

На правах рукописи

Иванов Евгений Юрьевич

**МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СПОТОВЫХ ЦЕН НА
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ НА ОПТОВОМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ РЫНКЕ**

*Специальность 08.00.05 «Экономика и управление народным хозяйством»
(экономика, организация и управление предприятиями, отраслями,
комплексами - промышленность)*

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата экономических наук

Санкт-Петербург - 2005

Диссертация выполнена на кафедре «Международные экономические отношения» Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования „Санкт-Петербургский государственный политехнический университет“.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ: Доктор экономических наук, профессор
Окороков Василий Романович

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ: Доктор экономических наук, профессор
Хабачев Лев Давидович

Кандидат экономических наук
Никишин Евгений Сергеевич

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ: ОАО «ЛЕНЭНЕРГО»

Защита состоится «__» _____ 2005 г. в «14» часов на заседании Диссертационного совета Д 212.229.23 ГОУ ВПО „Санкт-Петербургский государственный политехнический университет“ по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, III учебный корпус, ауд. 506.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО „Санкт-Петербургский государственный политехнический университет“.

Автореферат разослан «__» _____ 2005 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат экономических наук, доцент

С.Б. Сулова

I. Общая характеристика работы

Актуальность исследований. Процесс перехода к либерализированному энергетическому рынку ставит электроэнергетические компании в новые конкурентные условия и определяет необходимость разработки новых подходов к прогнозированию цены на электрическую энергию и учету экономических взаимоотношений между участниками рынка электроэнергии и мощности.

Особенно важен прогноз спотовых (на день вперед) цен на электроэнергию как составляющей процесса планирования работы производителей электроэнергии. Такой прогноз необходим при принятии решений о доле электроэнергии, вырабатываемой на собственных станциях, или покупаемой на бирже электроэнергии. Другой группой пользователей прогноза спотовых цен являются потребители электроэнергии, принимающие решение об участии на спотовом рынке электроэнергии либо о хеджировании рисков, например, путем подписания двусторонних контрактов на покупку электроэнергии.

В условиях либерализированной электроэнергетики цена на электроэнергию является одним из факторов, определяющих систему экономических взаимоотношений между участниками рынка электроэнергии. При увеличении периода прогноза стохастические факторы становятся более значимыми для определения уровня цены по сравнению с детерминированными. Вероятность наступления отдельного события становится меньше при увеличении интервала прогнозирования. Различают внешние и внутренние факторы, оказывающие влияние на спотовую цену оптового рынка электроэнергии. Такие внутренние факторы, как, затраты на топливо, материалы и другие, были детально исследованы в России и за рубежом. Однако отечественная литература, посвященная оценке и моделированию влияния внешних факторов на либерализованные спотовые цены, находится в стадии формирования. Отмечается недостаток системного методологического подхода при оптимизации работы отдельных производителей и покупателей на бирже электроэнергии в России. Недостаточная разработанность этих проблем определила актуальность темы, цели и задач диссертационного исследования.

Цель исследования. Целью работы является разработка методики прогнозирования спотовых цен на электрическую энергию на оптовом рынке электроэнергии (мощности).

Исходя из этой цели в работе решались следующие задачи:

- систематизация принципов формирования и механизмов работы оптовых рынков электроэнергии и уточнение классификации энергетических рынков;
- разработка методики прогнозирования спотовых цен на электроэнергию;
- классификация и отражение в моделях прогнозирования факторов, оказывающих наиболее существенное влияние на спотовую цену электроэнергии;

- прогнозирование спотовых цен на электроэнергию на основе стандартных моделей авторегрессии и скользящего среднего (АРСС) и построение зависимостей для отражения их стохастических свойств;
- исследование возможности модификации АРСС модели за счет добавления в нее новых факторов, учитывающих важнейшие свойства цен на электроэнергию.

Объектом исследования является оптовый рынок электроэнергии РФ.

Предмет исследования - система ценообразования и экономических взаимоотношений между субъектами рынка электроэнергии.

Теоретической и методологической основой исследования являются нормативно-законодательные акты, методы корреляционного и факторного анализа, теории вероятностей и математической статистики, экономико-математического моделирования.

Информационную базу исследования составили материалы российской и международной статистики, литература по указанному предмету исследования, официальная отчетность российских и зарубежных компаний.

В качестве исходных данных по биржам электроэнергии использовалась: статистика цен и объемов на спотовых рынках электроэнергии на основе следующих индексов: АТС (Россия), CalPX (Калифорния, США), CAMMESA (Аргентина), NordPool (Скандинавские страны), New England (США), EEX (European Energy Exchange, Германия), SWEP (Швейцария), Cepi (Proissen Elektra, Германия), а также временных рядов значений температуры воздуха, скорости ветра, освещенности и другие.

Научная новизна исследования состоит в следующем:

- систематизированы принципы формирования и функционирования оптовых рынков электроэнергии и предложена более полная классификация энергетических рынков по их функциональным особенностям (экономический и балансирующий рынки, рынки безопасности и надежности/мощности);
- разработана методика прогнозирования спотовых цен на электроэнергию, позволяющая прогнозировать цены на оптовом энергетическом рынке на период до трех месяцев, отражающая основные свойства цен на электроэнергию;
- исследованы и включены в модифицированную АРСС модель факторы, оказывающие наибольшее влияние на уровень цен на электроэнергию;
- разработаны стохастические модели для расчета вероятностей возможных ценовых сценариев на бирже электроэнергии до двух-трех месяцев на основе прогноза с использованием стандартных моделей АРСС для различных рынков электроэнергии, отличающиеся от других моделей возможностью расчета вероятностей в зависимости от всех предшествующих уровней цен, а не только от предыдущего;
- модифицирована модель АРСС, что позволило учесть такие свойства цен на электроэнергию, как сезонность, зависимость волатильности цены от ее уровня, выбросы цены и ее возврат к среднему значению. Предложена

зависимость для учета сезонных особенностей цен на электроэнергию в течение динамического промежутка времени, состоящего из нескольких дней;

- разработана имитационная модель для определения спотовой цены на электроэнергию для принятия решения о ее доле, покупаемой на оптовом рынке электрической энергии.

