

УДК 621.311

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЫНКА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ НЕСОВЕРШЕННОЙ КОНКУРЕНЦИИ: КРУПНАЯ ЭНЕРГОКОМПАНИЯ В КОНКУРЕНТНОМ ОКРУЖЕНИИ ¹

О.В. Марченко

*Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск
E-mail: marchenko@isem.sei.irk.ru*

Разработана математическая модель рынка электроэнергии при несовершенной конкуренции, когда крупная энергокомпания имеет возможность влиять на рыночную цену с целью максимизации собственной прибыли. Исследовано влияние доли рынка, занимаемого крупной энергокомпанией, на цену электроэнергии, установленную мощность электростанций и экономические эффекты производителей и потребителей при неэластичном краткосрочном спросе.

Ключевые слова: электроэнергетика, математическое моделирование, рынок электроэнергии, несовершенная конкуренция, олигополия, краткосрочный, среднесрочный и долгосрочный периоды.

Введение

В настоящее время во многих странах мира создаются или уже действуют рынки электроэнергии. Переход от вертикально интегрированных энергокомпаний к конкурентным оптовому и розничному рынкам в краткосрочном плане направлен на повышение эффективности функционирования электроэнергетики за счет конкуренции, в долгосрочном – на включение рыночных механизмов привлечения инвестиций для эффективного развития.

Как известно из экономической теории, при определенных условиях (многочисленность относительно некрупных продавцов и покупателей, свободный вход на рынок, доступность информации о ценах, отсутствие технических ограничений на объемы производства и др.) рыночное равновесие обеспечивает оптимальное распределение ресурсов, т.е. максимум экономической эффективности. Однако для некоторых рынков, в том числе рынка электроэнергии, некоторые из этих условий не выполняются. В отличие от других отраслей электроэнергетика обладает рядом специфических особенностей. Наиболее важные из них: технологическое единство и неразрывность во времени процессов производства, транспорта и потребления электроэнергии, переменность нагрузки потребителей, высокая капиталоемкость и длительные сроки строительства электростанций. В связи с этим эффективно работающий рынок в электроэнергетике не может сложиться стихийно, а должен быть организован по определенным правилам,

¹ Исследования выполнены при финансовой поддержке РГНФ (проект 06-02-00266а)
© О.В. Марченко, 2009

представляющим собой рациональное сочетание рыночных механизмов с методами государственного регулирования.

Для исследования эффективности рыночного механизма в электроэнергетике разработана математическая модель, описывающая функционирование рынка электроэнергии с учетом развития генерирующих мощностей на основе моделирования действий участников рынка [1–10]. В модели рассматриваются три периода времени: долгосрочный, среднесрочный и краткосрочный. В долгосрочном периоде (годы) инвесторами определяется (планируется) установленная мощность электростанций, в среднесрочном периоде (месяцы) потребители оптимизируют свое электропотребление (выбирают соответствующие режимы) с учетом ценовой ситуации на рынке. В краткосрочном периоде (текущее состояние рынка) системный оператор обеспечивает равенство объемов производства и потребления электроэнергии, ограничивая электропотребление, если в этом возникает необходимость. Во всех случаях каждый участник рынка (производители и потребители) действует таким образом, чтобы максимизировать свой собственный экономический эффект (разницу доходов и затрат) с учетом правил, установленных на рынке.

Применение этой модели позволило исследовать влияние на эффективность рынка ряда факторов, которые отличают «реальный» рынок электроэнергии от «идеального». В частности, показано, что при эластичном спросе принимаемые инвесторами решения в условиях свободного конкурентного рынка являются оптимальными для всей экономики в целом, в том числе с учетом сроков строительства электростанций и переменности нагрузки потребителей [1,2]. При неэластичном краткосрочном спросе (потребители не реагируют на ценовые колебания в режиме реального времени) эффективность работы рынка снижается. Однако при правильно выбранной максимально допустимой цене (ценовом ограничении) это снижение оказывается небольшим (сотые доли процента суммарного экономического эффекта системы «производители + потребители»). Исключить эти потери позволяет введение специального налога на потребителей – «платы за надежность» [3,5].

