

УДК 004.942

Планирование неравномерного потребления субъекта оптового рынка электроэнергии на основе прогноза соотношений часовых цен

Руссков О. В.^{1,*}, Сараджишвили С. Э.²

[*zenit-che@mail.ru](mailto:zenit-che@mail.ru)

¹ОАО "Волжский трубный завод", г Волжский, Россия

²Санкт-Петербургский государственный политехнический
университет, Санкт-Петербург, Россия

Показаны ограничения применения математических моделей временных рядов для прогноза неравномерного графика потребления субъекта оптового рынка электроэнергии с превалированием требований технологии над требованиями часового планирования. Рассмотрены факторы, влияющие на неравномерность графика потребления металлургического предприятия. Предложен метод совместного прогноза соотношений цен и объемов электроэнергии, позволяющий обойти проблему трудности прогноза неравномерного графика потребления. Проанализированы соотношения цен рынка, при которых снижается требование к точности прогноза потребления электроэнергии. Приведены положительные результаты испытаний прогнозной математической модели, основанной на данном методе.

Ключевые слова: математическая прогнозная модель, модели временных рядов, неравномерность графика потребления, оптовый рынок электроэнергии, прогноз соотношений цен

Введение

Во многих областях науки и техники для повышения эффективности работы применяется предварительное моделирование различных процессов. Само по себе оно означает материальное или мысленное имитирование реально существующей или воображаемой системы с помощью создания моделей-аналогов, в которых с достаточной степенью достоверности воспроизводятся принципы организации и функционирования исследуемой системы [1]. В зависимости от природы модели делятся на следующие:

- натурные, являющиеся частями реальных объектов,
- физические, замещающие объект его физическим процессом той же природы,
- математические, формулами описывающие алгоритм функционирования объекта.

С точки зрения философии, моделирование – это мощное средство познания человеком мира. А моделирование с использованием современных быстродействующих ЭВМ увеличивает его эффективность в разы. Можно утверждать, что компьютерное моделирование значительно облегчает и ускоряет процесс познания мира человеком.

Помимо этого, компьютерное моделирование обладает рядом несомненных преимуществ, главным из которых является неизменность реального исследуемого объекта при эксперименте. Также при компьютерном моделировании экспериментатор имеет возможность подключать действующие на объект факторы по отдельности, чего невозможно достичь в случае экспериментов с реальной моделью. Компьютерное моделирование позволяет решать задачи в любых областях науки и техники. Медицина, физика, психология, астрономия, энергетика – повсюду успешно применяется компьютерный эксперимент.

Одной из важных задач в энергетике является моделирование ежечасных процессов покупки и продажи электроэнергии на оптовом рынке. В настоящее время для субъекта оптового рынка электроэнергии (ОРЭ) в статусе крупного потребителя, имеющего неравномерный график потребления электроэнергии, существует проблема построения эффективной модели работы на двух основных секторах ОРЭ – рынке на сутки вперёд (РСВ) и балансирующем рынке (БР). Неравномерный график свойственен промышленным предприятиям, характер потребления электроэнергии которых не поддаётся чёткому планированию вследствие полной зависимости от требований технологического процесса производства. В частности, это относится к металлургическим заводам, имеющим в составе оборудования электросталеплавильные печи. Для рынка с нерегулируемыми меняющимися каждый час ценами, каким является ОРЭ, задача совместного прогнозирования цен и объёмов электроэнергии очень важна. Решить её можно путём моделирования работы субъекта на ОРЭ, создав модель-аналог, с достаточной степенью достоверности воспроизводящую принципы организации и функционирования ОРЭ единой энергосистемы России для узлов расчётной модели субъекта. Учитывая тот факт, что оптовый рынок функционирует по математическим алгоритмам, описанным в Регламентах ОРЭ, математическое моделирование наиболее подходит для задачи прогнозирования работы субъекта на ОРЭ.

Решение проблемы трудности прогноза неравномерного потребления электроэнергии позволит предприятию работать на ОРЭ более эффективно, а также предоставит ему конкурентное преимущество перед другими подобными субъектами ОРЭ. Одним из путей обхода трудности прогноза неравномерного графика потребления является построение математической модели прогноза соотношений цен ОРЭ. Для решения этой задачи следует применить компьютерное математическое имитационное моделирование, написав программу, позволяющую решить задачу совместного прогноза часовых объёмов электроэнергии и цен для субъектов ОРЭ с неравномерным потреблением.

1. Анализ существующих моделей прогноза

Учитывая тот факт, что в часовых расчётах итоговой стоимости электроэнергии на ОРЭ участвует пара «цена – объём электроэнергии», выстраивание стратегии минимизации стоимости электроэнергии возможно при одновременном точном прогнозе часовых цен и объёмов. Для решения этой задачи нужно, чтобы их временные ряды имели

такую степень волатильности и неравномерности, которая позволяла бы использовать существующие на сегодняшний день модели прогноза.

1.1. Краткое описание существующих моделей прогноза

Модели прогноза, в настоящее время применяющиеся на либерализованных рынках электроэнергии различных стран, в той или иной мере прогнозируют 2 вышеописанных компонента рынка. Целью всех подобных моделей является как можно более высокая точность прогноза. Цены на услуги компаний, специализирующихся на предоставлении прогнозов для субъектов ОРЭ, напрямую зависят от точности. Например, компания «Математическое бюро» предлагает дифференцированную стоимость услуг прогнозирования в зависимости от процента ошибки прогноза [2].

В зависимости от горизонта прогноза используются различные модели прогноза - от имитационных (фундаментальных), включающих в себя сложные расчёты влияния всех внешних факторов, до моделей временных рядов, подразделяющихся на статистические и структурные [3]. Эти модели используют уже накопленные статистические данные, представляя с помощью математического аппарата будущие значения временного ряда. К статистическим моделям временных рядов относятся, например, регрессионные, авторегрессионные и модели экспоненциального сглаживания, к структурным - модели на нейронных сетях, на цепях Маркова, на базе классификационно-регрессивных деревьев [4].

К используемым в России и за рубежом моделям прогноза можно отнести следующие.

- 1) Модели на базе нейронных сетей, эмулирующие работу головного мозга человека с помощью построения математической модели сети нейронов [5].
- 2) Модели из семейств ARIMAX (процесс авторегрессии интегрированного скользящего среднего), используемые для анализа временных рядов [6].
- 3) GARCH-модели (обобщенный авторегрессионный процесс с условной гетероскедастичностью), предполагающие, что временной ряд не инвариантен и разность между реальным значением и спрогнозированным имеет ненулевое среднее, дисперсия нетривиально зависит от прошлых состояний и развивается во времени [7].
- 4) Модель по выборке максимального подобия (MMSP), находящая в ретроспективных данных участки, максимально похожие на участки данных текущего времени и на их основе производящая расчёт будущих значений временного ряда [8].
- 5) Модели экспоненциального сглаживания, рассчитывающая экспоненциальные средние, применяя один из самых простых приёмов выравнивания ряда [9].
- 6) Модели на базе цепей Маркова, анализирующие только ближайшую к настоящему моменту часть временного ряда, считая, что его будущее зависит в большей степени от настоящего, а не прошлого [10].