Практическая значимость исследования состоит в разработке более обоснованной методики прогнозирования временных рядов, позволяющей строить прогнозы цены на электроэнергию с учетом ее важнейших свойств. Результаты исследования могут быть использованы для оптимизации объемов покупки/продажи электроэнергии при участии на оптовом рынке электроэнергии и при принятии стратегических решений.

Апробация и достоверность результатов исследования. Основные результаты и положения работы докладывались автором на международных и российских научно-практических конференциях в СПбГПУ, в техническом университете RWTH-Aachen (IAEW, Германия).

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 10 научных работ, общим объемом 2,3 п.л.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, приложений.

Во введении анализируются современные рынки электрической энергии, обосновывается актуальность и направленность темы диссертационной работы. Приводится краткое описание основных положений научной новизны и практической значимости работы. Формулируются цель и задачи исследования.

В первой главе приводятся результаты исследования организации и функционирования зарубежных и российского рынков электроэнергии. Рассмотрены цели либерализации, типы рынков электроэнергии и функции их участников. Представлены результаты сравнительного анализа отдельных рынков, а также регулируемого и конкурентного сектора в России.

Вторая глава содержит разработанную автором методику прогнозирования спотовых цен на электроэнергию и результаты расчета с ее использованием. Приведены зависимости для существующих и модифицированных моделей APSS. Полученные прогнозные значения сравнивались с альтернативными моделями прогнозирования и с фактическими значениями спотовых цен на электроэнергию.

В третьей главе отражены разработанные автором алгоритмы расчета дерева сценариев на основе определения вероятностей отдельных уровней цен и вероятностей перехода из одного состояния в другое. Представлены единичные результаты расчета дерева сценариев спотовых цен. Описаны методы оптимизации экономических взаимоотношений между субъектами оптового рынка.

Заключение содержит основные выводы и результаты исследования.

II Основные научные результаты, полученные в ходе работы

2.1 Анализ либерализованных рынков электроэнергии и методика прогнозирования спотовых цен на электроэнергию

Проведена систематизация результатов анализа организации и работы зарубежных и российского рынков электроэнергии. Рассмотрены основные этапы либерализации рынков электрической энергии: монополия, единый закупщик, оптовая конкуренция, розничная конкуренция. Дана классификация рынков электрической энергии и их характерные организационные особенности, включая функциональные обязанности участников рынка и принципы их взаимодействия. Приводится сравнительная оценка различных типов рынков. Рассматриваются основные структурные особенности и делаются выводы о взаимосвязанности между вышеупомянутыми особенностями и типом рынка электроэнергии.

Уточнена классификация основных рынков электроэнергии по функциональным и структурным особенностям, в том числе:

- экономический рынок (энергия и потери);
- рынок безопасности (пропускная способность электрических сетей);
- рынок надежности/мощности (первичное, вторичное и минутное резервирование, автономное включение энергоблоков в работу, поддержание уровня частоты и напряжения, системное регулирование и другое);
- балансирующий рынок (отклонения фактических объемов электроэнергии от плановых в краткосрочном периоде).

Вышеперечисленные рынки могут подразделяться по другим признакам, например: по времени - однодневный и долгосрочный; по передаче электроэнергии - физический и финансовый и т.д.

Предполагается дальнейшее разделение между монопольной областью услуг и конкурентным сектором генерации и сбыта электроэнергии. Разделение производится для товара «электрическая энергия» и услуг по обеспечению работы единой электроэнергетической системы. Специфику товара «электрическая энергия» составляют: нескладируемость, высокие требования к качеству и надежности поставок, монополия транспорта электроэнергии и системных услуг, неэластичный спрос со стороны таких групп потребителей, как население и других.

В диссертационной работе проанализирована двухсекторная модель рынка электроэнергии: регулируемый ФОРЭМ, конкурентный «Сектор 5-15%», регулируемый сектор внутри соответствующего АО-Энерго. Исследованы следующие особенности Российской электроэнергетики и предложены возможные пути их решения для: перекрестного субсидирования, регулирования тарифов, относительно низкой ликвидности и рентабельности электроэнергетической отрасли.

В рамках анализа отдельных секторов рынка систематизированы методы определения степени монополизации отдельных секторов рынка. Представлена классификация аукционов в конкурентном секторе рынка: простой аукцион; аукцион с учетом пропускной способности; аукцион с

учетом полной электрики. Приведены результаты анализа статистических данных по ценам на монопольных и конкурентных секторах рынка. Выявлена зависимость уровня цены на свободном секторе рынка от величины соотношения спроса и предложения.

Были рассмотрены основные роли и функции участников рынка электроэнергии, являющихся монопольными, и порядок взаимодействия между ними после открытия розничного рынка электроэнергии (табл.1). На рисунке 1 представлены основные потоки информации, электроэнергии и финансов после реструктуризации рынка электроэнергии в России. Темой исследования являлись также анализ существующих особенностей реструктуризации АО-Энерго и определение возможных сценариев реформирования на перспективу.

Таблица 1.

Функции участников рынка электроэнергии на монопольных секторах

Участник рынка	Основная функция
ФСК	организация управления Единой национальной электрической сетью, поддержание ее в исправности и обеспечение инвестиций
Системный оператор	оперативно-техническое управление режимами ЕЭС, обеспечение надежного и безопасного функционирования и развития ЕЭС
АТС	финансовые функции биржи электроэнергии, включая, регистрацию участников торгов и нахождение равновесной цены на электроэнергию
Центр финансовых расчетов	обеспечение осуществления финансовых расчетов за электроэнергию и услуги участников рынка

Представлены особенности российского оптового рынка переходного периода и возможные пути его решения для: перекрестного субсидирования (перенос с розничного уровня «АО-Энерго» на оптовый рынок электроэнергии или перенос нагрузки на ГЭС); относительно высокая волатильность на секторе свободной торговли «ССТ» (сочетание заявок на день вперед с долгосрочными заявками и двусторонними контрактами, использование „прерываемых“ контрактов); повышение тарифов для населения и других бытовых групп потребителей (сохранение социальных льгот с изменением источника финансирования); неконкурентоспособность ТЭЦ и некоторых возобновляемых источников энергии (законодательно закреплённая финансовая поддержка); износ основного оборудования (налоговые льготы для новых энергообъектов). Для противодействия арбитражу на бирже электроэнергии рекомендуется использование автоматического ограничения цены, при значительном превышении средней величины за предыдущие дни.

