

## МЕТОДЫ И МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ НА РЕГИОНАЛЬНОМ УРОВНЕ

Галина Старкова

**Abstract:** В работе исследуются ряд существующих в отечественной и зарубежной практике подходов к моделированию энергопотребления, а также возможности их применения для построения модели конъюнктуры оптового рынка электроэнергии и мощности, на базе которой будет сформирован программный комплекс моделирования электропотребления РФ в региональном разрезе. Целью данной работы является описание модуля моделирования и прогнозирования электропотребления. Предполагается построение моделей различных спецификаций, включая регрессионные (множественные регрессии, регрессии с учётом сезонной декомпозиции и корректировки – CensuSI), экстраполяционные (ARMA, ARIMA, ARMAX) и нейросетевые модели, учитывающие многогранные аспекты процесса электропотребления. Исходные данные для моделирования электропотребления были взяты с таких официальных источников, как Росстат (Федеральная служба государственной статистики), Министерство экономического развития РФ, НП «Совет рынка» (Некоммерческое партнёрство «Совет рынка» по организации эффективной системы оптовой и розничной торговли электрической энергией и мощностью), Международный Валютный Фонд (IMFPrimaryCommodityPrices) и других. Кроме модуля моделирования и прогнозирования электропотребления, в состав рассматриваемого программного комплекса будет включён модуль, обеспечивающий интеграцию с уже существующими информационными системами, единое хранилище данных, а также модуль визуализации данных и формирования отчётов. Структура комплекса будет учитывать возможность дальнейшего расширения функциональности, в том числе посредством расширения возможностей имеющихся функциональных модулей и интеграции новых.

**Keywords:** моделирование электропотребления; эконометрические модели; нейросетевое моделирование; информационно-аналитические системы; системы поддержки принятия решений; единое хранилище данных; контейнер моделирования.

**ACM Classification Keywords:** H. Information Systems: H.1 Models and Principles, H.4 Information Systems Applications. I.6 Simulation and Modeling: I.6.5 Model Development.

---

### Введение

Рост мирового энергопотребления по-прежнему во многом определяют долгосрочные тенденции, тесно связанные с процессами индустриализации, урбанизации и глобализации. Эти тенденции проявляются в увеличении объёма потребляемой энергии, повышении эффективности добычи и потребления энергии, а также растущей диверсификации источников энергии. Перечисленные факты заставляют крупных производителей и потребителей энергии уделять всё большее внимание процессам прогнозирования, особенно в условиях жёсткой конкуренции на рынке.

Крупные энергопотребители, стремясь выйти на оптовые рынки электроэнергии, сталкиваются с необходимостью составления заявок на энергопотребление. Причём последующее отклонение реального потребления от заявленного может быть чревато штрафными санкциями от поставщика. Недооценка ожидаемого энергопотребления приводит к необходимости использования дорогих пиковых станций. Завышенный прогноз энергопотребления приводит к увеличению издержек на поддержание в рабочем состоянии излишних резервных мощностей. С другой стороны, производители электроэнергии заинтересованы в прогнозах энергопотребления с целью оперативного реагирования на спрос и с целью оптимального развития инфраструктуры. Эффективность мероприятий по управлению энергопотреблением, качество планирования и экономичность режимов работы энергосистемы определяются достоверностью прогноза. Повышение точности прогноза энергопотребления способствует

экономии энергоресурсов, увеличению эффективности работы и соответственно увеличению прибыли энергопредприятий.

Прогнозирование энергопотребления является многоэтапным и многоуровневым процессом, результаты которого могут использоваться для формирования рациональной стратегии развития энергетики как страны в целом, так и отдельных её субъектов в частности.

