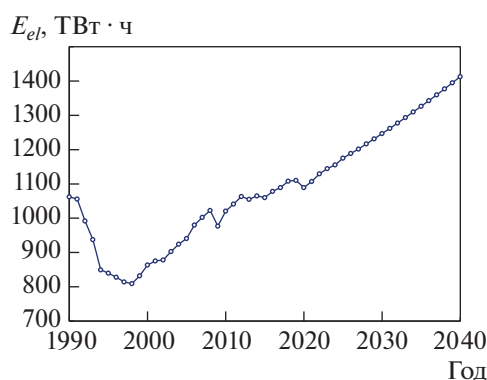
**Рис. 7.** Прогноз внутреннего спроса на электроэнергию E_{el} до 2040 г. (базовый сценарий)

Таблица 4. Прогноз внутреннего спроса на электроэнергию до 2040 г. для базового сценария, ТВт · ч/год

Отрасль	2019 г.	2025 г.	2030 г.	2035 г.	2040 г.
Энергетический сектор					
Добыча топлив	106	116	119	123	125
Преобразование топлив	114	122	125	128	134
Транспортирование энергоносителей	121	125	125	125	126
Всего	341	363	368	376	385
Сектор конечного потребления энергии					
Добыча неэнергетических продуктов	27	28	29	31	34
Обрабатывающая промышленность	304	323	348	373	405
Сельское хозяйство	20	22	25	28	32
Строительство	12	14	15	16	17
Транспорт без трубопроводного транспортирования	67	71	81	91	101
Связь	7	7	7	8	9
Прочие услуги	172	179	195	215	232
Домашние хозяйства	160	169	178	188	199
Всего	769	812	878	950	1029
Итого внутреннее потребление	1110	1176	1247	1326	1414
Доля энергетического сектора, %	30.8	30.9	29.5	28.4	27.3

Таблица 5. Структура спроса на электроэнергию по секторам экономики, %

Отрасль	2019 г.	2025 г.	2030 г.	2035 г.	2040 г.
Энергетический сектор					
Добыча топлив	31.1	32.0	32.2	32.6	32.5
Преобразование топлив	33.3	33.6	33.9	34.1	34.7
Транспортирование энергоносителей	35.6	34.4	33.9	33.3	32.8
Всего	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Сектор конечного потребления энергии					
Добыча неэнергетических продуктов	3.6	3.4	3.3	3.3	3.3
Обрабатывающая промышленность	39.5	39.7	39.6	39.3	39.4
Сельское хозяйство	2.6	2.7	2.8	3.0	3.1
Строительство	1.6	1.7	1.7	1.7	1.6
Транспорт без трубопроводного транспортирования	8.8	8.7	9.2	9.5	9.9
Связь	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8
Прочие услуги	22.3	22.1	22.2	22.6	22.6
Домашние хозяйства	20.8	20.8	20.3	19.8	19.3
Всего	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

могут рассматриваться в качестве базы, к которой может добавляться спрос на электроэнергию со стороны новых классов потребителей, а также могут отражаться результаты экономии электроэнергии, достигаемые при реализации энергосберегающей политики. В этом состоит практическая ценность базового сценария.

В табл. 6 приведены результаты сопоставления прогноза внутреннего спроса на электроэнергию на период 2010–2020 гг. с фактическими данными. Прогноз был выполнен в 2009–2010 гг. на основе статистической информации за период 1990–2010 гг. Рассматривались неблагоприятный, оптимистический и инновационный сценарии социаль-

Таблица 6. Сопоставление прогнозов с фактическими данными за период 2010–2020 гг.

