Соловьева И. А. Прогнозирование электропотребления с учетом факторов технологической и рыночной среды / И. А. Соловьева, А. П. Дзюба // Научный диалог. – 2013. – № 7(19) : Экономика. Право. Политология. – С. 97–113.

УДК 338.46:621.31+339.133.017+339.13.017

Прогнозирование электропотребления с учетом факторов технологической и рыночной среды

И. А. Соловьева, А. П. Дзюба

Статья посвящена вопросу прогнозирования объемов электропотребления для целей осуществления покупки на оптовом рынке. Авторами рассмотрены среды, действующие на субъектов оптового рынка в процессе их функционирования, представлена их классификация. Предложена усовершенствованная модель прогнозирования электропотребления, основывающаяся на учете не только факторов, определяющих потребность в электроэнергии, но и факторов, учитывающих тенденции оптового рынка. Представлен пример учета факторов рыночной среды в прогнозном графике электропотребления. Результаты исследования позволят повысить эффективность прогнозирования и сократить финансовые потери не только на уровне конкретных предприятий, но и на уровне региона в целом.

Ключевые слова: электропотребление; прогнозирование; моделирование; оптовый рынок; эффективность; ценообразование.

Для отрасли электроэнергетики вопрос прогнозирования всегда играл особую роль. Предметом для прогнозирования в электроэнергетике являются показатели будущего электропотребления для объектов с различными объемами потребления от небольших энергоузлов и предприятий до крупных энергорайонов, регионов и энергосистем в целом. Прогнозирование электропотребления производится на различные временные диапазоны с различной интервальной дискретностью. Необходимость в качественном прогнози-

ровании обусловлена технологическими и экономическими причинами.

Технологические причины связаны с ключевой ролью прогнозирования в процессах планирования балансов электроэнергии и мощности энергосистемы, определении режимных параметров и технико-экономических показателей электропотребляющих объектов и расчетов электрических нагрузок в энергоузлах и сечениях [Головкин, 1979]. Прогнозирование будущих показателей электропотребления позволяет достичь важнейшего принципа формирования надежной и эффективной работы Единой энергетической системы – обеспечения четкого системного баланса производства и потребления электрической энергии при условии одновременной мгновенности этих процессов. Баланс производства и потребления электроэнергии – основа технологической устойчивости работы энергосистемы, он определяет системную надежность и бесперебойность ее функционирования. В случае нарушений условия баланса ухудшается качество электроэнергии (изменение параметров частоты и напряжения сети), что снижает эффективность работы электропотребляющего оборудования конечных потребителей [Лугинский, 1983].

Экономических причин, обусловливающих необходимость качественного прогнозирования, существует достаточно много. Точные расчеты обеспечивают оптимальное распределение нагрузки между электростанциями энергосистемы и повышают качество электроэнергии. Прогнозирование и планирование показателей потребления электроэнергии для крупных потребителей позволяет управлять стоимостью покупки электроэнергии через регулирование загрузки оборудования посредством управления производственными процессами, переводя основные объемы потребления электроэнергии в часы с наименьшей стоимостью, тем самым снижая себестоимость производства и величину платежей энергоснабжающим организациям.

Особую актуальность задача прогнозирования приобрела после возникновения в России оптового рынка электроэнергии, правила которого предусматривают необходимость точного прогнозирования объемов электроэнергии с целью осуществления ее покупки на оптовом рынке. Все расчеты на оптовом рынке производятся с почасовой дискретностью, а значит, все субъекты рынка должны выполнять

прогнозы электропотребления также с почасовой дискретностью на несколько суток вперед [Постановление…, 2010]. Ошибки в прогнозах электропотребления дорого стоят для всей энергосистемы: они снижают качество управления электроснабжением и ухудшают экономичность ее сложных режимов. За отклонения фактических почасовых показателей от прогнозных на участников накладываются штрафные санкции, увеличивающие стоимость покупной электроэнергии. Это связано с особенностью электроэнергии как товара. Занижение прогноза приводит к необходимости использования аварийных дорогостоящих электростанций. Завышение прогноза приводит к увеличению издержек на поддержание в рабочем состоянии излишних резервных мощностей. Получается, что задача прогнозирования имеет высокую актуальность для большого количества субъектов, функционирующих в условиях оптового рынка электроэнергии: для гарантирующих поставщиков, обслуживающих потребителей целых регионов, независимых энергосбытовых организаций, обслуживающих отдельные промышленные предприятия в различных регионах России, и для крупных хозяйствующих субъектов, покупающих электроэнергию на оптовом рынке для нужд собственного потребления. Поэтому качественное прогнозирование величин электропотребления для субъектов российского оптового рынка является экономически целесообразным и в современных высококонкурентных условиях получает нарастающую актуальность.