- 7) Модели на базе классификационно-регрессионных деревьев, согласно которым будущее состояние временного ряда зависит от прошлого, а также от некоторых независимых переменных (CART) [11].
- 8) Фундаментальные модели [12,13], применяемые для целей долгосрочного прогноза.

Следует отметить, что в настоящее время популярность приобрели комбинированные модели, сочетающие в себе математический аппарат нескольких вышеописанных моделей. Кроме того, для прогноза также применяются модели временных рядов на основе генетического алгоритма, на опорных векторах, на основе передаточных функций, на нечёткой логике и модели группового учёта аргументов. Однако, они используются в специфических случаях и значительно реже, чем перечисленные выше модели [4].

В целом можно резюмировать, что для решения задачи прогноза будущего состояния временных рядов высокой точностью прогноза, относительной простотой, возможностью моделирования влияния внешних факторов зарекомендовали себя модели временных рядов на нейронных сетях и авторегрессионные модели [14].

1.2. Недостатки существующих моделей прогноза

К недостаткам фундаментальных моделей для целей краткосрочного прогноза в рамках узлов расчётной модели субъекта ОРЭ относится то, что персоналу участника ОРЭ по объективным причинам неизвестно большинство внешних факторов, фигурирующих в формулах Регламентов расчётной модели единой энергосистемы Коммерческого Оператора рынка [12,13]. Данные, необходимые для расчёта цен, участники ОРЭ раскрывают только Коммерческому Оператору и не обязаны сообщать о них смежным субъектам. Если вести речь о субъекте ОРЭ в статусе крупного потребителя, то очевидно, что такие факторы, как цены и объёмы в заявках РСВ соседних субъектов ОРЭ и в целом по ценовой зоне, участнику ОРЭ не могут быть известны.

К недостаткам моделей временных рядов относится зависимость от характера накопленных статистических данных временного ряда. Например, ARIMA и GARCH-модели имеют высокую точность прогноза во времена стабильности рынка и резко её снижают, когда на рынке происходят серьёзные изменения [14]. Основная функция моделей временных рядов – посредством математического аппарата находить похожие участки временного ряда в прошлом и на их основе прогнозировать цены и потребление энергии в будущем. Таким образом, если реальный статистический временной ряд в сильной степени волатилен или неравномерен, то модели временных рядов объективно не могут обеспечить точность прогноза, достаточную для эффективной работы предприятия на ОРЭ [15]. Например, согласно статистике «Математического бюро» клиенты согласны оплачивать прогнозы с ошибкой до 11 % для цен РСВ и до 7,5 % - для энергопотребления [2].

Таким образом, для совместного прогноза пары «цена-объём электроэнергии» субъекта ОРЭ с неравномерным графиком потребления использование существующих моделей прогноза затруднительно, и требуется отыскание путей обхода данной проблемы.

2. Особенности трейдинга субъекта ОРЭ

Трейдинг (покупка-продажа электроэнергии на ОРЭ) для субъекта в статусе крупного потребителя в соответствии с текущими редакциями Регламентов ОРЭ [12,13] характерен следующими свойствами. Сначала происходит покупка планируемого потребления на РСВ по сложившейся на этом рынке цене. Затем разница между планируемым и фактическим потреблением покупается (если факт > плана) или продаётся (если факт < плана) на БР:



Стоимость электроэнергии БР при этом составит:

$$\begin{cases} \text{Факт}_i > \text{План}_i \Rightarrow (\text{Факт}_i - \text{План}_i) * \text{цена_БР}_{\text{покупка}}, \\ \text{Факт}_i < \text{План}_i \Rightarrow (\text{План}_i - \text{Факт}_i) * \text{цена_БР}_{\text{продажа}}, \end{cases} \quad (1)$$

где i – час суток

Согласно статистике, в подавляющем большинстве случаев ОАО «Волжский трубный завод» (ВТЗ) подаёт одноступенчатую ценопринимающую заявку РСВ, т.к. если подобный субъект будет пытаться влиять на цены РСВ, выставляя в заявке конкретные значения, то в часы, когда заявка с заданной ценой не прошла, он будет вынужден приобретать электроэнергию на БР по заведомо более высокой цене. Даже если цены покупки БР и РСВ в какой-то час равны, то в конце месяца сложившиеся цены покупки БР обязательно изменит в большую сторону ежемесячная корректировка стоимости покупки электроэнергии на БР.

Как показывает практика трейдинга ВТЗ, следствием неравномерности графика потребления является указание в заявке РСВ в качестве прогнозного значения часового потребления одинаковых значений, основанных на суточной программе производства завода. Получаемый ровный график планового часового потребления обеспечивает минимальные из возможных отклонения плана от факта. Попытки спрогнозировать значения фактического потребления электроэнергии с помощью существующих математических моделей временных рядов и интуитивных моделей не оказались удачными вследствие детально рассмотренных ниже особенностей. На данный момент ровный график планового потребления электроэнергии для ВТЗ является «меньшим из зол», но, безусловно, не обеспечивает оптимальной работы на ОРЭ. Создание прогнозной модели, способной обойти проблему неравномерности графика потребления, призвано преодолеть эту ситуацию.

3. Особенности графика потребления электроэнергии

Временной ряд потребления электроэнергии субъектов ОРЭ, относящихся к категории крупных потребителей с превалированием требований технологии над

требованиями часового энергетического планирования, трудно прогнозируется в рамках часового интервала суток вследствие неравномерности графика потребления. Кроме того, для подобного субъекта ОРЭ невозможно оперативное изменение нагрузки предприятия как реакция на прогноз потребления электроэнергии внутри часа. Таким субъектом ОРЭ является, например, металлургическое предприятие с электросталеплавильными печами, доля которых в энергопотреблении завода составляет около 50 %.

Согласно статистике, доля потребления дуговой сталеплавильной печи электросталеплавильного цеха ВТЗ составляет 44 - 49 % от общезаводского потребления. При этом наблюдается прямая зависимость общего потребления завода от потребления печи (рис. 1). Таким образом, очевидно, что всю долю неравномерности графика потребления завода вносит именно характер потребления печи электросталеплавильного цеха (ЭСПЦ). Это доказывают, в том числе, и суточные графики потребления электроэнергии.

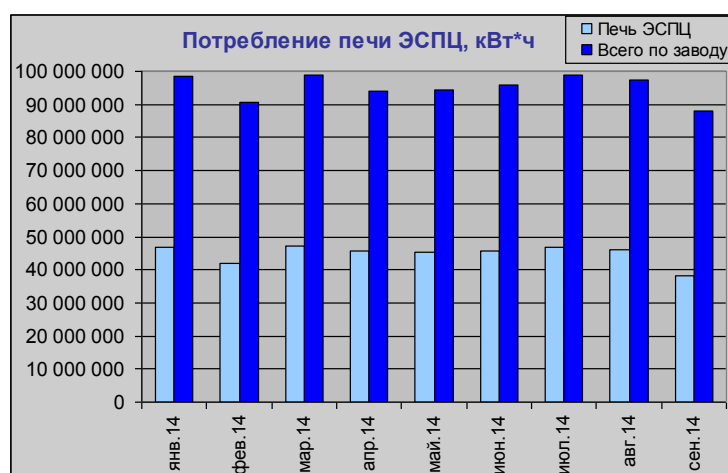


Рис. 1. Потребление печи ЭСПЦ относительно потребления завода в 2014 году

Характер потребления печи жёстко определяется технологическим процессом плавки стали с отсутствием привязки производственного процесса к началу и окончанию часового интервала суток. Спрогнозировать длительность каждой плавки заранее трудно. Например, от плотности укладки шихты в бадье зависит устойчивость горения дуги и, соответственно, время плавления. Если же загруженный в печь лом оказался легковесным, то после частичного расплавления первой порции шихты потребуются открытие печи и подсадка шихты с соответствующим увеличением времени плавки. Для ускорения плавления сталевар может применить газо-кислородные горелки, введя их в рабочее пространство печи, или продувку жидкого металла кислородом. Длительность плавки зависит также от электрического режима печного трансформатора. От плавки к плавке возможны изменения его режима из-за обвалов шихты во время плавления, кипения металла, обгорания электродов, подъема уровня металла, изменения сопротивления дугового промежутка. Также от плавки к плавке может меняться нестабильность состава шихты, нестационарность протекания реакций в ванне, введение присадок, износ кладки,