Показатель	Прогнозный сценарий			Фактические данные
	неблагоприятный	оптимистический	инновационный	
Прирост ВВП в 2010–2020 гг., разы	1.18	1.48	1.53	1.12
Рост ВВП в 2010–2020 гг., %/год	1.65	3.97	4.34	1.15
Потребление электроэнергии в 2020 г., ТВт · ч	1180	1253	1284	1074

но-экономического развития страны. К сожалению, в действительности экономическое развитие страны оказалось хуже самого плохого из рассмотренных сценариев. Суммарный за период 2010–2020 гг. фактический прирост ВВП составил 1.12 раза против указанного в неблагоприятном сценарии значения 1.18 раза, а среднегодовые темпы роста ВВП — соответственно 1.15 и 1.65%. В результате фактическое внутреннее потребление электроэнергии в 2020 г. (1074 ТВт · ч) оказалось существенно ниже прогнозирувавшегося для неблагоприятного сценария (1180 ТВт · ч).

Если в неблагоприятном сценарии прогнозируемый рост ВВП может привести к реальному значению, то расхождение между прогнозными и фактическими данными по потреблению электроэнергии на конец периода не превысит 4%. При учете фактора недогрузки производственных мощностей эта разница дополнительно сократится. Это весьма неплохой результат для сложного периода в развитии экономики России. Его начало совпало с выходом из тяжелого экономического кризиса 2008–2009 гг. В середине периода имели место застойные явления, обусловленные санкционным давлением. В его конце разразился новый экономический кризис, вызванный пандемией коронавируса. Приведенные в табл. 6 данные иллюстрируют важность тщательной разработки сценариев социально-экономического развития страны и регионов для корректного прогнозирования спроса на электроэнергию и другие энергоносители.

ВЫВОДЫ

1. Комплексный характер подхода к прогнозированию спроса на энергию отраслями экономики, базирующийся на принципах системного анализа, обеспечивает высокую обоснованность прогнозных оценок, что особенно важно при прогнозировании на долгосрочную перспективу (до 15–20 лет), когда возможны существенные изменения отраслевой и технологической структуры экономики. Драйверами таких изменений могут стать научно-технический прогресс и активная энергетическая и экономическая политика. Примером может служить разворачивающаяся декарбонизация мировой экономики и энергетики.

2. Особую ценность рассматриваемый подход приобретает в случае его использования для разработки взаимосогласованных прогнозов спроса на энергию по стране и регионам.

3. Для формирования сценариев социально-экономического развития страны и регионов применяется разработанная нелинейная условно-динамическая модель взаимосвязей экономики и энергетики МЭНЭК. Подход реализован в виде совокупности имитационных моделей адаптивного типа, объединенных в вычислительную систему EDFS.

4. Накопленный опыт показал корректность применения данного подхода к решению разнообразных задач, связанных с определением долгосрочных перспектив развития энергетики и экономики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Что** нужно сделать для реализации Энергетической стратегии страны / О.Н. Фаворский, В.М. Батенин, В.М. Масленников, В.В. Кудрявый, С.П. Филиппов // Вестник РАН. 2016. Т. 86. № 10. С. 1–6.
2. **Фаворский О.Н., Батенин В.М., Филиппов С.П.** Развитие энергетики: выбор стратегических решений и их реализация // Вестник РАН. 2020. Т. 90. № 5. С. 415–424.
3. **Suganthi L., Samuel A.A.** Energy models for demand forecasting // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2012. V. 16. Is. 2. P. 1223–1240.
4. **An overview of energy demand forecasting methods published in 2005–2015** / I. Ghalekhondabi, E. Ardjmand, G.R. Weckman, W.A. Young // Energy Syst. 2017. № 8. Is. 2. P. 411–447. <https://doi.org/10.1007/s12667-016-0203-y>. <https://www.researchgate.net/publication/301665131>
5. **Ardakani F.J., Ardehali M.M.** Long-term electrical energy consumption forecasting for developing and developed economies based on different optimized models and historical data types // Energy. 2014. V. 65. № 1. P. 452–461. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.12.031>
6. **Singh A.K., Khatoun I.S., Muazzam Md.** An overview of electricity demand forecasting techniques // Network and Complex Syst. 2013. V. 3. № 3. P. 38–48. <https://www.iiste.org/Journals/index.php/NCS/article/viewFile/6072/6026>