Модель применялась также для исследования рынка, включающего возобновляемые источники энергии (ВИЭ) со стохастическим режимом работы. Несмотря на большие колебания выработки ВИЭ во времени, эффективность рынка и в этом случае оказалась достаточно высокой [4]. Кроме того, показано, что использование дополнительных экономических механизмов (налог на выбросы вредных веществ энергоисточниками на органическом топливе, субсидии инвесторам, вводящим ВИЭ, налог на потребителей электроэнергии) позволяет включить внешние эффекты (экологические ущербы) в целевые функции участников рынка и обеспечить инвесторам стимулы для ввода оптимального (с точки зрения общества) со-

четания традиционных и возобновляемых источников энергии [6,7]. Аналогичной цели можно также добиться не введением дополнительных налогов (оптимальную величину которых достаточно трудно определить), но применением специального рыночного механизма – рынка «зеленых сертификатов» [8–10].

Во всех указанных исследованиях использовалось предположение о многочисленности производителей, каждый из которых настолько мал, что не может влиять на рыночную цену, т.е. предположение о совершенной конкуренции. Однако электроэнергетика скорее является олигополией, основная черта которой – немногочисленность представленных на рынке производителей. В этом случае каждый производитель разрабатывает свою собственную стратегию поведения, учитывающую поведение конкурентов.

Несмотря на это, расчеты в приближении совершенной конкуренции иногда могут достаточно адекватно описывать рынок электроэнергии вследствие его специфической организации (ранжирование поданных заявок производителей в порядке возрастания цены). При такой организации рынка выигрывает производитель, назначивший меньшую цену, поскольку, во-первых, равновесная цена все равно устанавливается равной цене самой дорогой электроэнергии, нашедшей сбыт, во-вторых, при меньшей заявляемой цене увеличивается шанс, что электроэнергия будет востребована потребителями. Поэтому все производители снижают цену до минимально возможной, в результате чего (даже при наличии на рынке всего нескольких производителей) имитируются условия совершенной конкуренции.

Однако если на рынке присутствует крупный производитель, занимающий достаточно большую долю рынка, он все же имеет возможность воспользоваться рыночной властью и извлечь дополнительную прибыль. В работе [2] рассмотрен случай, когда на рынке присутствует только один крупный производитель, остальные – мелкие. При этом крупный производитель не может ожидать, что цену относительно уровня предельных затрат повысит один из конкурентов (тогда тот потеряет сбыт), а сам устанавливает максимальную цену. Он становится замыкающим и теряет часть рынка. Если его первоначальная доля была велика, то повышение цены при определенных условиях может компенсировать уменьшение отпуска электроэнергии. В предположении эластичности спроса влияние крупного производителя на рынок сводится к изменению кривой предложения по сравнению со случаем совершенной конкуренции. Численные оценки показывают, что при доле крупного производителя менее 20–30 % его влиянием на рыночное равновесие можно пренебречь; это оправдывает использование приближения совершенной конкуренции.

Представляет интерес включить в рассмотрение еще один фактор, отличающий «реальный» рынок от «идеального» – неэластичность кратко-

срочного спроса. В этом случае крупная энергокомпания имеет возможность не просто несколько повысить цену (максимизируя свою прибыль с учетом соответствующего снижения электропотребления), но и установить ее равной заданному на рынке ценовому ограничению, которое может на порядок превышать среднюю цену.

Цель настоящей работы – моделирование рынка электроэнергии, на котором присутствует крупная энергокомпания в конкурентном окружении, при неэластичном краткосрочном спросе.

Математическая модель

Для исследования применялась разработанная ранее математическая модель [1–10], модифицированная таким образом, чтобы учесть следующие изменения постановки задачи:

1. На рынке присутствуют мелкие производители, которые не могут влиять на рыночную цену, и одна крупная энергокомпания.