могут происходить выбивания и подсос газов в электросталеплавильную печь. Влияние вышеприведённых факторов приводит к тому, что длительность плавки объективно не может быть привязана к началу и окончанию часовых периодов энергопланирования оптового рынка электроэнергии. Подобная привязка позволила бы планировать потребление с минимальным отношением планируемого и фактического потребления, однако, в условиях сталеплавильного производства она сильно затруднена из-за необходимости безусловного следования требованиям технологического процесса плавки и разливки стали. В противном случае неминуемо снижение качества стали - основной продукции предприятия.

Практический опыт работы ВТЗ на ОРЭ показывает, что влияние этих факторов и приводит к неравномерности графика потребления печи, а вместе с ним – и всего предприятия. Хотя характер графика потребления печи, безусловно, имеет ярко выраженные повторяющиеся участки высокого и низкого потребления (это собственно плавки и промежуток между ними), очень трудно спрогнозировать, в какое именно время начнётся и закончится очередная плавка. Статистика показывает, что в разные смены длительность одной и той же по параметрам плавки бывает различной. Как показано на рис. 2, временной сдвиг процесса плавки относительно границы часового интервала приводит к возникновению значительных ошибок прогноза. Таким образом, график потребления имеет неравномерный характер в двух смыслах – это суточная неравномерность, вытекающая из особенностей технологии производства стали, и неравномерность часовая, вытекающая из превалирования требований технологии над требованиями часового планирования ОРЭ.

В научной литературе отмечается, что точность прогнозирования электропотребления имеет сильную зависимость от характера неравномерности графика потребления [15]. Таким образом, для подобных ВТЗ субъектов ОРЭ вследствие показанной неравномерности характера графика потребления отсутствует возможность совместного прогноза часовой пары «цена – объём электроэнергии» на ОРЭ.

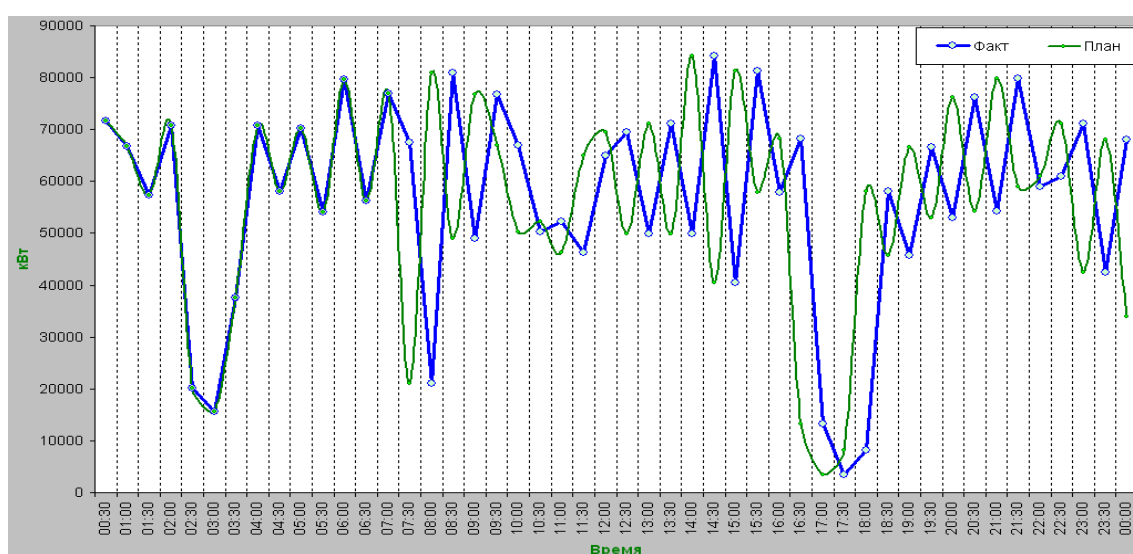


Рис. 2. Типичный график потребления ЭСПЦ ВТЗ в 2014 году

Из рисунка 2 видно, что даже при идеальном – безошибочном - прогнозе часового потребления получасовой сдвиг от утверждённого графика производства в 7:00 по требованиям технологии приводит к огромным расхождениям плана и факта потребления электроэнергии. Часовая ошибка MAPE при таком сдвиге огромна (в час 16:00 – 17:00: $[41 \text{ МВт} \cdot \text{ч} - 8,3 \text{ МВт} \cdot \text{ч}] / 8,3 \text{ МВт} \cdot \text{ч} = 3,93$). Потребление ЭСПЦ придаёт характеру графика потребления завода ту долю неравномерности, которая не позволяет рассчитывать на помощь моделей временных рядов, применение которых на ОРЭ в целом показывает их состоятельность [14]. И это – главная трудность, с которой сталкивается персонал ВТЗ. Из-за этого затруднено применение существующих на сегодняшний день моделей прогноза, поскольку возможность прогноза с заданной точностью лишь одного компонента пары «цена-объём» - часовой цены - не даёт возможности выстроить эффективную модель трейдинга на ОРЭ.

4. Предлагаемый метод прогноза

Особенностью метода является то, что он не сосредоточен на попытках прогноза значений объёмов электроэнергии и цен на неё. Для решения проблемы низкой точности прогноза неравномерного графика потребления метод использует нюанс работы ОРЭ, заключающийся в том, что для любой группы точек поставки субъекта ОРЭ в каждый час цена покупки РСВ совпадает с одной из цен БР (покупки или продажи), при этом соотношение цен РСВ и БР может быть различно как от часа к часу внутри одних суток, так и по одному часу в разные сутки. При определённых соотношениях цен зависимость от точности прогноза потребления снижается. Данный нюанс работы ОРЭ проистекает из его Регламентов [12,13]. Поэтому важнейшим элементом прогноза выступают не точные значения цен, а их соотношения.