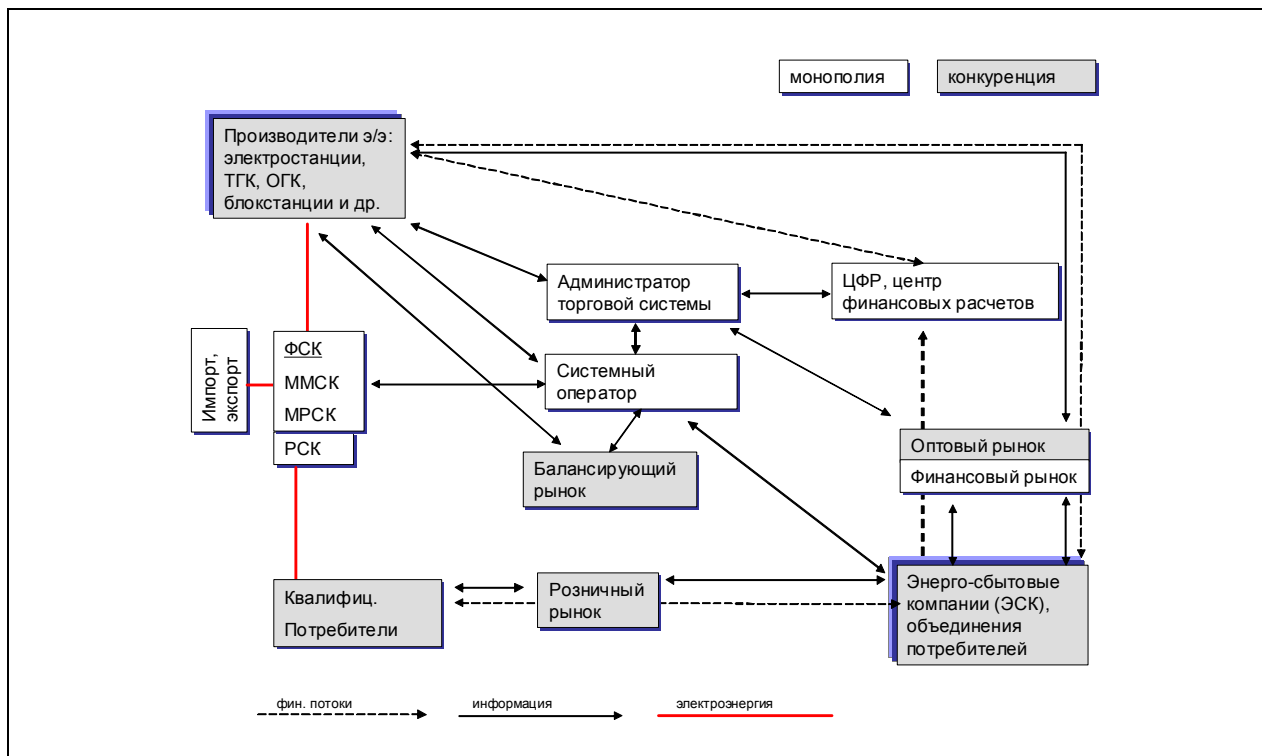


Рис. 1. Информационные и финансовые потоки и передача электроэнергии после завершения либерализации рынка электроэнергии и мощности в РФ

Рассмотрено текущее состояние реструктуризации электроэнергетики в России, особенности энергетических рынков, оказывающие решающее значение на формирование рынков электроэнергии:

- типы используемого топлива и электростанций;
- ограничения по пропускной способности сети;
- характеристики нагрузки;
- экономическая стабильность и риски применительно к электроэнергетике.

Проанализированы существующие и предложены новые модели прогнозирования спотовых цен на зарубежных и российской биржах электроэнергии, дана оценка относительно возможности их применения. Выбор западных рынков обусловлен двумя причинами: первая – доступность информации, необходимой для проведения исследования, вторая – длительным и стабильным временем работы этих рынков электроэнергии.

Методика прогнозирования спотовых цен на электрическую энергию состоит из следующих шагов:

1. отбор факторов: выявление факторов, которые могут оказывать влияние на спотовую цену на оптовом рынке электроэнергии;
2. проведение корреляционного и факторного анализа: выявление наиболее существенных факторов и уменьшение размерности;
3. разработка моделей: включение факторов в модель в качестве переменных;
4. определение коэффициентов модели: расчет численного значения коэффициентов, повторение предыдущих шагов в случае необходимости;

5. прогнозирование спотовых цен: расчет будущих значений цен на основе полученных моделей;
6. анализ результатов: оценка качества полученного прогноза, сравнение с реальными результатами, повторение предыдущих шагов в случае необходимости.

В качестве внешних факторов, которые существенным образом сказываются на уровне почасовых спотовых цен, исследовались температура воздуха, скорость ветра, освещенность и влажность. Была отражена в моделях прогнозирования зависимость уровня спотовых цен в России от температуры воздуха, а, в странах со значительной долей энергии, вырабатываемой на ветряных электростанциях (Германия), кроме того, и от скорости ветра.