2. Мелкие производители всегда предлагают электроэнергию по цене, равной удельным переменным затратам.

3. В случае, когда крупная энергокомпания не может сокращением своего предложения повысить цену (мощности одних только мелких производителей достаточно, чтобы обеспечить потребителей электроэнергией), она предлагает электроэнергию по цене, равной удельным переменным затратам.

4. Если мощности мелких потребителей недостаточно, крупная энергокомпания сокращает свое предложение и поднимает цену до уровня ценового ограничения.

Система уравнений имеет вид:

$$\bar{B}_{1a} = \bar{p}\bar{Q}_a - v\bar{Q}_a - cQ_{ma}, \quad (1)$$

$$\bar{B}_{1b} = \bar{p}\bar{Q}_b - v\bar{Q}_b - cQ_{mb}, \quad (2)$$

$$\frac{q}{q_0} = \left(\frac{\bar{p}}{p_0} \right)^\beta, \quad (3)$$

$$Q_D = Nq, \quad (4)$$

$$Q_a = (1 - \varepsilon)Q_D, \quad Q_b = \varepsilon Q_D, \quad p = v \quad \text{при} \quad Q_D < Q_{ma}, \quad (5)$$

$$Q_a = Q_{ma}, \quad Q_b = Q_D - Q_{ma}, \quad p = p_{\max} \quad \text{при} \quad Q_{ma} \leq Q_D \leq Q_{ma} + Q_{mb}, \quad (6)$$

$$Q_a = Q_{ma}, \quad Q_b = Q_{mb}, \quad p = p_{\max} \quad \text{при} \quad Q_D > Q_{ma} + Q_{mb}, \quad (7)$$

$$\bar{B}_2 = \frac{y(q)}{q} \bar{Q} - \bar{p}\bar{Q} - \Delta y(\bar{N}q - \bar{Q}), \quad (8)$$

$$\bar{B}_{12} = \bar{B}_{1a} + \bar{B}_{1b} + \bar{B}_2, \quad (9)$$

$$Q_{ma} = (1 - \varepsilon)Q_m, \quad (10)$$

$$Q_{mb} = \varepsilon Q_m, \quad (11)$$

$$Q = Q_a + Q_b. \quad (12)$$

В предлагаемой модели приняты следующие обозначения:

B – экономический эффект соответствующего субъекта рынка;
 p и Q – цена и объем производимой (потребляемой) электроэнергии;
 v и c – удельные переменные и постоянные затраты производителей;
 Q_m – производство установленной мощности электростанции на годовое число часов ее использования, далее для краткости – просто мощность;
 q – потребность в электроэнергии одного потребителя;
 β – коэффициент эластичности среднесрочного спроса;
 q_0 и p_0 – постоянные;
 N – количество потребителей (случайная величина);
 Q_D – суммарный спрос на электроэнергию;
 ε – доля крупной энергокомпании (в установленной мощности);
 p_{\max} – ценовое ограничение на рынке;
 $u(q)$ – функция полезности потребителя;
 Δu – удельный ущерб у потребителей от недоотпуска электроэнергии.
Индексами обозначены: 1 – производители, 2 – потребители, 12 – система «производители + потребители», a – мелкие производители, b – крупная энергокомпания. Черта над символом означает усреднение по краткосрочному периоду.

Подробный вывод и обоснование системы уравнений имеется в указанной литературе.

Исходные данные и рассмотренные варианты

Расчеты проводились при тех же исходных данных, что и в работе [5]: переменные затраты $v = 0,02$ дол./кВт·ч, постоянные затраты $c = 0,02$ дол./кВт·ч, удельный ущерб $\Delta u = 1$ дол./кВт·ч, $p_0 = 0,04$ дол./кВт·ч, $q_0 = 1$, $\beta = -0,4$, $p_{\max} = 2$ дол./кВт·ч. Цены выражены в долларах (центах) США на киловатт-час; остальные величины – в условных единицах, их размерность не указывается.