В научной литературе отмечено несколько работ, заостряющих внимание на данном нюансе работы ОРЭ. Например, предлагается его использование для корректировки прогнозных значений регрессионной модели с целью оптимизации стоимости электроэнергии [16, § 2.4]. При этом прогноз соотношений цен РСВ и БР выполняется на основе статистики прошлых периодов с применением многих допущений о вероятностях наступления того или иного соотношения цен [16, § 3.1]. Однако, для промышленного предприятия с неравномерным графиком потребления и превалированием требований технологии над требованиями планирования возможность применения регрессионных или любых других моделей временных рядов крайне ограничена. Следовательно, метод прогноза соотношений цен не может быть использован лишь как коррекция некоторой модели прогноза. Он должен быть основой прогноза в условиях неопределённости, вытекающей из неравномерного характера графика потребления электроэнергии, следовательно, он должен быть более детально разработан. Кроме того, опираться только на статистику соотношений цен предыдущих периодов недостаточно, нужно учитывать внешние факторы, влияющие на соотношения цен РСВ и БР. Также не принимается во

внимание зависимость доли небаланса БР от корректирующих воздействий модели [16, стр. 234]. Для случая прогноза неравномерного графика потребления эту зависимость очень важно учитывать из-за больших отклонений плана от факта. В другой работе, посвящённой прогнозу электропотребления ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», авторы также, сталкиваясь с труднопрогнозируемостью графика потребления предприятия, предлагают минимизировать функцию средних ожидаемых потерь от работы предприятия на БР [17]. Однако, в целевой функции отсутствуют показатели цены РСВ, и данная методика применима только для предприятия, работающего на розничном рынке электроэнергии. Для ОРЭ данная функция не подходит.

Предлагаемый метод качественного прогноза часового соотношения цен РСВ и БР позволяет снизить требования к точности прогноза объёмов электроэнергии до такого уровня, при котором можно использовать для прогноза заданный коридор значений, величина которого в принципе может быть любым (она ограничивается только допустимым для предприятия размером отклонений планируемого потребления от фактического). Поэтому наряду с соотношениями цен вторым важным элементом прогноза является коридор цен БР - разница цены покупки и продажи БР в каждый час. Важно отметить, что для прогноза ширины коридора не требуется прогнозировать точного абсолютного значения верхней и нижней границы цен; для целей моделирования достаточно знать только относительную ширину коридора.

Статистика цен РСВ и БР для ВТЗ в посуточном срезе показывает, что для большинства часов (16 из 24) соотношение цен (покупка БР, продажа БР, покупка РСВ) меняется почти каждые сутки (рис. 3).

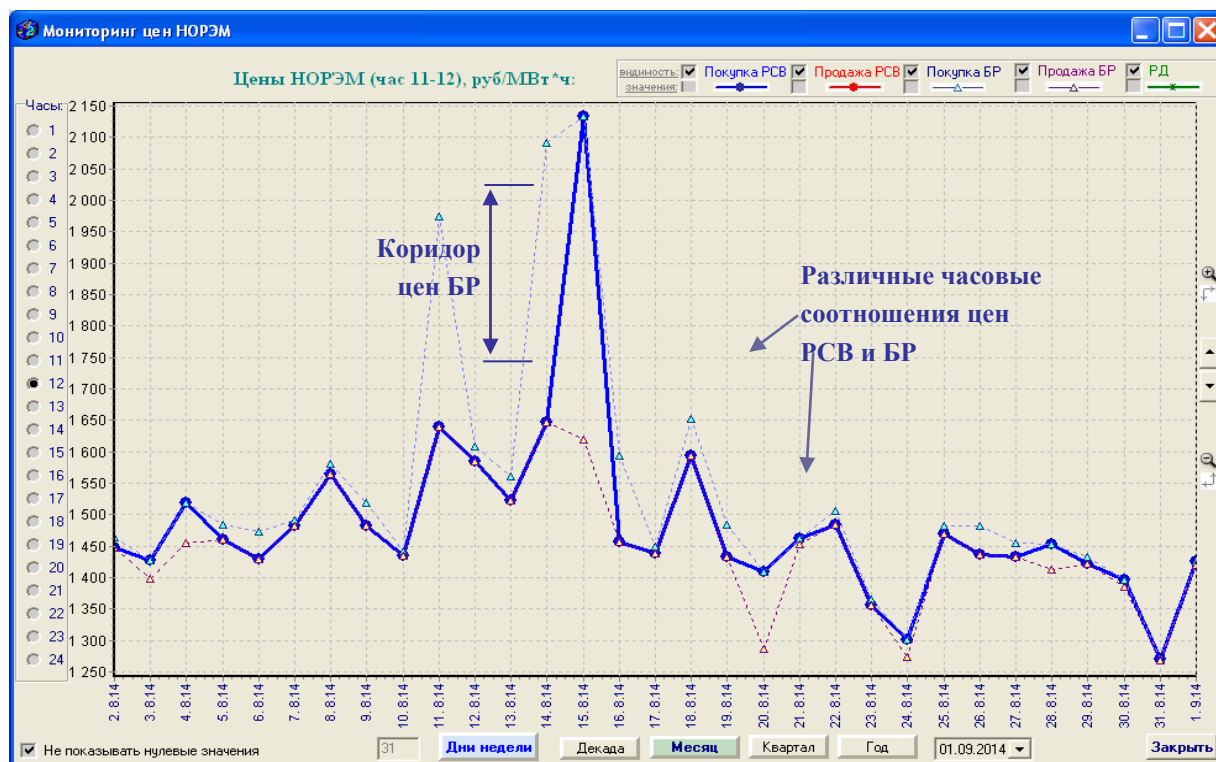


Рис. 3. Мониторинг соотношения цен РСВ и БР по часу 11:00-12:00 в разные сутки.

В другие часы график может быть более прогнозируемым, имея в составе только отдельные участки смены соотношений цен (рис. 4). Таких часов по статистике 4 из 24.

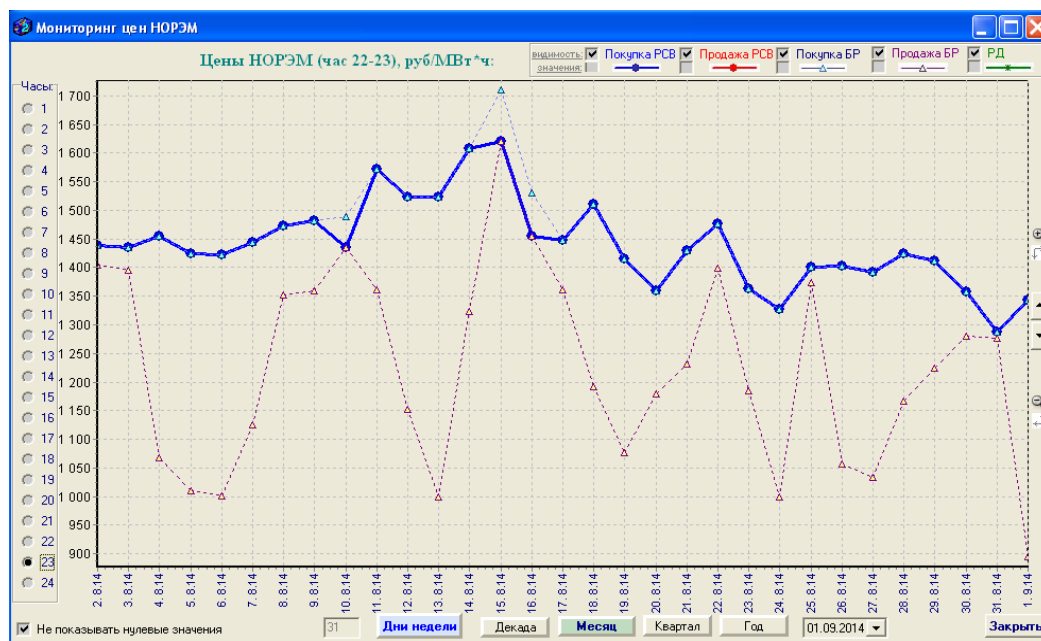


Рис. 4. Мониторинг соотношения цен РСВ и БР по часу 22:00-23:00 в разные сутки.