Процесс прогнозирования электропотребления затрагивает абсолютно всех участников обращения электрической энергии страны. Качество прогноза напрямую влияет на величину конечных энерготарифов, что в условиях постоянного роста электропотребления и нисходящей динамики повышения тарифов является очень важным. От качества прогнозирования на уровне предприятий зависит величина себестоимости их продукции, а следовательно, и показатели эффективности их работы. Эффективность работы предприятий напрямую влияет на макроэкономические показатели функционирования регионов, ВРП и электроемкость ВРП, которые в свою очередь повышают показатели ВВП, электроемкости ВВП и прочих связанных индикаторов на уровне страны в целом. Таким образом, прогнозирование электропотребления является эффективным инструментом

оптимизации затрат на электроэнергию в масштабах как отдельных предприятий и регионов, так и страны в целом. По получаемому эффекту прогнозирование выступает как способ повышения энергетической эффективности национальной экономики.

Прогнозирование электропотребления осуществляется посредством различных методов, основанных на анализе ретроспективной динамики электропотребления и действующих на него факторов, выявлении статистической связи между признаками и на построении прогнозных моделей с использованием различных методов и программных средств [Макоклюев и др., 2004].

В процессе своей деятельности субъекты оптового рынка одновременно функционируют в двух влияющих на них средах: технологической и рыночной.

Технологическая среда субъекта оптового рынка – экономическое пространство, действующее на субъекта со стороны факторов, влияющих на графики электропотребления, производственной программы потребителей, особенностей технологических процессов электропотребляющих объектов. По типу возникновения все факторы технологической среды делятся на метеорологические и социально-экономические (рис. 1).

Метеорологические факторы отражают зависимость графиков электропотребления от погодных явлений, выражающихся в изменении долготы светового дня, времени захода и восхода солнца, температуры воздуха, а также возникновении атмосферных явлений и осадков.

Социально-экономические факторы отражают зависимость графика электрических нагрузок от показателей, вызванных социально-экономическими укладами жизнедеятельности и экономической активности, например, от типов дней (рабочие, выходные и праздничные), продолжительности рабочих смен, производственных программ предприятий, особенностей графиков электропотребления отдельных объектов, экономической активности хозяйствующих субъектов. Указанные факторы условно можно разделить на три группы: циклические, естественные и случайные. Эта классификация происходит от характера возникновения факторов и отражает их доступность для включения в прогнозную модель [Тихонов, 2006].

Как было отмечено ранее, большинство компаний, выполняющих прогнозы электропотребления, являются субъектами оптового рынка и используют прогнозирование для целей участия на оптовом рынке. Учет вышеперечисленных факторов позволяет получить наиболее точные значения будущего графика электропотребления, однако данные факторы не учитывают обстоятельств самого рынка.

Рыночная среда субъекта оптового рынка – экономическое пространство, действующее на внутренние процессы субъекта со стороны оптового рынка электроэнергии: цены рынка на сутки впе-

Рис. 1. Классификация факторов,
оказывающих влияние на график нагрузки электропотребления

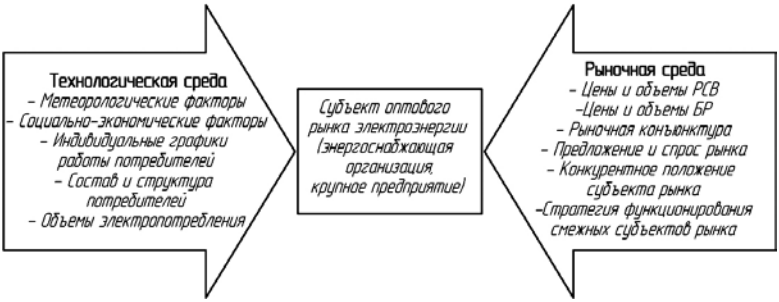

Рис. 2. Среды функционирования субъектов оптового рынка

ред, цены балансирующего рынка, рыночные объемы спроса и предложения, рыночная конъюнктура и пр. (рис. 2).