Величина N принята распределенной по нормальному закону со средним значением $\bar{N} = 1$ (количество потребителей нормировано на единицу) и среднеквадратичным отклонением 0,1.

В качестве базы для сравнения выбрано решение оптимизационной задачи (максимизация суммарного экономического эффекта \bar{B}_{12}) и решение задачи рыночного равновесия при отсутствии на рынке крупной энергокомпании ($\varepsilon = 0$); соответствующие результаты расчета приведены в [5].

Далее величина ε варьировалась в интервале от 0 до 0,2 для следующих трех вариантов.

Вариант 1 – изменения в краткосрочном периоде. Рынок развивался в условиях свободной конкуренции, которые определили соответствующие значения установленной мощности Q_m и электропотребления q . Затем из действующих производителей организовалась крупная энергокомпания с

установленной мощностью электростанций εQ_m . Изменения произошли только в краткосрочном периоде (уравнения (5) – (7)), ни потребители, ни инвесторы не успели на них отреагировать (q и Q_m постоянны).

Вариант 2 – изменения в среднесрочном периоде. Потребители отреагировали на изменение цены изменением электропотребления q (уравнения (3) и (4)).

Вариант 3 – изменения в долгосрочном периоде. В связи с изменением (ростом) цен на рынок пришли новые независимые производители (величина Q_{ma} увеличивается до тех пор, пока экономический эффект \bar{B}_{1a} не станет равным нулю).

Результаты расчетов

Результаты расчетов приведены на рис. 1–4. Цена электроэнергии выражена в центах на киловатт-час. Экономические эффекты производителей (равные нулю при конкурентном рынке) отнесены к величине вложенного капитала cQ_m (рассмотрены удельные эффекты). Установленная мощность и электропотребление нормированы на соответствующие значения этих величин при оптимальном плане. Для суммарного экономического эффекта приведено его отклонение (снижение) от максимально возможной величины (при оптимальном плане). Числа в скобках означают номер варианта. Графики величин, остающихся для данного варианта постоянными, на рисунках не приведены (кроме цены p).

Из результатов расчетов видно, что в краткосрочном периоде (вариант 1) цена электроэнергии в зависимости от ε резко возрастает. Например, уже при доле крупной энергокомпании всего 5% цена увеличивается почти в 4 раза по сравнению с равновесной. Это влечет за собой существенное увеличение прибылей производителей: при $\varepsilon = 0,05$ удельный экономический эффект крупной энергокомпании (отношение чистого дисконтированного дохода (ЧДД) к вложенному капиталу) составляет 1,5 (заметим, что для признания инвестиций эффективными ЧДД должен быть неотрицательным). Но еще бóльшую выгоду из действий крупной энергокомпании извлекают мелкие производители: в тех же условиях их удельный эффект составляет 3,6.

Электропотребление и установленные мощности электростанций в этом варианте (краткосрочный период) не изменяются. Постоянным остается и суммарный экономический эффект (прибыли производителей равны соответствующим убыткам потребителей).

Такое состояние рынка не является устойчивым. В ответ на резкий рост цен потребители снижают, хотя и с запозданием, свое электропотребление в среднесрочном периоде (вариант 2). Это приводит к стабилизации цен (во всем рассмотренном интервале $0 \leq \varepsilon \leq 0,2$ цена не превышает 6,5 цент/кВт·ч). Соответственно существенно снижаются экономические эф-

факты независимых производителей, а экономический эффект крупной энергокомпании даже становится отрицательным (на графиках не показан).