В остальные часы суток (0:00-2:00, 8:00-9:00 и 23:00-24:00) график может длительное время (около месяца) не иметь смен соотношений цен РСВ и БР (рис. 5). Таким образом, в большинстве часов суток для прогноза соотношений цен РСВ и БР недостаточно использовать только статистические методы и необходимо учитывать влияние внешних факторов, описанных в Регламентах функционирования БР и РСВ [12,13].

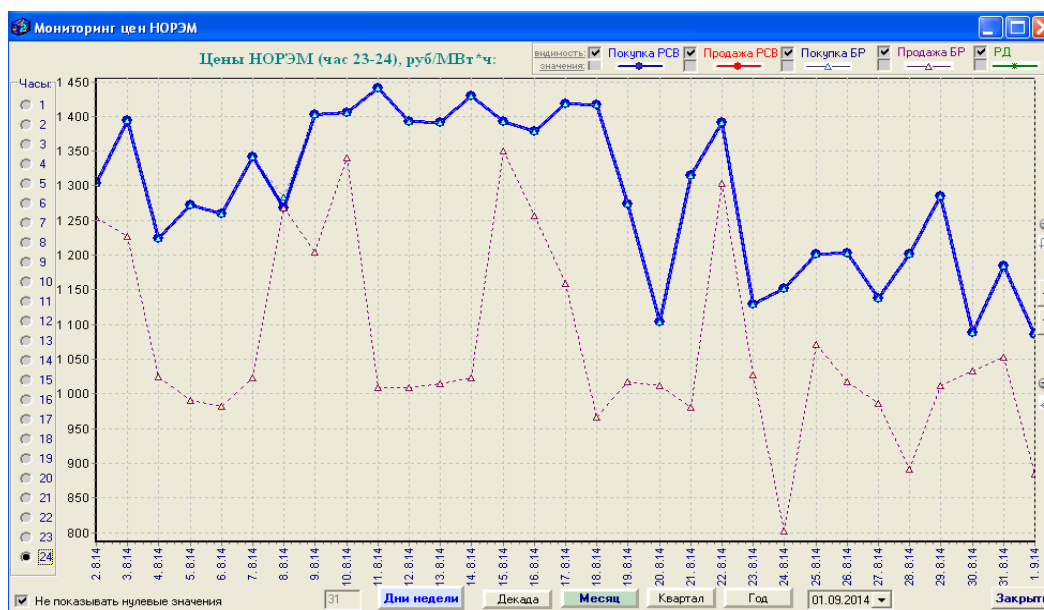


Рис. 5. Мониторинг соотношения цен РСВ и БР по часу 23:00-24:00 в разные сутки.

Кроме этого, следует максимально использовать открытые данные о параметрах работы смежных субъектов ОРЭ, размещённые на сайте Коммерческого оператора ОРЭ (www.rosenergo.com). Зная основные элементы прогноза – относительное соотношение цен РСВ и БР и коридор цен БР – предприятие с неравномерным графиком потребления электроэнергии, не поддающимся прогнозу с использованием моделей временных рядов, может успешно заниматься трейдингом на ОРЭ. Исходя от спрогнозированного соотношения цен, можно понять, какой тип сделки на БР – покупка или продажа – в конкретный час будет выгоден предприятию. Обладая знанием о соотношении цен, модель, созданная на основе описанного метода прогноза, сформирует в заявке РСВ ту величину потребления электроэнергии, которая гарантированно обеспечит нужный тип сделки на БР. Учитывая неравномерный характер графика потребления субъекта ОРЭ с превалированием требований технологии над требованиями энергетического планирования, применение модели позволяет снизить зависимость от точности прогноза потребления электроэнергии.

4.1. Особенности метода прогноза

Принимая во внимание стимулирующий характер БР, метод прогноза использует тот факт, что при любых вариантах часовая цена покупки БР всегда больше цены продажи БР. Кроме того, метод учитывает, что после полной либерализации ОРЭ и отмены регулируемых договоров субъект в статусе крупного потребителя на РСВ всегда только покупает электроэнергию. Поэтому рассматривается два основных типа соотношений цен РСВ и БР:

1. Цена покупки РСВ = цене продажи БР:



→ Выгодна продажа на БР. Покупка на БР принесёт убыток;

2. Цена покупки РСВ = цене покупки БР:



→ Выгодна покупка на БР. Продажа на БР принесёт убыток.

Выгодной для предприятия сделкой на БР является та, с ценой которой в конкретный час совпадает цена РСВ. Осуществив этот тип сделки, можно купить или продать разницу между фактическим и планируемым потреблением электроэнергии на БР по той же цене, что и на РСВ. Противоположный тип сделки приносит убыток. Таким образом, соотношение цен РСВ и БР напрямую определяет конкретный тип часовой сделки БР.

В зависимости от ширины коридора цен БР определяется степень риска при прогнозе на конкретный час. Анализ складывающихся цен показывает наличие резких скачков цен в 12 из 24 часов суток (10:00-11:00, 11:00-12:00, ..., 21:00-22:00) с частотой

несколько раз в месяц. Это происходит в часы, когда Системный оператор ОРЭ прогнозирует недостаток мощности в Единой энергосистеме РФ и загружает самые дорогие в энергосистеме станции-генераторы, стимулируя тем самым участников ОРЭ к продаже электроэнергии на БР. При этом чаще всего цена РСВ в эти часы совпадает с ценой продажи БР.



Рис. 6. Резкий скачок цены покупки БР в час 18:00-19:00 14 августа 2014

Как видно из рисунка 6, цена покупки БР в час 18:00-19:00 14 августа 2014 резко увеличилась более, чем в 2 раза (3900 руб/МВт·ч) относительно предыдущих суток, при этом в следующие сутки она резко упала и ещё через сутки её значение практически вернулось к обычному, близкому к среднему за рассматриваемый период (1 500 руб/МВт·ч). В сутки скачка цены ширина коридора цен БР увеличилась настолько, что степень риска получения больших убытков стала максимальной: ошибка в прогнозе типа сделки БР при наличии отклонения план-факт даже в 3-4% от часового потребления стоила бы около 12 000 рублей всего за 1 час. Поэтому так важно прогнозировать ширину коридора цен БР и в зависимости от неё задействовать дополнительные экспертные методы прогноза.

Поскольку метод прогноза имеет дело с труднопрогнозируемым потреблением неравномерного графика, для формирования прогнозного значения объёмов электроэнергии он использует страховой интервал – такую разницу между прогнозным потреблением и будущим фактическим, которая при любом сложившемся значении фактического потребления должна обеспечить нужный тип сделки БР. Размер страхового интервала зависит от цены ошибки прогноза. Если модель в конкретный час прогнозирует

узкий коридор цен (до 50 руб/МВт·ч), то в этом случае цена ошибки прогноза невелика, и модель уменьшает размер страхового интервала. При этом, если сложившееся фактическое потребление не обеспечит нужный тип сделки БР, предприятие понесёт минимальные убытки, исчисляемые сотнями рублей в час. Если же спрогнозирован широкий коридор цен, то цена ошибки прогноза высока, и модель делает размер страхового интервала максимально возможным, с тем, чтобы гарантированно обеспечить нужный тип сделки БР (рис. 7).