Как правило, практически все субъекты оптового рынка выполняют прогноз электропотребления на основании факторов только технологической среды и никогда не учитывают факторы среды рыночной. На наш взгляд, в современных рыночных условиях принцип формирования моделей прогнозирования, основанный только на учете факторов технологической среды, имеет существенный недостаток и требует доработки в части учета факторов среды рыночной.

Неиспользование факторов рынка в прогнозном графике электропотребления вызвано многими причинами:

1) отсутствие понимания механизма применения рыночных факторов в модели прогнозирования;

2) отсутствие системы знаний, позволяющих выполнять прогноз значений рыночных факторов;

3) сложность учета факторов в модели и расчета экономического эффекта от использования факторов рыночной среды;

4) несовершенство системы мотивации экспертов, выполняющих прогнозы, характеризующейся стремлением к минимизации физических отклонений факта от прогноза, а не к повышению финансового результата.

Как правило, для всех субъектов оптового рынка целевой функцией, определяющей качество выполнения прогноза электропотребления, является минимизация физических объемов отклонений фактического электропотребления от прогнозного. Но на финансовый

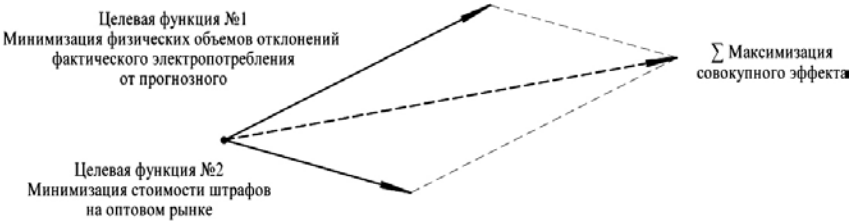

Рис. 3. Повышение совокупного эффекта модели прогнозирования посредством введения дополнительной целевой функции

результат от прогнозирования электропотребления влияют не только объемы отклонений, но и размеры штрафов за отклонения, которые формируются также посредством механизма рыночного ценообразования. Бывают случаи, когда более низкие физические величины отклонений обходятся субъектам дороже, чем высокие.

Мы предлагаем внести изменение в концепцию построения прогнозных моделей: основную целевую функцию, предусматривающую минимизацию физических объемов отклонений фактического электропотребления от прогнозного (целевая функция № 1), дополнить целевой функцией № 2, предусматривающей минимизацию размера штрафов на оптовом рынке (рис. 3). Одновременное использование целевых функций № 1 и № 2 приведет к существенной максимизации совокупного эффекта и повышению эффективности процесса прогнозирования в целом.

На рисунке 4 представлено графическое изображение предлагаемой модели прогнозирования для применения на оптовом рынке.

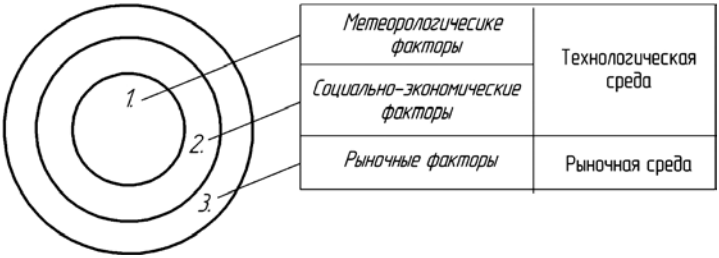

Рис. 4. Графическое изображение факторов и сред, из которых должна состоять модель прогнозирования электропотребления для оптового рынка

Формирование прогноза на основании прогнозной модели, представленной на рисунке 4, производится в три основных этапа.

На первом этапе производится учет метеорологических факторов, влияющих на прогнозный график электропотребления. Такой учет производится статистическим методом на базе регрессионной модели прогнозирования, описывающей математическое влияние каждого фактора, указанного на рисунке 1. Наиболее значимыми из этих факторов являются температура воздуха, продолжительность светового дня и осадки.

Вторым этапом построения прогноза является учет в прогнозном графике электропотребления социально-экономических факторов, перечень которых также представлен на рисунке 1. Их учет производится методом экспертных оценок. Используя информацию о крупных несистемных изменениях в структуре электропотребления и временные периоды введения данных изменений на прогнозный период, эксперт производит учет имеющейся информации на прогнозном графике электропотребления. Наиболее значимыми социально-экономическими факторами являются вводы в работу и выводы крупных энергопотребляющих объектов, индивидуальные производственные программы предприятий.