Первоначально в диссертационной работе для прогнозирования спотовых цен на электрическую энергию использовалась модель АРСС на основе моделей временных рядов Бокса Г. и Дженкинса Г., записываемых в виде зависимости (1):

$$S_{t+1} = c + \varphi_1 S_t + \dots + \varphi_p S_{t-p} - \theta_1 a_t - \dots - \theta_q a_{t-q}, \quad (1)$$

где: S_t - спотовая цена на электроэнергию в момент времени t ; p – порядок авторегрессии; q – порядок скользящего среднего; c – константа; φ - коэффициент регрессии; θ - коэффициент скользящего среднего; a - нормально распределенная случайная величина со средним значением 0.

Важным показателем временного ряда является наличие сезонности, которая должна быть элиминирована перед расчетом прогнозных значений для обеспечения стационарности временного ряда, которая необходима для АРСС моделей. Качество полученной модели оценивалось с применением критерия Дурбина-Ватсона и критерия логарифмической схожести. Для нахождения оптимальных коэффициентов модели использовался итеративный подход.

Систематизированы и отражены в моделях прогнозирования основные свойства цен на электроэнергию (формула 2) путем добавления новых переменных:

1. Сезонность цен на электроэнергию по времени суток, дням недели и сезонам года;
2. Возврат к среднему уровню цены;
3. Зависимость волатильности цены от абсолютного уровня цены;
4. Выбросы, как резкие значительные отклонения от среднего уровня цены.

Рассмотренная выше модель АРСС была модифицирована за счет новых переменных, учитывающих зависимость цены на однодневном рынке от других факторов (например, температуры воздуха, скорости ветра) и позволяющих отразить четыре главные вышеуказанные свойства цен на электроэнергию.

Адаптированная зависимость цены на электроэнергию от различных факторов рынка представлена нижеследующей формулой (2):

$$S_{t+1} + \Delta S = c + \varphi_1 S_t + \dots + \varphi_p S_{t-p} - \theta_1 a_t - \dots - \theta_q a_{t-q} + S_t \sigma \varepsilon_{1t} \sqrt{\Delta t} + \eta [S_t (k + \delta \varepsilon_{2t})] + \sum_1^{12} \omega_i (m_i + b_i \cdot \Delta T), \quad (2)$$

где: S_t - спотовая цена на электроэнергию в момент времени t ; σ - дисперсия диффузионного процесса; p - порядок авторегрессии; q - порядок скользящего среднего; c - константа; η - с.в., равная "1" в случае выброса и "0" в противном случае; k, δ - ожидаемая величина выброса и стандартное отклонение выброса; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ - две нормально распределенных случайных величины для учета диффузионного процесса и выбросов; m, b - коэффициенты регрессии цены от температуры; ω - коэффициенты сезонности; T - значение температуры воздуха, °C.

На практике порядок регрессии или скользящего среднего больше двух почти не используется. Для использования модели APCC необходимо выполнить условие стационарности, элиминирования некоторых сезонных составляющих временного ряда. В рамках диссертационной работы был разработан и применен следующий алгоритм для создания прогноза спотовых цен на электроэнергию, представленный на рисунке 2:

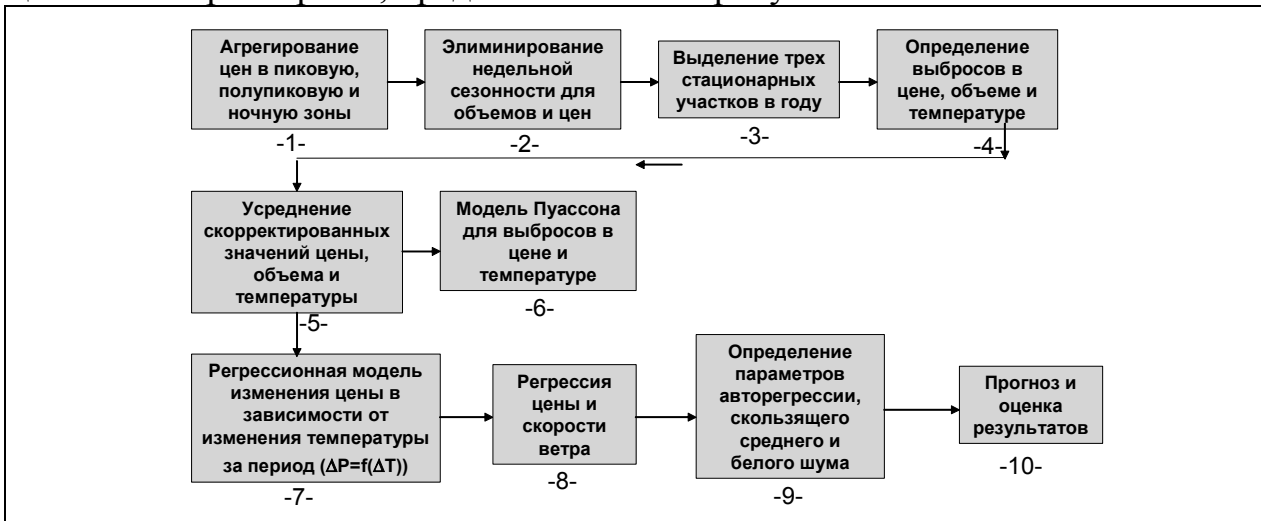


Рис. 2. Алгоритм прогнозирования спотовых цен на электроэнергию

Агрегирование временного ряда почасовых цен позволяет учесть почасовые колебания цен на электроэнергию, а также несколько снизить время расчета без заметного ухудшения точности результата. На основе оценок коэффициента корреляции температуры воздуха и средневзвешенных цен в 3-х зонах, а также схожести статистических свойств (например, среднего значения) за период с 2002 по 2003 годы на примере рынка электроэнергии в Германии [России] были использованы следующие интервалы: пиковый интервал 10-12 [10-12] и 17 [18] часов; полупиковый интервал 7-9 [7-9], 13-16 [13-17], 18-22 [19-22] часов; ночной – 23-06 [23-06] часов. Недельные колебания для цен и объемов электроэнергии были элиминированы с использованием стандартной мультипликативной модели Census I. В отличие от метода Census II, метод Census I, представленный в формуле 3, не позволяет учесть индивидуально рабочие дни и выбросы:

$$X_t = T_t \cdot C_t \cdot S_t \cdot I_t, \quad (3)$$

где: T_t – компонента тренда; C_t – циклическая компонента; S_t – сезонная компонента; I_t – нерегулярная компонента.