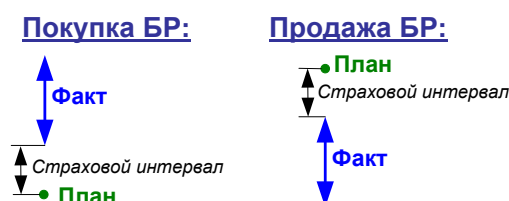


Рис.7. Страховой интервал

При этом размер страхового интервала метод прогноза ограничивает в соответствии с Регламентами ОРЭ. В случае чрезмерного его увеличения соответственно вырастают объёмы электроэнергии на БР, а вместе с ними и доля ежемесячной корректировки общего небаланса БР, в результате применения которой постфактум вырастают цены покупки и уменьшаются цены продажи БР субъекта ОРЭ. Поэтому метод прогноза не может чрезмерно увеличивать страховой интервал для гарантированного попадания в нужный тип сделки БР. Например, чтобы со 100% вероятностью обеспечить нужное отношение плана и факта в час с прогнозируемым выгодным типом сделки «покупка БР» и потреблением в районе 100-130 МВт·ч (или 200-230 МВт·ч), модель, основанная на описываемом методе прогноза и не имеющая ограничений на размер страхового интервала, спрогнозировала бы факт в районе 50 МВт·ч для потребления в обоих случаях, чрезмерно увеличив страховой интервал. Часовой тип сделки БР был бы гарантированно исполнен, ожидаемый финансовый результат получен. Однако, в конце месяца к результатам работы ОРЭ будет применена корректировка БР, доля которой вырастет пропорционально объёму сделок на БР, что сведёт к нулю достигнутый ранее финансовый результат. Согласно статистике зависимость ежемесячной доли корректировки небаланса ВТЗ от объёмов БР не является прямой, так как от месяца к месяцу меняется и сам размер небаланса всего ОРЭ (рис. 8, 9). Однако, чем больше у субъекта отклонений плановых объёмов электроэнергии от фактических, тем больше размер доли ежемесячной корректировки небаланса [12]. Поэтому модель прогноза должна быть настроена таким образом, чтобы размер страхового интервала был оптимальным, обеспечивающим, с одной стороны, выполнение нужного типа сделки БР, и небольшие объёмы БР по итогам месяца, с другой.



Рис. 8. Связь доли корректировки и объёмов покупки БР ВТЗ по месяцам 2014



Рис. 9. Связь доли корректировки и объёмов продажи БР ВТЗ по месяцам 2014

Таким образом, целевой функцией метода прогноза соотношений цен РСВ и БР для предприятия с неравномерным труднопрогнозируемым графиком потребления является максимизация точности качественного прогноза соотношений цен (а также коридора цен БР) при минимизации месячных объёмов отклонений:

$$\begin{cases} \text{Точность прогноза} \rightarrow \max, \\ \sum_{i=1, j=1}^{31, 24} V_{ij} \rightarrow \min, \end{cases} \quad (2)$$

где i – день месяца, j - час суток.

При выполнении этих условий происходит и оптимизация страхового интервала.

4.2. Свойство автокоррекции ошибки прогноза

Неравномерность характера графика потребления наряду с негативным свойством труднопрогнозируемости даёт позитивное свойство автоисправления ошибки прогноза. Это происходит в том случае, когда модель неверно прогнозирует тип выгодной часовой сделки БР, но фактический график потребления выходит за рамки страхового интервала, в свою очередь, также меняя тип операции БР (рис. 10).



Рис. 10. Иллюстрация автокоррекции ошибок

Согласно статистике работы прототипа прогнозной модели ВТЗ, до 5% ошибок прогноза нивелируется этим достоинством, вытекающим из недостатка графика потребления электроэнергии, характеризуемого неравномерностью.

4.3. Испытания прототипа прогнозной модели

Главная задача прогнозной модели – обойти проблему трудности прогноза неравномерного графика потребления электроэнергии субъекта ОРЭ в статусе крупного потребителя с превалированием требований технологий над требованиями энергетического планирования. Рабочий прототип прогнозной модели соотношений цен выполнен в виде программного модуля, являющегося математической имитационной компьютерной моделью ОРЭ для ВТЗ. В настоящее время написана основа модуля, и он продолжает развиваться в сторону полного соответствия концептуальному описанию прогноза.

Ежесуточно прототип модели рассчитывает прогнозное соотношение цен РСВ и БР для группы точек поставки ОРЭ ВТЗ, основываясь на принципах, описанных в данной статье. В зависимости от спрогнозированного соотношения цен модель выставляет в заявке РСВ такое значение планового потребления электроэнергии, которое обеспечит нужный тип сделки на БР. При этом спрогнозированная моделью ширина коридора цен БР определяет величину страхового интервала. В настоящее время для вспомогательного чернового прогноза потребления электроэнергии модель использует утверждённый график производства завода (в будущем модель будет дополнительно учитывать факторы, влияющие на процесс плавки стали ЭСПЦ). Таким образом, суточная заявка на РСВ оказывается заполненной. Одновременно с этим свою заявку для РСВ формирует персонал отдела главного энергетика. После получения суточного отчёта ОРЭ происходит сравнение результатов работы двух заявок.

Вследствие специфики трейдинга, такой, как наличие неравномерного графика потребления и свойства автокоррекции ошибок прогноза модели, критерием оценки работы прогнозной модели является не столько точность прогноза, как у традиционно используемых на ОРЭ моделей прогноза, сколько финансовый результат, получающийся путём подсчёта результатов часовых сделок покупки и продажи электроэнергии на РСВ и БР. Можно точно спрогнозировать все 24 операции БР в сутках,

но в некоторые часы (трудно заранее сказать в какие и сколько их) фактический график потребления поменяет тип операции БР – и тогда точный прогноз, как ни парадоксально, будет убыточен. Оценка работы модели происходит ежедневно путём сравнения финансового результата работы на РСВ и БР прототипа прогнозной модели и реального результата работы ВТЗ, полученного после подачи заявки РСВ персоналом отдела главного энергетика.