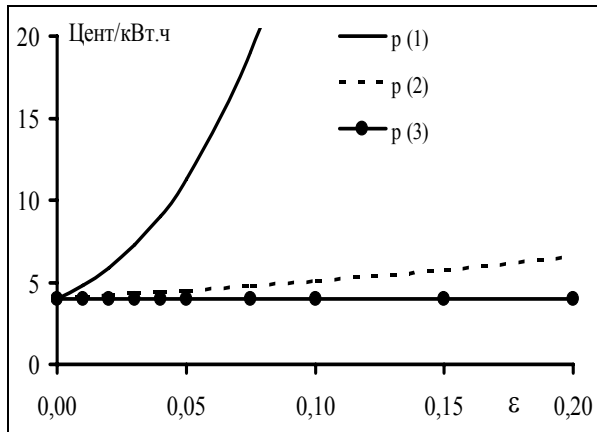


Рис.1. Цена электроэнергии

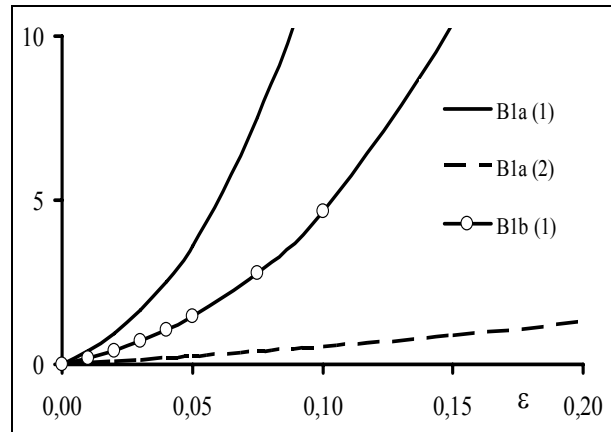


Рис.2. Экономический эффект производителей

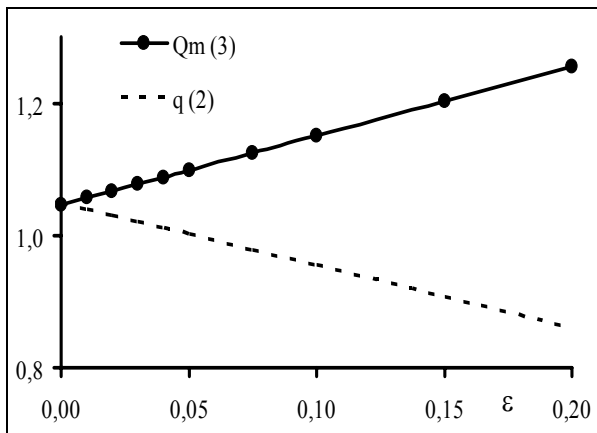


Рис.3. Установленная мощность электростанций и электропотребление

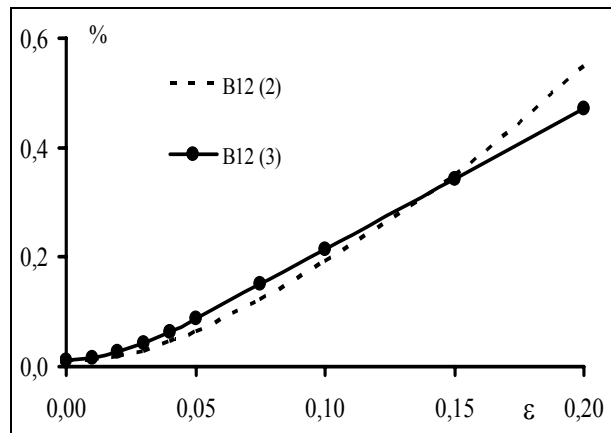


Рис.4. Снижение суммарного экономического эффекта системы «производители + потребители»

Это означает, что использование рыночной власти, приносящей в начальный момент времени компании дополнительные прибыли, в более отдаленной перспективе может даже привести к убыткам. Естественно, такой вывод не является универсальным, поскольку возможная величина снижения электропотребления зависит от эластичности среднесрочного спроса β , кроме того, сам этот процесс может потребовать значительного времени, в течение которого крупная энергокомпания будет получать дополнительные прибыли, а потребители – нести потери. В варианте 2, вследствие уменьшения электропотребления по сравнению с оптимальным, происходит снижение суммарного экономического эффекта системы «производители + потребители» (0,5% от максимальной величины при $\varepsilon = 0,2$).