Третьим этапом формирования прогноза является учет факторов рыночной среды. Он производится на базе прогнозного графика, в котором уже учтены метеорологические и социально-экономические факторы. Рассмотрим более подробно модель учета факторов рыночной среды в прогнозе электропотребления.

Механизм ценообразования, посредством которого формируются цены покупки / продажи электроэнергии на основании заявок участников, носит название «Рынок на сутки вперед» (РСВ). На РСВ торговля электроэнергией ведется по цене, устанавливаемой под влиянием спроса и предложения. Ценовые заявки, подаваемые участниками, содержат 24 пары значений планового количества и цены на каждый час суток. Показатели «количества», подаваемые в ценовых заявках, являются прогнозными величинами электропотребления, которые получают при помощи моделей и методов прогнозирования [Приложение № 7…].

Далее в процессе участия на аукционе рынка на сутки вперед поданные участниками заявки на покупку / продажу электроэнергии

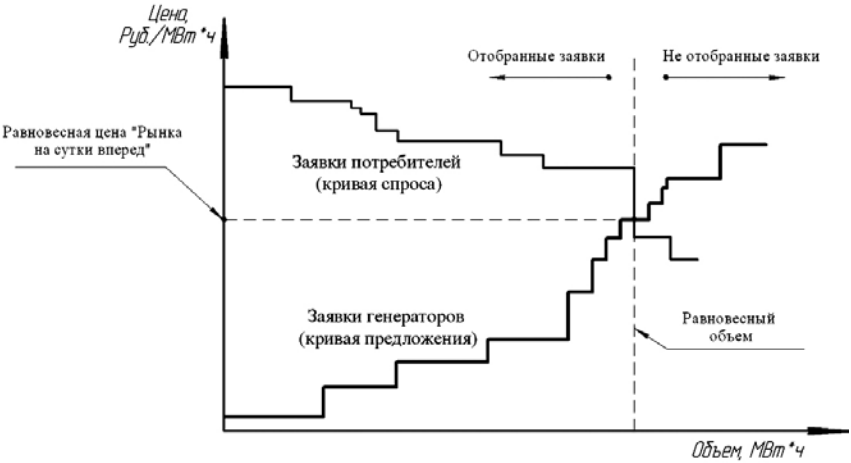

Рис. 5. Графическое формирование цены «Рынка на сутки вперед»

формируются в виде ступеней, образуя кривые спроса и предложения. При проведении конкурентного отбора Администратор торговой системы в первую очередь включает в торговый график объёмы электроэнергии поставщиков, на которые в заявках указана наиболее низкая цена, и объёмы электроэнергии покупателей, на которые указана наиболее высокая цена. Равновесную цену (называемую ценой рынка на сутки вперед) определяет максимальное ценовое предложение электростанции, заявленные объемы электроэнергии которой ещё востребованы рынком. Результатом конкурентного отбора являются почасовые объемы и цены, получаемые в результате пересечения полученных кривых (рис. 5). Все объемы, указанные в заявках на покупку / продажу электроэнергии, оказавшиеся слева от точки пересечения кривых, являются востребованными рынком и отбираются в планы рынка на сутки вперед. Те заявки, объемы которых оказались правее пересечения, являются невостребованными рынком. Те субъекты, чьи заявки оказались невостребованными рынком, могут либо ограничить свое потребление, либо потреблять электроэнергию, но уже по более высоким ценам.

На данном этапе проявляется важность точности прогнозирования электропотребления, потому как потребители, прошедшие процедуру конкурентного отбора, должны четко следовать прогнозам

потребления, которые были поданы в качестве планов. Диспетчер, управляющий работой энергосистемы, не в состоянии регулировать в режиме реального времени отпуск электроэнергии потребителям в соответствии с их договорами на поставку, и потребитель может отбирать электроэнергию с существенными отклонениями от договорных обязательств.