Графически работа прототипа модели в сравнении с заявкой РСВ отдела главного энергетика в рамках одних суток выглядит следующим образом (рис. 11):

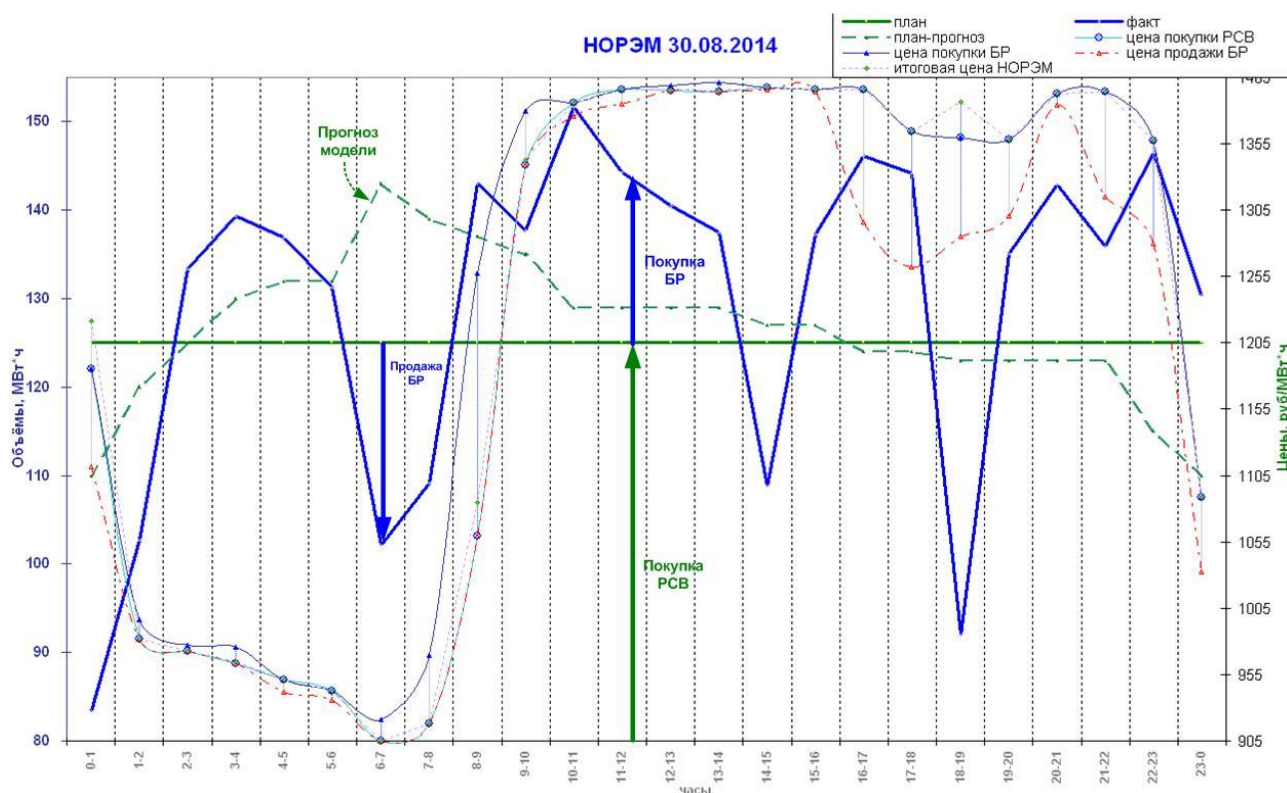


Рис. 11. Суточный результат работы прототипа модели и реальной РСВ-заявки

Пример работы на РСВ и БР 30 августа 2014 года показывает выгоду от применения прогноза модели относительно заявки РСВ, поданной персоналом, равную 4 124 руб. При этом объёмы БР, что важно для последующей месячной доли корректировки небаланса БР, практически не отличаются (покупка: 238 МВт·ч у прогнозной модели против 263 МВт·ч у заявки РСВ; продажа: 165 МВт·ч против 152 МВт·ч).

Финансовый результат работы прототипа модели за август 2014 года показал выгоду от её использования в размере около 170 тысяч рублей (рис. 12). На данном этапе развития прогнозной модели не всегда удаётся спрогнозировать лучше, чем это сделано в заявке, поданной персоналом отдела главного энергетика, но, в основном, это удаётся.



Рис. 12. Финансовый результат работы модели в августе 2014

Таким образом, применение модели, основанной на методе качественного прогноза соотношений цен РСВ и БР, позволяет получить финансовую выгоду и преодолеть трудность прогноза неравномерного графика потребления электроэнергии ВТЗ.

Заключение

Работа прототипа прогнозной модели показывает, что проблему низкой точности прогноза неравномерного графика потребления электроэнергии, характерную для субъектов оптового рынка электроэнергии России в статусе крупного потребителя с превалированием требований технологии производства над энергетическим планированием, не решаемую существующими моделями прогноза на основе временных рядов и фундаментальными моделями, можно успешно обойти, применив качественный прогноз соотношений цен рынка на сутки вперёд и балансирующего рынка. Это позволяет субъектам ОРЭ с неравномерным потреблением получить инструмент эффективной работы на ОРЭ, которого до этого они были лишены вследствие характера своего графика потребления. Получив такой инструмент, субъект ОРЭ с неравномерным графиком потребления становится способен ориентироваться в ежечасно меняющейся рыночной ситуации и минимизировать стоимость потребленной на ОРЭ электроэнергии.

Список литературы

1. Фролов И.Т. Гносеологические проблемы моделирования биологических систем // Вопросы философии. 1961. № 2. С. 39-51.
2. Цены «Математического бюро» // Математическое бюро: сайт. Режим доступа: <http://www.mbureau.ru/prices> (дата обращения 01.12.2014).
3. Jingfei Yang. Power System Short-term Load Forecasting: Thesis for Ph.D. degree. Germany, Darmstadt, Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universitat, 2006. 139 p.

4. Чучуева И.А. Модель прогнозирования временных рядов по выборке максимального подобия: дис. ... канд. техн. наук. М., 2012. 155 с.
5. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс: пер. с англ. 2-е изд. М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. 1104 с.
6. Дрейпер Н, Смит Г. Прикладной регрессионный анализ: пер. с англ. В 2 кн. Кн. 1. М.: Финансы и статистика, 1986. 366 с.
7. Garcia R.C., Contreras J., van Akkeren M., Garcia J.B.C. A GARCH forecasting model to predict day-ahead electricity prices // IEEE Transactions on Power Systems. 2005. Vol. 20, no. 2. P. 867-874. DOI: [10.1109/TPWRS.2005.846044](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2005.846044)
8. Чучуева И.А. Модель экстраполяции по максимуму подобия (ЭМП) для временных рядов цен и объемов на рынке на сутки вперед ОРЭМ (Оптовом рынке электроэнергии и мощности) // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2010. № 1. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/135870.html> (дата обращения 01.12.2014).
9. Лукашин Ю.П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов. М.: Финансы и статистика, 2003. 416 с.
10. Zhu J., Hong J., Hughes J.G. Using Markov Chains for Link Prediction in Adaptive Web Sites // Proc. of the 1st International Conference on Computing in an Imperfect World. UK, London, 2002. P. 60-73. DOI: [10.1007/3-540-46019-5_5](https://doi.org/10.1007/3-540-46019-5_5)
11. Brieman L., Friedamn J.H., Olsehn R.A., Stone C.J. Classification and Regression Trees. Wadsworth & Brooks, Monterey, CA, 1984. 368 p.
12. Регламент определения объёмов, инициатив и стоимости отклонений // Совет Рынка: некоммерческое партнерство: сайт. Режим доступа: <http://www.np-sr.ru/regulation/joining/reglaments/index.htm?ssFolderId=58> (дата обращения 1.12.2014).
13. Регламент проведения конкурентного отбора ценовых заявок на сутки вперед // Совет Рынка: некоммерческое партнерство: сайт. Режим доступа: <http://www.np-sr.ru/regulation/joining/reglaments/index.htm?ssFolderId=54> (дата обращения 1.12.2014).
14. Бейден С., Смирнов Д., Матвеева М. Риски на рынке электроэнергии и методы прогнозирования цен // Энергорынок. 2004. № 4. С. 22-28.
15. Макоклюев Б.И., Ёч В.Ф. Взаимосвязь точности прогнозирования и неравномерности графиков электропотребления // Электрические станции. 2005. № 5. С. 64-67.
16. Дзюба А.П. Управление энергозатратами промышленных предприятий: дис. ... канд. техн. наук. Челябинск, 2014. 286 с.
17. Трофимова В.Ш., Липатников А.В. Разработка методики планирования почасового потребления электроэнергии крупным металлургическим предприятием (на примере ОАО «ММК») // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2014. № 3. С. 57-62.