### **Отечественные и зарубежные подходы к моделированию энергопотребления**

Исследования в области прогнозирования энергопотребления проводятся Международным энергетическим агентством (International Energy Agency), Международным агентством по атомной энергии (International Atomic Energy Agency), Международным институтом прикладного системного анализа (International Institute for Applied Systems Analysis), Всемирным энергетическим советом (World Energy Council), транснациональными корпорациями – British Petroleum, Exxon Mobil и другими. В Российской Федерации проблемами прогнозирования энергопотребления занимается Министерство экономического развития РФ, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН, ОАО «Институт «Энергосетьпроект» и другие.

Достаточно долгое время исследования развития энергетики и экономики, а также их взаимосвязи, определялись преимущественно потребностями среднесрочного и краткосрочного прогнозирования спроса на электроэнергию и на отдельные виды топлива. Большинство исследований сводилось к построению эконометрических моделей, выявляющих зависимости энергопотребления от ключевых макроэкономических показателей: индексы промышленного производства, роста численности и доходов населения и других. При этом обратное влияние стоимости энергоресурсов и структуры производства на макроэкономические показатели и, как следствие, на величину энергопотребления не рассматривались. Данный подход был оправдан в период относительно стабильных и низких цен на энергоресурсы[1].

Для исследования и прогнозирования долгосрочного энергопотребления существует достаточно широкий спектр методов, однако наибольшее распространение получил метод прямого счёта и различные его модификации. Метод прямого счёта заключается в выборе определённого числа наиболее энергоёмких производств, детальном изучении их энергоёмкостей и построении прогнозов на основе планируемых объёмов производств и выявленной динамики удельных энергозатрат. Как правило, данный метод применяется для горизонта прогнозирования до 15 лет, поскольку именно для такого периода прогнозирования существует возможность собрать всю необходимую информацию, исходя из существующей технологии производства, программ экономического развития страны и регионов, а также принятых к реализации инвестиционных проектов.

При прогнозировании энергопотребления используются также эконометрические методы, в основе которых лежит объединение экономической теории, прикладного математического инструментария и экономической статистики. Регрессионные уравнения отображают зависимость эндогенных переменных модели от внешних воздействий в условиях, описываемых параметрами модели. К существенным недостаткам эконометрического подхода следует отнести, прежде всего, инерционность прогнозов, полученных на основе предыстории, и отсутствие возможности появления новых тенденций в рассматриваемой системе. Перечисленными недостатками также обладает и метод анализа долгосрочных тенденций, основанный на исследовании длительных временных рядов уровней энергопотребления и факторов, существенно влияющих на величину энергопотребления. Этот метод применяется преимущественно в странах с устойчиво развивающейся экономикой, как правило, включается в комплекс моделей прогнозирования энергопотребления как один из возможных методов прогнозирования, крайне редко используется изолированно от других методов.

Метод межстрановых сравнений, основанный на выявлении закономерностей в развитии энергопотребления и экономик различных стран, используется преимущественно для прогнозирования отдельных показателей энергопотребления в секторах экономики, технологических процессов, тенденции развития которых могут быть сопоставимы и сравнимы между собой. На практике метод межстрановых

или межрегиональных сравнений достаточно часто используется для верификации полученных результатов моделирования и прогнозирования.

Широкое распространение в мире получило прямое или косвенное использование моделей, основанных на методе полных энергетических затрат межотраслевого баланса (energyanalysisnetto). Идея этого метода заключается в определении энергетической эффективности источников энергии из соотношения энергетической ценности производимого энергоносителя и полных затрат энергии на него. Одним из преимуществ моделей межотраслевого баланса является возможность учёта и анализа не только прямых, но и косвенных энергетических затрат. Помимо моделей межотраслевого баланса при моделировании энергопотребления часто используют различные балансовые соотношения.