Новизна выделения стационарных участков времени, разделяющих календарный год на 3 периода (зима, весна-лето, осень) состоит в том, что такой подход не основан на абстрактном использовании календарных “месяц”, “квартал”, “полугодие” для учета влияния на спотовую цену сезонного фактора. Такой подход отражает тот факт, что погодные условия в течение одного и того же месяца, но в разные годы, могут отличаться весьма существенно.

Алгоритм выявления выбросов – это вычисление стандартного отклонения для предварительно выделенных годовых стационарных интервалов временного ряда (т.е. стандартное отклонение рассчитывается отдельно для каждого из предварительно определенных интервалов) с последующим выявлением значений из этого ряда, превышающих два стандартных отклонения (рисунок 3.). Величина стандартного отклонения и выбросов вычислялась для разностей цен, объемов и значений температуры воздуха между текущим и предыдущим значением временного ряда (получение выбросов путем дифференциации первого порядка).

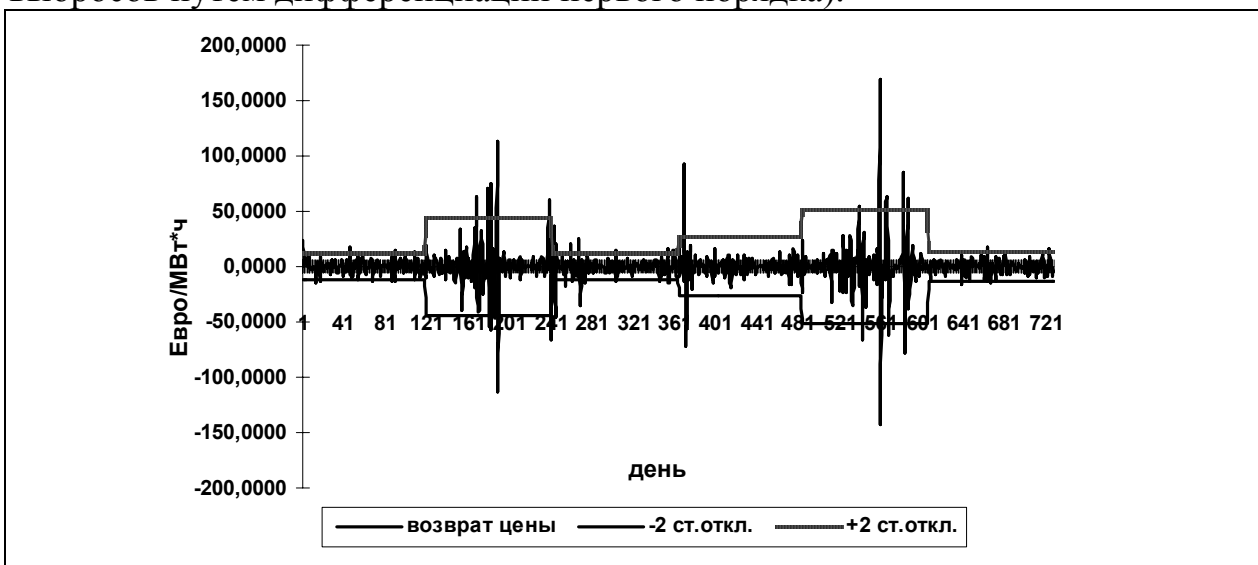


Рис. 3. Выбросы для „возвратов“ пиковых значений цены на ЕЕХ (’02-’03г.)

Выявленные выбросы удалялись из временного ряда путем замены значения соответствующего выбросу элемента ряда средним по нескольким соседним значениям этого ряда. Для моделирования времени наступления выбросов в цене предлагается использовать модель Пуассона. Величина выброса для одного момента времени распределена по нормальному закону, что подтверждается значениями теста Колмогорова-Смирнова (для АТС значение тестов составило менее 0,3).

Для отражения долгосрочного влияния изменения температуры воздуха на объемы потребляемой электроэнергии и спотовые цены была разработана новая модель зависимости изменения цены от изменения температуры ($\Delta S=f(\Delta T)$) за динамически определяемый интервал времени. Для преобразованных вышеуказанным образом временных рядов итеративно

были определены (псевдо-) стационарные участки, корреляция на которых между температурой воздуха и объемом спотовой электроэнергии стремится к нулю. Для вышеуказанных участков были вычислены средние значения температуры воздуха и определены их изменения от участка к участку. После проведения аналогичного расчета для ценовых значений были построены 18 регрессионных моделей (отдельно для положительных и отрицательных значений) зависимости изменения цены от изменения температуры.

Регрессионные модели зависимости цены на электроэнергию от скорости ветра рассчитаны для выделенных стационарных временных участков (табл.2). Отмечается снижение средневзвешенной цены на электроэнергию при увеличении скорости ветра. Анализ других возможных факторов влияния на значение цены на однодневном рынке, например, значение освещенности определенного региона, показал их несущественное воздействие на значения результирующего временного ряда.

Таблица 2

Регрессионная модель зависимости спотовой цены ЕЕХ от скорости ветра

	«Зима»			«Осень»			«Лето»		
	пик	п/пик	ночь	пик	п/пик	ночь	пик	п/пик	ночь
константа	2,03	1,691	1,121	2,856	2,161	2,14	0,077	0,312	0,434
коэфф. регрессии	-0,69	-0,58	-0,4	-1,08	-0,82	-0,77	0,013	-0,09	0,168

На следующем этапе расчета были определены параметры модернизированной модели АРСС (табл.3) и произведен прогноз значений спотовой цены от нескольких недель до нескольких месяцев.