Entity's Irregular Demand Scheduling of the Wholesale Electricity Market based on the Forecast of Hourly Price Ratios

O.V. Russkov^{1,*}, S.E. Saradgishvili²

[*zenit-che@mail.ru](mailto:zenit-che@mail.ru)

¹JSC Volga Pipe Plant, Volzhsky, Russia

²Saint-Petersburg State Polytechnical University, St.Petersburg, Russia

Keywords: mathematical forecast model, time series models, consumption graph variation, electricity market, price relations forecast

The article considers a hot issue to forecast electric power demand amounts and prices for the entities of wholesale electricity market (WEM), which are in capacity of a large user with production technology requirements prevailing over hourly energy planning ones. An electric power demand of such entities is on irregular schedule. The article analyses mathematical models, currently applied to forecast demand amounts and prices. It describes limits of time-series models and fundamental ones in case of hourly forecasting an irregular demand schedule of the electricity market entity. The features of electricity trading at WEM are carefully analysed. Factors that influence on irregularity of demand schedule of the metallurgical plant are shown. The article proposes method for the qualitative forecast of market price ratios as a tool to reduce a dependence on the accuracy of forecasting an irregular schedule of demand. It describes the differences between the offered method and the similar ones considered in research studies and scholarly works. The correlation between price ratios and relaxation in the requirements for the forecast accuracy of the electric power consumption is analysed. The efficiency function of forecast method is derived. The article puts an increased focus on description of the mathematical model based on the method of qualitative forecast. It shows main model parameters and restrictions the electricity market imposes on them. The model prototype is described as a programme module. Methods to assess an effectiveness of the proposed forecast model are examined. The positive test results of the model using JSC «Volzhsky Pipe Plant» data are given. A conclusion is drawn concerning the possibility to decrease dependence on the forecast accuracy of irregular schedule of entity's demand at WEM. The effective trading tool has been found for the entities of irregular demand schedule at WEM. The tool application allows minimizing cost of consumed electric power without increasing forecast accuracy of its demand.

References

1. Frolov I.T. Gnoseological problems of biological systems modeling. *Voprosy filosofii*, 1961, no. 2, pp. 39-51. (in Russian).
2. Tseny "Matematicheskogo byuro" ["Mathematical bureau" prices]. Matematicheskoe byuro [Mathematical bureau]: website. Available at: <http://www.mbureau.ru/prices> , accessed 01.12.2014. (in Russian).
3. Jingfei Yang. *Power System Short-term Load Forecasting. Thesis for Ph.D. degree*. Germany, Darmstadt, Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universitat, 2006. 139 p.
4. Chuchueva I.A. *Model' prognozirovaniya vremennykh ryadov po vyborke maksimal'nogo podobiya. Kand. diss.* [The time series forecast model based on maximum likeness set. Cand. diss.]. Moscow, 2012. 155 p. (in Russian).
5. Haykin S. *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. 2nd ed. Prentice Hall, 1999. 823 p. (Russ. ed.: Haykin S. *Neironnye seti: polnyi kurs*. Moscow, "Vil'iams" Publishing House, 2006. 1104 p.)
6. Draper N.R., Smith H. *Applied Regression Analysis*. New York, Wiley, 1981. 709 p. (Russ. ed.: Draper N.R., Smith H. *Prikladnoi regressionnyi analiz. V 2 kn. Kn. 1*. Moscow, Finansy i statistika Publ., 1986. 366 p.).
7. Garcia R.C., Contreras J., van Akkeren M., Garcia J.B.C. A GARCH forecasting model to predict day-ahead electricity prices. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2005, vol. 20, no. 2, pp. 867-874. DOI: [10.1109/TPWRS.2005.846044](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2005.846044)
8. Chuchueva I.A. Maximum likeness extrapolation model for REM (Russian energy market) time series. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Bauman = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2010, no. 1. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/135870.html> , accessed 01.12.2014. (in Russian).
9. Lukashin Yu.P. *Adaptivnye metody kratkosrochnogo prognozirovaniya vremennykh ryadov* [Adaptive methods of time series short term forecast]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 2003. 416 p. (in Russian).
10. Zhu J., Hong J., Hughes J.G. Using Markov Chains for Link Prediction in Adaptive Web Sites. *Proc. of the 1st International Conference on Computing in an Imperfect World*. UK, London, 2002, pp. 60-73. DOI: [10.1007/3-540-46019-5_5](https://doi.org/10.1007/3-540-46019-5_5)
11. Brieman L., Friedamn J.H., Olsehn R.A., Stone C.J. *Classification and Regression Trees*. Wadsworth & Brooks, Monterey, CA, 1984. 368 p.
12. Reglament opredeleniya ob'emov, initsiativ i stoimosti otklonenii [The rules of deviations volumes, initiatives and costs determination]. Sovet Rynka: nekommercheskoe partnerstvo [Non-profit Partnership "Market Council"]: website. Available at: <http://www.np-sr.ru/regulation/joining/reglaments/index.htm?ssFolderId=58> , accessed 01.12.2014. (in Russian).

13. Reglament provedeniya konkurentnogo otbora tsenovykh zayavok na sutki vpered [The rules of day-ahead price bids competitive selection]. Sovet Rynka: nekommercheskoe partnerstvo [Non-profit Partnership “Market Council”]: website. Available at: <http://www.npsr.ru/regulation/joining/reglaments/index.htm?ssFolderId=54> , accessed 01.12.2014. (in Russian).
14. Beiden S., Smirnov D., Matveeva M. Electricity market risks and price forecast methods. *Energorynok = Energy market*, 2004, no. 4, pp. 22-28. (in Russian).
15. Makoklyuev B.I., Ech V.F. Interrelation between the Accuracy of Prediction and Irregularity of Electric Energy Demand Curves. *Elektricheskie stantsii*, 2005, no. 5, pp. 64-67. (English translation: *Power Technology and Engineering*, 2005, vol. 39, iss. 4, pp. 240-243. DOI: [10.1007/s10749-005-0315-3](https://doi.org/10.1007/s10749-005-0315-3)).
16. Dzyuba A.P. *Upravlenie energozatratami promyshlennykh predpriyatii. Kand. diss.* [Energy expenses managing of industrial enterprises. Cand. diss.]. Chelyabinsk, 2014. 286 p. (in Russian).
17. Trofimova V.Sh., Lipatnikov A.V. Development of planning techniques for hourly electricity consumption by a large-scale metallurgical plant (by the example of MMK). *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova = Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2014, no. 3, pp. 57-62. (in Russian).