Последнее время всё большее распространение получают методы прогнозирования, связанные с использованием искусственных нейронных сетей. Для решения большинства прикладных задач используются трёх- и четырёхслойные нейросети. При этом в многослойных нейронных сетях каждый слой рассчитывает нелинейное преобразование от линейной комбинации сигналов предыдущего слоя, таким образом, достигается аппроксимация произвольной многомерной функции при соответствующем выборе количества слоёв, диапазоне изменения сигналов и параметров нейронов [2]. Одним из недостатков нейросетевых моделей является прежде всего их недетерминированность. Подразумевается, что после обучения сеть представляет собой «чёрный ящик», логика расчета прогнозных значений совершенная скрыта от пользователя. На практике в принципе существуют алгоритмы «извлечения знаний из нейронной сети», способные формализовать обученную нейронную сеть до списка логических правил, образующих своеобразную экспертную систему. Однако не следует забывать о том, что после каждого процесса обучения нейросетевые модели способны выдавать различные результаты.

Рассмотренные методы недостаточно учитывают сложные и меняющиеся взаимосвязи между объёмами энергопотребления, условиями и уровнем развития экономики и топливно-энергетическим комплексом в целом. Необходимость учёта этих взаимосвязей побуждает исследователей создавать комплексы экономико-математических моделей, описывающих наиболее существенные аспекты энергопотребления. Из зарубежных разработок следует в первую очередь упомянуть известную французскую модель MEDEE [3], модели PRIMES [4], VLEEM [5], получившие распространение в странах Западной Европы, американские модели NEMS [6], PURHAPS, INRAD, ISTUM, ORIM [7], канадскую CREECM [8] и другие.

MEDEE – имитационная модель, позволяющая оценивать влияние на энергопотребление таких факторов, как структура и темпы промышленного производства, уровень жизни населения, политика энергосбережения в отдельных секторах и так далее. При этом потребности в энергии рассчитываются как для производственной, так и для непроизводственной сфер экономики.

Система Моделей PRIMES, разработанная для 15 стран Европейского Союза, используется в качестве инструмента для анализа энергетической политики в тесной взаимосвязи с энергетическими технологиями. С помощью моделей PRIMES возможно построить энергетические балансы, определить потребность в энергии по различным видам энергоносителей, выбросы  $CO_2$  и другие показатели, характеризующие функционирование энергетической системы. Европейская энергетическая модель VLEEM (Very Long Energy and Environmental Model) предназначена для более длительного периода прогнозирования от 50 до 100 лет.

Подводя итог краткому обзору существующих методов и моделей прогнозирования энергопотребления, можно выделить следующие тенденции: расширение числа внешних связей топливно-энергетического комплекса, переход от создания изолированных экономических и энергетических моделей к их синтезу, а также создание комплексов моделей, позволяющих отражать процесс энергопотребления в отдельных секторах экономики с различным уровнем детализации и агрегации моделируемых показателей, а также проводить многовариантные сценарные расчёты.

С учётом выявленных тенденций при решении задачи прогнозирования электропотребления Российской Федерации в региональном разрезе было принято решение о создании программного комплекса моделирования электропотребления, реализованного в виде автоматизированного комплекса функций по приёму, обработке, передаче, хранению, отображению и анализу данных, с использованием показателей международной, макроэкономической и отраслевой статистик и прогнозированию отраслевого развития. Программный комплекс моделирования электропотребления должен включать в себя следующие элементы:

- модуль, обеспечивающий интеграцию с существующими информационными системами;
- единое хранилище данных;
- модуль моделирования и прогнозирования основных сегментов электропотребления;
- модуль моделирования и прогнозирования конечного электропотребления;
- модуль визуализации данных и формирования отчётов.

Программный комплекс моделирования электропотребления будет реализован с использованием Аналитического комплекса «Прогноз-5» [8] (АК «Прогноз-5»), созданного ведущим российским разработчиком систем бизнес-аналитики ЗАО «Прогноз» (рис. 1, [9]). Программный комплекс позволяет получать сценарные точечные (изолированные, комплексные, интегральные) и интервальные прогнозные оценки электропотребления на долгосрочную перспективу.