7. **Bhattacharyya S.C., Timilsina G.R.** Energy demand models for policy formulation: a comparative study of energy demand models. The World Bank, Policy Research Working Paper 4866, 2009.
8. **Yi-Chung Hu, Peng Jiang.** Forecasting energy demand using neural-network-based grey residual modification models // *J. Oper. Res. Soc.* 2017. V. 68. Is. 5. P. 556–565.
<https://doi.org/10.1057/s41274-016-0130-2>
9. **Junbing Huang, Yuee Tang, Shuxing Chen.** Energy demand forecasting: combining cointegration analysis and artificial intelligence algorithm // *Math. Probl. Eng.* 2018. Article ID 5194810.
<https://doi.org/10.1155/2018/5194810>
10. **Energy** demand forecast methods. California Energy Commission, CEC-400-2005-036, June 2005.
11. **Energy** demand model design for forecasting electricity consumption and simulation demand response scenarios in Sweden / J. Campillo, F. Wallin, D. Torstensson, I. Vassileva // *Proc. of Intern. Conf. on Applied Energy, ICAE-2012.* 5–8 July 2012, Suzhou, China. Paper ID: ICAE2012-A10599. <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:582603/FULLTEXT01.pdf>
12. **Макаров А.А., Вигдорчик А.Г.** Топливо-энергетический комплекс. Методы исследования оптимальных направлений развития. М.: Наука, 1979.
13. **Anderer J., McDonald A., Nakicenovic N.** Energy in a finite world: Paths to a sustainable future / Ed. by W. Hafele. Cambridge, Massachusetts: Ballinger Publishing Company, 1981.
14. **Методы и модели прогнозных исследований взаимосвязей экономики и энергетики** / Ю.Д. Кононов, Е.В. Гальперова, Д.Ю. Кононов, А.В. Лагерева, О.В. Машурова, В.Н. Тыртышный. Новосибирск: Наука, 2009.
15. **MARKAL.** Brookhaven National Laboratory, USA, Upton, 1978.
16. **Basile P.** The IIASA set of energy models: its design and application. IIASA, Laxenburg, Austria, RR-80-31, 1980.
17. **World energy and transition to sustainable development** / L.S. Belyaev, O.V. Marchenko, S.P. Filippov, S.V. Solomin, T.V. Stepanova, A.L. Kokorin. Kluwer Academic Publishers, 2002.
18. **The national energy modeling system: An overview 2009.** DOE/IEA, 2009.
19. **Loulou R., Labriet M.** ETSAP-TIAM: the TIMES integrated assessment model. Part I: Model structure // *CMS.* 2008. № 5. P. 7–40.
<https://doi.org/10.1007/s10287-007-0046-z>
20. **World energy model documentation: 2020 Version** (Last updated: 19 Febr. 2021). Paris: International Energy Agency, 2021.
21. **Филиппов С.П.** Интегрированный подход к прогнозированию потребностей страны и регионов в энергоносителях на долгосрочную перспективу // *Вестник СГТУ.* 2008. № 1 (31). С. 13–27.
22. **Филиппов С.П.** Прогнозирование энергопотребления с использованием комплекса адаптивных имитационных моделей // *Изв. РАН. Энергетика.* 2010. № 4. С. 41–55.
23. **Предложения по развитию методики формирования среднесрочного прогноза спроса на электроэнергию с учетом динамики развития экономики страны и регионов России** / А. Макаров, С. Филиппов, Ф. Веселов, В. Малахов // *ЭнергоРынок.* 2013. № 5. С. 33–39.
24. **Filippov S.P., Grygorieva N.A., Makarova E.M.** Energy Demand Forecasting System // *Proc. of 2018 Intern. Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon).* Vladivostok, Russia, 3–4 Oct. 2018. IEEE Xplore.
<https://doi.org/10.1109/FarEastCon.2018.8602786>
25. **SCANER** – super complex for active navigation in energy research / F.V. Veselov, O.A. Eliseeva, V.A. Kulagin, V.A. Valakhov, T.A. Mitrova, S.P. Filippov, L.S. Plakitkina, A.A. Makarov. M.: ERI RAS, 2011.
26. **The energy efficiency of the Russian economy: current state and outlook** / S.P. Filippov, E.V. Mokhina, E.M. Makarova, N.A. Grigoreva, I.V. Magalimov // *Therm. Eng.* 2010. V. 57. № 14. P. 1171–1178.
27. **Филиппов С.П., Дильман М.Д., Ионов М.С.** Потребности электроэнергетики России в газовых турбинах: текущее состояние и перспективы // *Теплоэнергетика.* 2017. № 11. С. 53–65.
<https://doi.org/10.1134/S0040363617110054>
28. **Филиппов С.П., Дильман М.Д.** ТЭЦ в России: необходимость технологического обновления // *Теплоэнергетика.* 2018. № 11. С. 5–22.
<https://doi.org/10.1134/S0040363618110024>
29. **Филиппов С.П.** Новая технологическая революция и требования к энергетике // *Форсайт.* 2018. Т. 12. № 4. С. 20–33.
30. **Ludwig von Bertalanffy.** General system theory: foundations, development, applications. N.Y.: George Braziller, 1968. Revised ed. 2003.
31. **Мелентьев Л.А.** Системные исследования в энергетике. М.: Наука, 1983.
32. **Инструментальные средства для количественного исследования взаимосвязей энергетики и экономики** / А.А. Макаров, Д.В. Шапот, А.М. Лукацкий, В.А. Малахов // *Экономика и математические методы.* 2002. Т. 38. № 1. С. 45–56.
33. **Дубынина Т.Г., Малахов В.А.** Анализ тенденций в отраслевой структуре экономики субъектов Российской Федерации и в региональной структуре экономики страны // *Проблемы прогнозирования.* 2014. № 3. С. 96–107.
34. **Малахов В.А., Дубынина Т.Г.** Сценарий социально-экономического развития регионов страны на период до 2030 г. с учетом реализации крупных инвестиционных проектов в субъектах РФ // *Проблемы прогнозирования.* 2016. № 4. С. 95–108.