В долгосрочном периоде (вариант 3) мелким независимым производителям оказывается выгодно вводить новые дополнительные мощности;

этот процесс продолжается до тех пор, пока их экономический эффект \bar{B}_{1a} не станет равным нулю. Тогда цена электроэнергии возвращается к первоначальному значению для конкурентного рынка (4 цента / кВт·ч), то же самое происходит с энергопотреблением, экономический эффект крупной энергокомпании по-прежнему отрицателен, а суммарный экономический эффект меньше максимально возможного приблизительно на ту же величину, что и в предыдущем варианте. Это объясняется избытком введенной установленной мощности, т.е. увеличением суммарных затрат на электроснабжение.

Выводы

Разработана математическая модель рынка электроэнергии при несовершенной конкуренции, когда крупная энергокомпания имеет возможность влиять на рыночную цену с целью максимизации собственной прибыли. Исследовано влияние доли рынка, занимаемого крупной энергокомпанией, на цену электроэнергии, установленную мощность электростанций и экономические эффекты производителей и потребителей при неэластичном краткосрочном спросе.

Показано, что в краткосрочном периоде даже при незначительной доле рынка, занимаемого крупной энергокомпанией, возможен существенный (многократный) рост цен. Однако в более отдаленной перспективе начинают влиять дополнительные факторы (снижение электропотребления, вход на рынок новых независимых производителей), которые «смягчают» последствия первоначального роста цен. В принципе, возможна даже такая реакция рынка, что первоначальная цель крупной компании (извлечение дополнительных прибылей) не будет достигнута.

Для более детального исследования этого вопроса целесообразно рассмотреть задачу в динамической постановке – с учетом времени реакции рынка на стратегическое поведение отдельных продавцов и времени установления рыночного равновесия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Марченко О.В.** Моделирование инвестиционных решений в электроэнергетике с учетом неопределенности спроса. – Препринт. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2003. – 24 с.

2. **Марченко О.В.** Оценка влияния неопределенности спроса на инвестиционные решения в электроэнергетике // Методы исследования и моделирования технических, социальных и природных систем. – Новосибирск: Наука, 2004. – С.169–191.

3. **Марченко О.В.** Моделирование долгосрочного рыночного равновесия в электроэнергетике при неэластичном спросе. – Препринт. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2004. – 20 с.

4. **Марченко О.В.** Математическая модель рынка электроэнергии с учетом развития генерирующих мощностей // Тр. Всерос. конф. Равновесные модели экономики и энергетики. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2005. – С.384–388.

5. **Марченко О.В.** Оценка влияния неэластичности спроса на эффективность рыночного механизма в электроэнергетике // Изв. РАН. Энергетика. – 2005. – № 4. – С.35–44.

6. **Марченко О.В.** Моделирование регулируемого рынка электроэнергии с участием энергоисточников со стохастическим режимом работы // Оптимизация, управление, интеллект. – 2005. – №1 (9). – С.94–106.

7. **Marchenko O.V.** Mathematical modelling of electricity market with renewable energy sources // Renewable Energy. – 2007. – V.32. – №6. – P.976–990.

8. **Marchenko O.V.** Mathematical modelling of a green certificate market // Proc. 3-rd Intern. Workshop Liberalization and Modernization of Power Systems: Risk Assessment and Optimization for Asset Management. – Irkutsk: Energy Syst. Inst., 2006. – P.114–120.

9. **Марченко О.В.** Моделирование и оценка эффективности экономического механизма внедрения возобновляемых источников энергии: «зеленые сертификаты» / Изв. РАН. Энергетика. – 2007. – №2. – С.17–25.

10. **Marchenko O.V.** Modeling of a green certificate market // Renewable Energy – 2007. – doi:10.1016 / j.renene.2007.09.026.