АК «Прогноз-5» предназначен для разработки информационно-аналитических систем и систем поддержки принятия решений в различных сферах экономики и включает в себя информационное хранилище данных, контейнер моделирования, конструктор построения отчётов и визуализации данных. Информационное хранилище данных содержит постоянно обновляемую информацию более чем из 160 российских и международных источников, таких как Росстат, Всемирный банк, Организация Объединённых Наций, Евростат и другие. В контейнере моделирования осуществляется построение модели и оценка её качества. В АК «Прогноз-5» реализован автоматический расчёт и отображение различных статистических характеристик временного ряда, а так же поддержка широкого класса методов моделирования, включая эконометрические, балансовые, оптимизационные, сценарное прогнозирование возможных последствий принятия управленческих решений, поиск оптимальных управляющих параметров экономической системы при заданных ограничениях.

Для создания программного комплекса моделирования электропотребления РФ в региональном разрезе был апробирован ряд существующих методов моделирования и прогнозирования электропотребления на примере суммарного электропотребления Пермского края в динамике по месяцам. Прогнозирование электропотребления является многоэтапным процессом, требующим большого объёма разнородной по качеству информации: объёмы производства по различным видам экономической деятельности, коэффициенты энергоёмкостей, средняя температура, длина светового дня, количество рабочих дней в месяце и других. Исходные данные взяты из таких официальных источников как Росстат (Федеральная служба государственной статистики), Министерство экономического развития РФ, НП «Совет рынка» (Некоммерческое партнёрство «Совет рынка» по организации эффективной системы оптовой и розничной торговли электрической энергией и мощностью), Международный Валютный Фонд (IMF Primary Commodity Prices) и других.

В результате проведённого исследования построены модели различных спецификаций:

1. Регрессионные модели:
  - множественные регрессии;
  - регрессии с учётом сезонной декомпозиции и корректировки (CensusII);
2. Экстраполяционные модели:
  - модели экспоненциального сглаживания;
  - ARMA;
  - ARIMA;
  - ARMAX.

### 3. Нейросетевые модели.

В каждой из перечисленных групп, были построены модели, включающие различные экзогенные переменные, и оценено их качество.



Рис. 1. Структура и сферы применения АК «Прогноз»

Для идентификации моделей использовались данные в динамике по месяцам в период с 01.01.2005 по 31.12.2010. При сравнении полученных модельных значений с фактическими значениями электропотребления за 2011 год, наиболее точные результаты показали модели ARIMA, нейросетевые модели и регрессии с учётом сезонной декомпозиции и корректировки. На основе проведённых расчетов построено несколько комплексных моделей, включающих выбранные модели с определёнными неотрицательными весовыми коэффициентами, в сумме образующих единицу. На начальном этапе исследования было выбрано два варианта определения соответствующих весов: первый вариант – равновесное включение выбранных моделей, второй вариант – с учётом модуля абсолютной ошибки прогноза. Полученные результаты приведены на рис. 2.