Long-Term Energy Demand Forecasting Based on a Systems Analysis

S. P. Filippov^{a, *}, V. A. Malakhov^a, and F. V. Veselov^a

^a Energy Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117186 Russia

*e-mail: fil@eriras.ru

Abstract—Energy demand forecasting plays a key role in solving the majority of problems connected with determining the economic and energy development prospects. In view of high inertia and capital intensity of energy generation facilities, the changes in the energy consumption structure and rates should be considered for a sufficiently long-term future of no less than 15 years. This adds much difficulty to the development of such forecasts, because it is necessary to take into account the possible results of technological progress in different sectors of the economy and changes in its structure. The suggested approach to energy demand forecasting is based on the systems analysis methods. Energy consumers are disaggregated by economic sectors, country regions, energy carriers, and their utilization areas. As a result, it becomes possible to take into account the possible future technological and structural changes in the economy, its differences in different regions, mutual replacements of energy carriers, and energy saving. The most important feature of the approach is that it involves the separation of economic and energy variables. Economic variables determine the development scales of economic sectors, and energy variables determine the energy consumption intensities in them. The separation of variables helps obtain essentially more accurate forecasts owing to the possibility of taking into account the differences in the variation trends of these variables in the forecast period. For forecasting the economic variables, a nonlinear conditionally dynamic model of interrelations between the economy and energy is used. The energy variables are forecasted on the basis of their links with economic factors, e.g., with cumulative investments in the fixed capital of the considered economic sectors. The discussed approach was implemented as the totality of adaptive simulation models united into the EDFS computing system. The approach was repeatedly and quite successfully used to forecast the energy demand for an up to 10–20-year horizon in solving various problems. The gained experience has demonstrated the correctness of applying the approach for solving long-horizon forecast problems. To illustrate the capacities of the approach, the electric energy demand forecast for the period of up to 2040 for the basic version of the social and economic development of Russia's economy prepared on the basis of this approach is presented.

Keywords: energy, energy carrier, economy, demand, forecasting, methodology, systems analysis, efficiency, specific energy consumption, energy intensity, long horizon