Ошибки в прогнозах электропотребления дорого стоят. Все внеплановые отклонения между фактическими величинами электропотребления и поданными прогнозами докупаются и продаются по другим ценам в секторе оптового рынка, называемом «Балансирующий рынок» (БР). Он представляет собой рынок отклонений фактического почасового производства и потребления электроэнергии от планового торгового графика и служит для обеспечения баланса производства и потребления в реальном времени. Небаланс в энергосистеме регулируется Системным оператором посредством управляющих воздействий на электростанции в части увеличения или снижения производства электроэнергии. Цены балансирующего рынка невыгодны для участников, допустивших ошибки в прогнозе, и тем самым правила оптового рынка стимулируют субъектов к повышению качества точности прогнозов.

Стоимость отклонений зависит от цен отклонений и размеров отклонений. Цены отклонений формируются из соотношения цен рынка на сутки вперед и цен балансирующего рынка [Приложение № 12…].

Цена покупки отклонений:

$$Ц_{БР} \uparrow = \max\ (\ Ц_{РСВ}\ ;\ Ц_{БР})\ ; \qquad (1)$$

цена продажи отклонений:

$$Ц_{БР} \downarrow = \min\ (\ Ц_{РСВ}\ ;\ Ц_{БР})\ , \qquad (2)$$

где: $Ц_{РСВ}$ – Цена рынка на сутки вперед;

$Ц_{БР}$ – Цена балансирующего рынка.

Ценовые показатели балансирующего рынка и рынка на сутки вперед между собой могут быть расположены в двух комбинациях. Цена рынка на сутки вперед за определенный час может быть выше цены балансирующего рынка (рис. 6) или, наоборот, ниже.

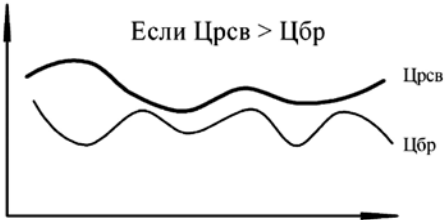

Рис. 6. Иллюстрация примера соотношения цен рынка на сутки вперед и балансирующего рынка при Црсв > Цбр

Расчеты всех существующих комбинаций соотношений цен и объемов отклонений на рынке показывают, что в случаях, когда $Ц_{РСВ} > Ц_{БР}$, покупателям выгодно докупать на БР, и в обратном случае, если $Ц_{РСВ} < Ц_{БР}$, покупателям выгодно продавать на БР. В данных комбинациях субъекты не несут штрафных санкций, увеличивающих стоимость электропотребления по сравнению с ценами РСВ, распространяющимися на плановые объемы.

Эти явления объясняются следующим: на субъектов налагаются штрафы за отклонения в том случае, если направления их отклонений ведут к нарушению баланса энергосистемы, т. е. баланса между выработкой и потреблением электроэнергии. И наоборот, за отклоне-

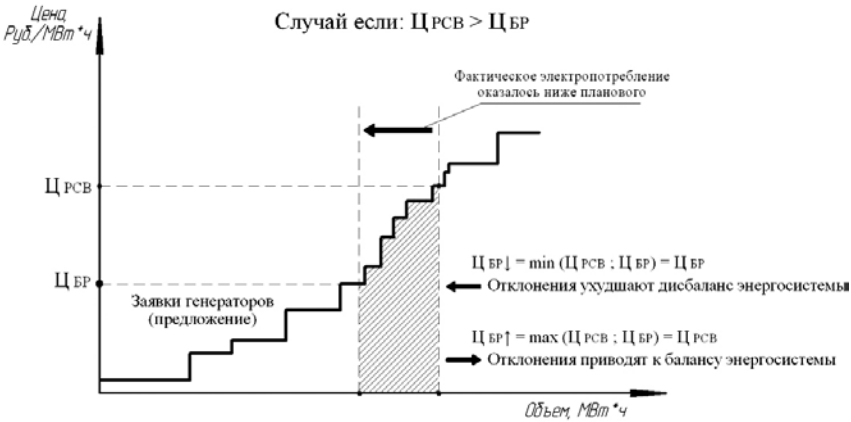

Рис. 7. Иллюстрация направлений отклонений при дисбалансе между выработкой и потреблением электроэнергии в энергосистеме

ния электропотребления в направлении, приводящем к восстановлению баланса выработки и потребления, субъект не штрафуется.