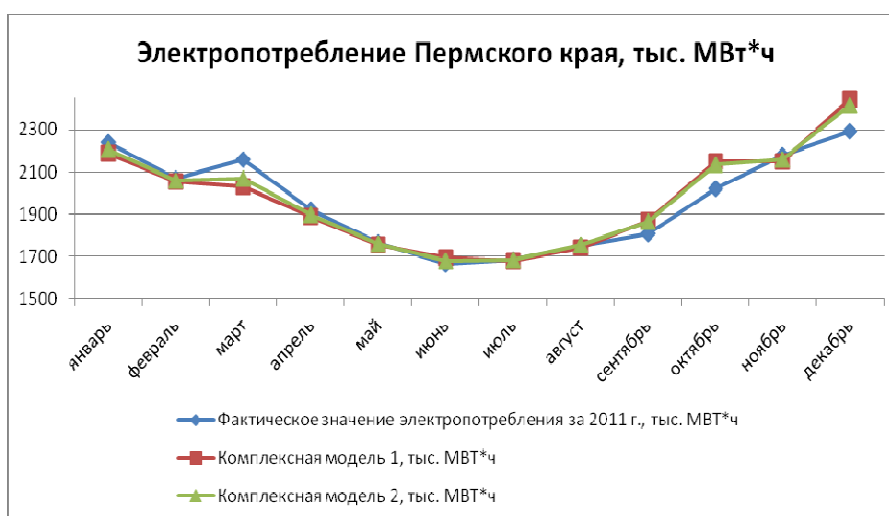


Рис. 2. Фактическое и модельные значения электропотребления Пермского края

В процессе исследования также рассматривался вариант построения агентной имитационной модели электропотребления регионов. Но для построения агентных моделей требуется детальное описание поведения агентов. Однако в случае моделирования электропотребления на уровне региона достаточна высокая степень агрегации, что исключает возможность описания поведенческой составляющей, которая значительно усредняется при подобной агрегации. Традиционно причинами применения имитационного моделирования являются неразработанность, сложность и трудоёмкость аналитических методов решения математической модели. На основании перечисленных причин и в силу отсутствия данных об электропотреблении отдельных агентов на первом этапе исследования было принято решение отказаться от построения имитационных моделей.

---

### Заключение

В работе представлен проект модели конъюнктуры оптового рынка электроэнергии и мощности, на базе которой будет построен программный комплекс моделирования электропотребления, описаны существующие отечественные и зарубежные подходы к моделированию энергопотребления. Структура комплекса будет учитывать возможность дальнейшего расширения функциональности, в том числе посредством расширения возможностей имеющихся функциональных модулей и интеграции новых.

---

### Библиографический список

1. Системные исследования в энергетике: Ретроспектива научных направлений СЭИ–ИСЭМ / отв. ред. Н.И. Воробай. – Новосибирск: Наука, 2010. – 686 с.
2. Медянцев Д.В., Фирсов А.В., Замятин Н.В. Нейросетевая система прогнозирования энергопотребления // Научная сессия МИФИ – 2003 V Всероссийская научно-техническая конференция «Нейроинформатика - 2003» Сборник научных трудов в 2-х частях. Ч. I, М, МИФИ, 2003 – 244 с. – С. 221-226.
3. Cheateu B., Lapillone B. The MEDEE Approach: Analysis and Long-Term Forecasting of Final Energy Demand of Country. – France, 1978.
4. The PRIMES Energy System Model Summary Description. – National Technical University of Athens. – European Commission Joule-III Programme. – 16 p. <http://www.e3mlab.ntua.gr/manuals/PRIMsd.pdf>
5. VLEEM – Very Long Term Energy Environmental Modelling. – Final Report. – 2002. – 66 p. <http://www.vleem.org/PDF/annex1-demande-model.pdf>
6. Коган Ю.М. Современные проблемы прогнозирования потребностей в электроэнергии // Открытый семинар «Экономические проблемы энергетического комплекса». ИНП РАН. – М., 2006.
7. Методы и модели прогнозных взаимосвязей энергетики и экономики / Ю.Д. Кононов, Е.В. Гальперова, Д.Ю. Кононов и др. – Новосибирск: Наука, 2009. – 178 с.
8. Свидетельство Российского агентства по патентам и товарным знакам № 2005610980 от 22.04.2005 об официальной регистрации программы для ЭВМ «Аналитический комплекс «Прогноз-5» (АК «Прогноз-5»). Авторы: Андрианов Д.Л., Полушкина Г.К. и др.
9. Официальный сайт компании ЗАО «ПРОГНОЗ» <http://www.prognoz.ru>

---

### Сведения об авторах



**Галина Старкова** – Пермский государственный национальный исследовательский университет, аспирант, ассистент кафедры информационных систем и математических методов в экономике, Россия, г. Пермь, 614990, ул. Букирева, д. 15; e-mail: [Starkova@prognoz.ru](mailto:Starkova@prognoz.ru)  
Major Fields of Scientific Research: математические и инструментальные методы экономики; информационно-аналитические системы и системы поддержки принятия решений.