Таблица 3

АРСС модели прогнозирования спотовых цен на электроэнергию

Биржа электроэнергии/ Модель	Новая модель	Новая модель упрощенная	АРСС для года
ЕЕХ	(2,1,2)(9,0,0) сезонность 14	(1,1,1)(9,0,0) сезонность 7	(1,0,1)(9,0,0) сезонность 7
АТС	(1,1,2)(7,0,0) сезонность 14	(1,1,0)(4,0,0) сезонность 13	(1,1,1)(7,0,0) сезонность 27

Использование разработанного в данной работе алгоритма прогнозирования спотовых цен на оптовом рынке переходного периода в России для ноября 2004 года показывает повышение точности прогнозирования (таблица 4) по сравнению с моделями АРСС и нейронными сетями (полужирный шрифт – наилучшие значения). Рассчитанные параметры предлагаемой модели значительно лучше параметров нейронных сетей Эльмана и сетей с обратным распространением. В случае упрощенной модели не использовался созданный в данной работе алгоритм

динамического определения зависимости изменения цены от изменения температуры воздуха за промежуток времени ($\Delta S=f(\Delta T)$). При использовании альтернативной модели APCC для года не производилось разделение года на несколько стационарных интервалов.

Таблица 4

Сравнение различных моделей прогноза спотовых цен для России (ATC)

ПАРАМЕТР	Предлагаемая модель	Упрощенная модель	APCC для года
Сумма модулей остатков (18 дней)*	66,4	100,7	122,2
Колмогоров-Смирнов тест	0,04	0,07	0,17
Сумма модулей автокорреляций (14 дней)	2,10	3,14	3,63

*сравнение прогнозных значений цен на электроэнергию с фактическими

2.2 Стохастические модели спотовых цен и оптимизация участия покупателей и продавцов электроэнергии на бирже электроэнергии

Разработана стохастическая модель расчета вероятностных сценариев для определения уровня цен в будущем. Был предложен метод расчета дерева сценариев для отображения возможных дискретных состояний спотовых цен на бирже электроэнергии и вероятностей перехода из одного состояния в другое. Особенностью метода является расчет вероятностей дискретных значений цены в промежутке времени нарастающим итогом и определение вероятностей перехода из состояния в состояние в зависимости от всех предыдущих состояний. Предложен и использовался следующий алгоритм расчета:

- определение стационарных временных участков;
- расчет прогнозных значений (прогнозные значения на рисунке 4. W2,2 и W6.3);
- отображение стохастических особенностей через дискретизацию сценариев. Длина каждого прогнозного интервала определялась на основе равенства площадей треугольников под и над кривой прогнозных значений, которые формируются в зависимости от величины ошибки прогноза σ . Вероятности дискретных значений рассчитывались для равноудаленных значений цены нарастающим итогом для каждого интервала. Разработанная модель нахождения дискретных состояний значений цен на электроэнергию для каждого интервала представлена формулой 4:

$$\bar{z}_{i,j} = m + \frac{1}{j-i+1} \left(\left(\sum_{k=i}^j \psi_k \right) (z_0 - m) + \varphi_2 \cdot \left(\sum_{k=i-1}^{j-1} \psi_k \right) (z_{-1} - m) + \left(\sum_{k=1}^{i-1} (a_k \sum_k \phi_k) \right) + \left(\sum_{k=i}^j (a_k \sum_0^{j-k} \phi_k) \right) \right), \quad (4)$$

где: z_{ij} – среднее значение объединенных дискретных прогнозных значений цен на отрезке ij ; i – число состояний на одном прогножном временном интервале; j – порядковый номер прогнозного интервала; m – среднее значение цены; ψ – коэффициенты из первоначальной APCC модели с

элиминированием скользящего среднего; ϕ - коэффициенты из первоначальной АРСС модели со скользящим средним; расчет ψ и ϕ производится на основе коэффициентов θ и φ (первоначальные АРСС коэффициенты);

- Нахождение вероятностей перехода от одного значения цены в другое с возможностью ограничения минимально рассматриваемого значения. Алгоритм представлен на рисунке 4.

Проведен анализ особенностей российской электроэнергетики (субсидирование, высокая доля ТЭЦ, климатические особенности, значительный износ электроэнергетического оборудования). Выполнен расчет стоимости топливной составляющей цены на электроэнергию для нескольких российских электростанций в зависимости от доли используемого топлива в общем объеме электроэнергии.