Иллюстрация данного явления представлена на рисунке 7. В данном случае приведен пример разбалансировки энергосистемы в сторону снижения спроса потребителями относительно предложения генераторов. Как видно из рисунка, те потребители, которые отклоняются в сторону снижения электропотребления, своими действиями приводят к нарушению баланса энергосистемы. Они несут убытки в разнице между ценами электроэнергии, купленной ранее на РСВ и проданной на БР по более низкой цене, за объемы, которые так и не потребили. А те потребители, которые отклоняются в сторону увеличения потребления, действуют в сторону восстановления баланса энергосистемы и докупают необходимую электроэнергию по цене своего плана, то есть по цене РСВ.

На основании взаимных направлений выгодных ценовых комбинаций построим матрицу принятия решений для учета факторов рыночной среды в графике электропотребления (таблица 1).

Учитывая представленные комбинации, субъекты оптового рынка при формировании прогнозного графика электропотребления могут закладывать направления возможного дисбаланса энергосистемы и снижать до минимума штрафы за отклонения. Учет направлений дисбалансов в прогнозном графике может производиться коррек-

Таблица 1

Матрица принятия решений при учете факторов рынка

Соотношение цен	Пояснение	Требуемое соотношение объемов	Направление корректировки прогнозного графика
$Ц_{РСВ} > Ц_{БР}$	На рынке наблюдается избыток предложения. Необходимо поддерживать баланс энергосистемы повышением спроса	Факт > План	Снижение прогнозного графика
$Ц_{РСВ} < Ц_{БР}$	На рынке наблюдается дефицит предложения. Необходимо поддерживать баланс энергосистемы снижением спроса	Факт < План	Завышение прогнозного графика

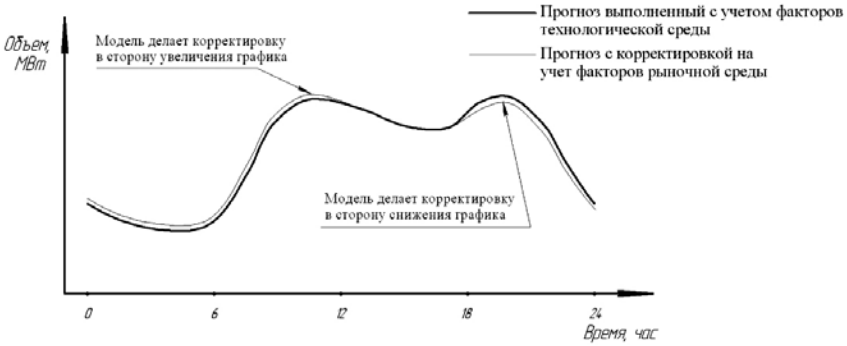

Рис. 8. Корректировка графика, рассчитанного моделью, учитывающей факторы технологической среды, на учет факторов рынка

тировкой прогнозного графика, полученного при помощи модели, сформированной на базе факторов технологической среды (рис. 8).

Учет факторов рыночной среды в прогнозной модели будет состоять из двух звеньев: звена, рассчитывающего прогнозные направления соотношений цен РСВ и БР, и корректировочного звена, осуществляющего учет влияния факторов рыночной среды. В корректировочном звене производится изменение прогнозного графика, полученного на базе модели, учитывающей факторы технологической среды (рис. 9).

Приведем пример учета факторов рыночной среды в процессе прогнозирования электропотребления (рис. 10). Исходным этапом является прогнозирование почасового графика электропотребления, выполненного на основании факторов технологической среды (метеорологических и социально-экономических), целевой функцией которого является минимизация физических отклонений между значениями прогнозного и фактического графиков. Согласно схеме реализации прогноза (рис. 9) параллельно с формированием прогноза технологических факторов производится прогноз факторов рыночных, т. е. прогноз соотношений между $Ц_{РСВ}$ и $Ц_{БР}$.

После выполнения прогноза соотношений цен производится корректировка графика, полученного при учете факторов среды технологической, с учетом направления соотношений цен согласно таблице 1. В те часовые интервалы, в которые прогноз соотношений цен