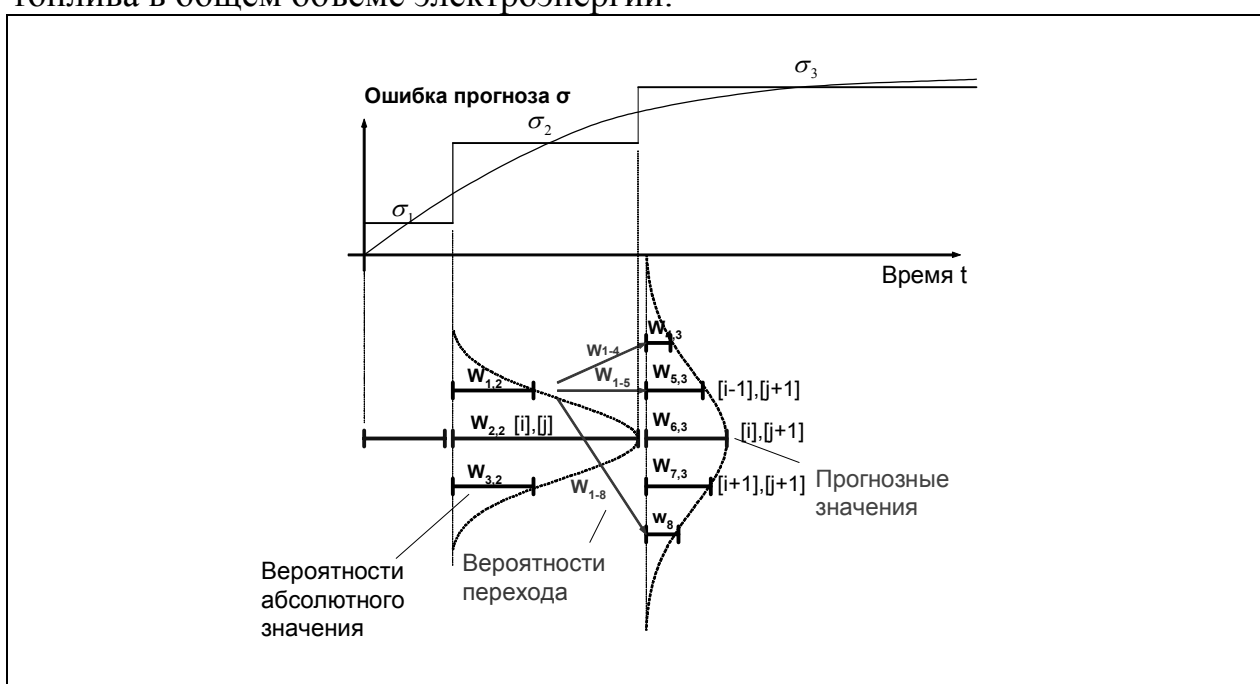


Рис. 4. Дерево сценариев спотовых цен на электроэнергию

Предложены методы оптимизации показателей экономического взаимодействия между субъектами рынка электроэнергии. Одной из целей производителя электроэнергии является максимизация прибыли. Оптимумом для покупателя электроэнергии является снижение суммарных издержек на покупку электроэнергии. Результатом решения вышеуказанных задач являются оптимальные объемы электроэнергии на регулируемом и свободных секторах. При этом должны выполняться все граничные условия по балансу производства и потребления, режимам и пропускной способности электрической сети, скорости набора и сброса нагрузки, условия, относящиеся к работе регулируемого и свободного секторов рынка электроэнергии переходного периода. При оптимизации должны учитываться также стоимости холостого хода и пуска/останова оборудования, топлива и его расхода.

С целью моделирования динамических особенностей загрузки электростанций при изменении диспетчерского графика нагрузки предложена имитационная модель расчета стоимостных составляющих вырабатываемой электроэнергии в зависимости от значений температуры воздуха, стоимости топлива и т.д.

Предложено совместное моделирование спотовых цен на электроэнергию и топливной составляющей себестоимости, представленное на рисунке 5.

При моделировании подсистемы для оптимизации загрузки электростанций, изображенной на рисунке 6 (на рисунке 5 «подсистема**»), производится оптимизация работы электростанций по часам с последующим нахождением суммарного значения для суток с учетом ограничений.

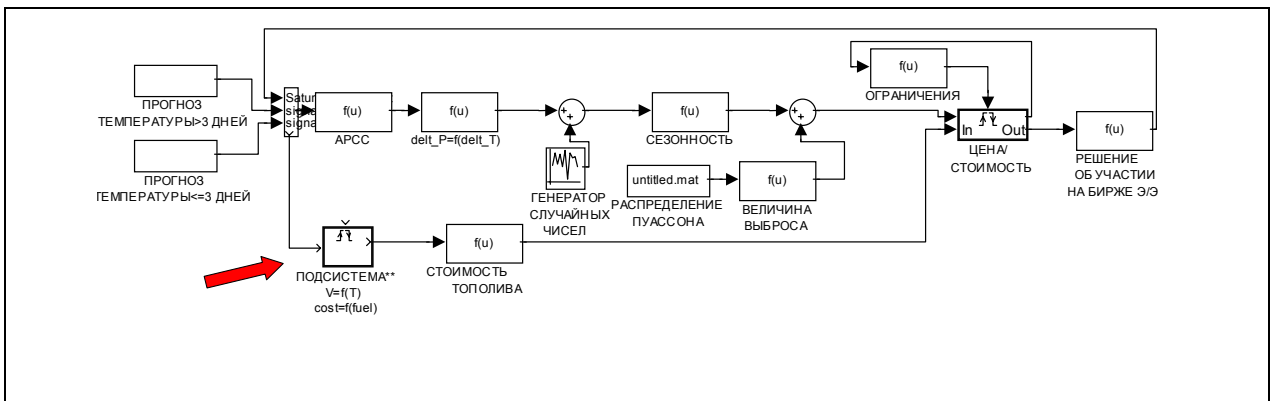


Рис. 5. Моделирование спотовой цены на электроэнергию и топливной составляющей себестоимости электроэнергии

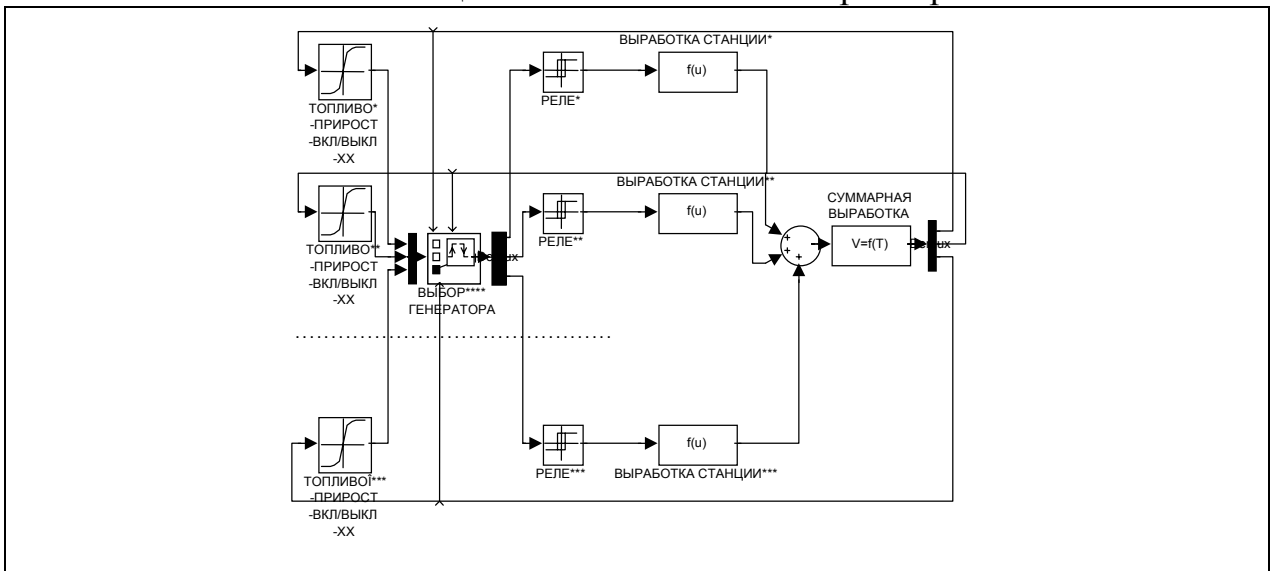


Рис. 6. Подсистема** расчета очередности загрузки электростанций

Вышеприведенные методы стохастического моделирования с уровнем значимости 0,95 для расчета вероятностей абсолютных уровней цен и вероятностей переходов между ними были опробованы для определения очередности загрузки электростанций и участия на бирже электроэнергии одной энергокомпании, состоящей из ТЭЦ, АЭС и ГЭС, общей мощностью 5300 МВт.

Расчеты дерева сценариев будущего развития цен на электроэнергию на основе вероятностных моделей как для абсолютных цен на электроэнергию, так и для процессов перехода из одного состояния в другое проводились для двух вариантов. Увеличение числа рассматриваемых сценариев на два на каждом временном интервале позволяет снизить издержки энергокомпании на 20000 Евро в месяц. При этом доля электроэнергии покупаемая на бирже электроэнергии возрастает и доля собственной выработки уменьшается.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Процессы либерализации и конкуренции в электроэнергетике оказывают решающее влияние на развитие сектора свободной торговли 5-15% оптового рынка в России, составляющего в настоящее время примерно 9% всей генерации в Европейской части России и на Урале. Адаптацию западных и разработку собственных моделей организации рынка электрической энергии следует использовать для обеспечения дальнейшего расширения сектора свободной торговли и обеспечения его надежной, безопасной, экономически и социально целесообразной работы.
2. Предложенные расширенные модели АРСС для прогнозирования почасовых спотовых цен на электроэнергию и модели расчета стохастического дерева сценариев могут быть использованы для ее прогнозирования на период до трех месяцев.
3. Единичное использование прогнозных значений спотовой цены и разработанного стохастического дерева сценариев на примере одной западной энергосистемы, состоящей из ТЭЦ, АЭС и ГЭС с общей мощностью 5300 МВт, позволяет уменьшить издержки компании на 20 000 Евро в месяц при увеличении числа сценариев на два в каждом из рассматриваемых интервалов.
4. Дальнейшая либерализация рынка электроэнергии делает необходимым расширение практического использования участниками биржи электроэнергии нового программного обеспечения для поддержки процесса принятия решения о покупке/продаже электроэнергии либо загрузки/разгрузки собственных электростанций.

Основные работы, опубликованные по материалам диссертации:

1. Иванов Е.Ю. Участники рынков электроэнергии // Сборник 5-й межд. научно-практ. конференции „Экономика, экология и общество России в XXI-м столетии“ (май 2003 г.), СПб.2003 / Изд-во СПбГПУ, 2003, с. 321-323 - 0,18 п.л.
2. Иванов Е.Ю. Кризис рынка электроэнергии в Калифорнии // Социально-теоретический альманах №5, СПб.2003 / Изд-во СПбГПУ, 2003 г., с.240-243-0,25 п.л.
3. Иванов Е.Ю., Иванков А.А. Об одной стохастической модели спотовых цен на электроэнергию // „Формирование технической политики инновационных наукоемких технологий“, СПб. 2004 / Изд-во СПбГПУ, 2004 г., с. 346-352 - 0,43 п.л.

4. Иванов Е.Ю. Экономическая оценка надежности систем электроэнергетики // Сборник 6-й межд. научно-практ. конференции „Экономика, экология и общество России в XXI-м столетии“ (май 2004 г.), СПб.2004 / Изд-во СПбГПУ, 2004 г., с.238-239 - 0,125 п.л.
5. Иванов Е.Ю. Особенности прогнозирования спотовых цен на электрическую энергию // Электрика, №10, 2004 г. / Москва. 2004 г., с.7-10 - 0,25 п.л.
6. Иванов Е.Ю. Электроэнергия отклонений по генерации на оптовом рынке переходного периода // Сборник докладов МВШУ к 10-летию факультета, СПб.2004 / Изд-во СПбГПУ, 2004 г., с. 48-53 - 0,34 п.л.
7. Иванов Е.Ю. Результаты работы свободного сектора оптового рынка электроэнергии // Неделя науки 33, ноябрь 2004, С-Пб / Изд-во СПбГПУ, 2005 г., с.104-106 - 0,13 п.л.
8. Иванов Е.Ю. Балансирующие рынки электроэнергии // Сборник ИМОП «Россия в глобальном мире», С-Пб.2005 / Изд-во СПбГПУ, 2005 г., с.52-55 - 0,22 п.л.
9. Иванов Е.Ю. Оптимизация работы субъектов на оптовом рынке электроэнергии // Сборник межд. научно-практ. конференции „Финансовые проблемы РФ и пути их решения: теория и практика“ (апрель 2005 г.), СПб.2005 / Изд-во СПбГПУ, 2005, с. 118-119 - 0,125 п.л.
10. Ivanov, Evgeni Stromhandel an den Spot- und Terminmaerkten und Risikomanagement // Сборник 4-й межд. научно-практ. конференции „Экономика, экология и общество России в XXI-м столетии“ (май 2002 г.), СПб.2002 / Изд-во СПбГПУ, 2002 г., с.20-23 - 0,25 п.л.