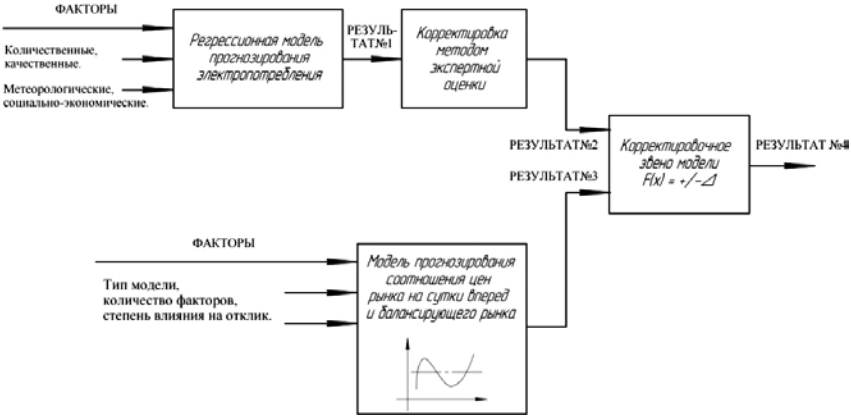

Рис. 9. Схема реализации многофакторной модели прогнозирования

с достаточной долей вероятности произвести не удалось, корректировка графика не производится.

Следует упомянуть не только о направлениях, но и о физических величинах корректировки прогнозного графика. Слишком большие отклонения фактических величин от плановых опасны тем, что они могут внести разлад в модель Администратора торговой системы, рассчитывающую цены БР, и тогда прогнозное направление соотношения цен может не совпасть с фактическим [Приложение № 5…]. Также при ошибке в прогнозе направления соотношений цен и слишком большой величине корректировки участник попадает под действие цен балансирующего рынка, что может привести к большим убыткам. Таким образом, допустимая величина корректировки должна высчитываться экспертами, выполняющими прогноз. Мы же рекомендуем производить корректировку графика на величину, не превышающую среднюю ошибку прогноза, выполняемую моделью, учитывающей факторы технологической среды. Средняя величина ошибки прогноза может быть рассчитана при помощи показателя MAPE (средняя абсолютная ошибка в процентах). При качественном построении прогнозной регрессионной модели и учете социально-экономических факторов средняя ошибка прогноза не должна превышать 5–6 %.

В результате учета в прогнозном графике факторов рыночной среды выполняется целевая функция прогнозирования,

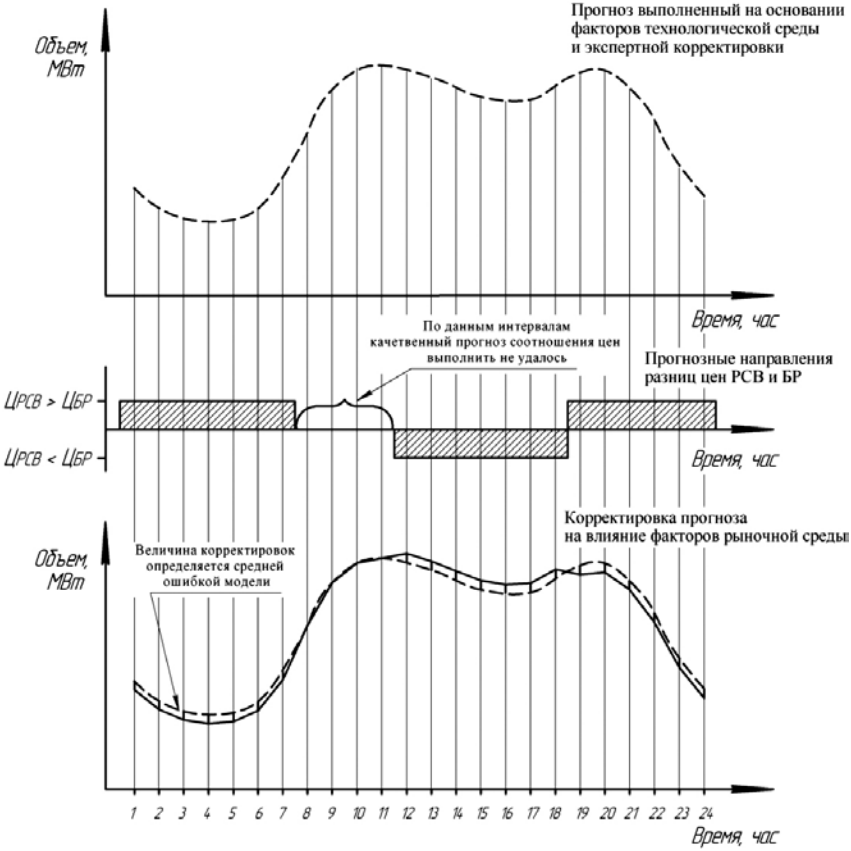

Рис. 10. Пример корректировки прогнозного графика, сформированного при помощи факторов технологической среды, учет факторов рынка

предусматривающая минимизацию стоимости штрафов за отклонения, и повышается общий совокупный эффект от выполнения прогноза. Принцип учета факторов рыночной среды применим абсолютно для всех субъектов оптового рынка электроэнергии России, количество которых на сегодняшний день составляет несколько сотен. Учет факторов рыночной среды выводит прогнозирование на качественно новый уровень, где поставленные задачи реализуются более эффективно.

Литература

1. *Гительман Л. Д.* Энергетический бизнес / Л. Д. Гительман, Б. Е. Ратников. – Москва : Дело, 2006. – 599 с.

2. *Головкин П. И.* Энергосистема и потребители электрической энергии / П. И. Головкин. – Москва :Энергия, 1979. – 279 с.

3. *Лапицкий В. И.* Организация и планирование энергетики : учебник. – 2-е изд. / В. И. Лапицкий. – Москва : Высшая школа, 1975. – 488 с.

4. *Лугинский Я. Н.* Режимы Единой энергосистемы / Я. Н. Лугинский. – Москва : Энергоатомиздат, 1983. – 384 с.

5. *Макоклюев Б. И.* Оперативное прогнозирование нагрузки ЭЭС с учетом метеофакторов. В кн. : Советчики диспетчеров по оперативной коррекции режимов работы ЭЭС / Б. И. Макоклюев, Д. А. Федоров. – Иркутск : [б. и.], 1984. – 192 с.

6. *Постановление* Правительства Российской Федерации «Об утверждении Правил оптового рынка электрической энергии и мощности и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросам организации функционирования оптового рынка электрической энергии и мощности» от 27 декабря 2010 г. № 1172.

7. *Приложение* № 5 к договору о присоединении к торговой системе оптового рынка. Регламент подачи ценовых заявок участниками оптового рынка. Наблюдательный совет НП «Совет рынка» от 21 марта 2012 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.np-sr.ru.

8. *Приложение* № 7 к договору о присоединении к торговой системе оптового рынка. Регламент проведения конкурентного отбора ценовых заявок на сутки вперед. Наблюдательный совет НП «Совет рынка» от 04 февраля 2013 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.np-sr.ru.

9. *Приложение* № 12 к договору о присоединении к торговой системе оптового рынка. Регламент определения объемов, инициатив и стоимости отклонений. Наблюдательный совет НП «Совет рынка» от 28 декабря 2012 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.np-sr.ru.

10. *Таганов Д. Ю.* SPSS. Статистический анализ в маркетинговых исследованиях / Д. Ю. Таганов. – Москва : Эксмо, 2009. – 244 с.

11. *Тихонов Э. Е.* Методы прогнозирования в условиях рынка : учебное пособие / Э. Е. Тихонов. – Невинномысск : Изд-во СевКавГТУ, 2006. – 220 с.

© Соловьева И. А., Дзюба А. П., 2013

Forecasting Electric Energy Consumption with Factors of Process and Market Environment Taken into Account

I. Solovjeva, A. Dzyuba

The article addresses the issue of forecasting volumes of electric energy consuption for the purposes of purchasing in the wholesale market. The authors studied the environments affecting the wholesale market subjects during their functioning process and introduced their own classification. A new model of forecasting energy consumption is suggested. It is based on considering not only the factors determining the energy demand, but also the factors taking into account the wholesale market tendencies. An example of the market environment factors taken into account in the forecast load curve is given. The study results will help to increase the forecasting efficiency and to reduce financial losses not only for particular undertakings, but for the whole region.

Key words: electric energy consuption; forecasting; modelling; wholesale market; efficiency; pricing.

Соловьева Ирина Александровна, кандидат экономических наук, доцент кафедры «Экономика и финансы» факультета «Экономика и управление», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), dubskih@mail.ru.

Solovjeva, I., PhD in Economics, associate professor, Department of Economics and Finance, Faculty of Economics and Management, South Ural State University (Chelyabinsk), dubskih@mail.ru.

Дзюба Анатолий Петрович, начальник технологического отдела ОАО «Челябэнергосбыт» (Челябинск), dzyuba-a@yandex.ru.

Dzyuba, A., Process Engineering Manager, OJSC Chelyabenergosbyt (Chelyabinsk), dzyuba-a@yandex.ru.