

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РЫНКА

**ЗАРУБА В. Я.**

*доктор экономических наук*

**ХОДАК М. И.**

**ХАРЬКОВ**

**У**ровень обеспеченности страны энергетическими ресурсами определяет возможности развития ее промышленного комплекса и сказывается на конкурентоспособности отечественной продукции. Созданный в 1996 году оптовый рынок электрической энергии (ОРЭ) Украины функционирует на основе механизма, имеющего в мировой практике название модели Единого покупателя. Сегодня всю произведенную в стране электроэнергию приобретает специально созданная ГП «Энергорынок», одновременно являясь и единым продавцом оптовой электроэнергии распределительным компаниям и крупным потребителям. Ценовые тарифы за приобретаемую у производителей электроэнергию устанавливаются Национальной комиссией регулирования электроэнергетики. Для потребителей цена продажи формируется на основе средней оптовой цены покупки электроэнергии от производителей. Отсутствие механизмов формирования эффективной рыночной цены в модели Единого покупателя приводит к неоптимальности ценовых сигналов участ-

никам ОРЭ, потребителям и потенциальным инвесторам. Концепцией функционирования и развития оптового рынка электроэнергии, принятой в 2002 году, намечен постепенный переход ОРЭ к либерализованному рынку путем внедрения прямых товарных поставок электроэнергии по двусторонним контрактам между производителями, поставщиками и конечными потребителями, балансирующего рынка электроэнергии и рынков финансовых контрактов и вспомогательных услуг.

**Анализ научных публикаций по теме.** Теоретико-прикладные вопросы эффективного функционирования рынка электроэнергии рассматривались в трудах Г. К. Вороновского, Т. Б. Игнашкина, Н. Н. Кожевникова, Т. А. Коцка, Е. В. Крикавского, О. Е. Кузьмина, С. Л. Прузнера, В. И. Эдельмана и др. Вместе с тем, остаются нерешенными многие задачи построения экономико-математических моделей электроэнергетического рынка, в результате оказываются малоизученными закономерности изменений его функционирования. Обоснование целесообразности перехода от модели Единого покупателя к Двусторонним контрактам должно подкрепляться, на наш взгляд, сравнительным логико-математическим анализом этих моделей и количественным прогнозом изменений на рынке, которые следует ожи-

дать в результате его трансформации, что обуславливает актуальность данной работы.

**Целью работы** является построение модели экономико-математических моделей рынков Единого покупателя и двусторонних контрактов, а также определение характера изменений конъюнктуры электроэнергетического рынка при переходе от рынка Единого покупателя к рынку двусторонних контрактов.

**Основное содержание.** Для отыскания характеристик параметров состояния рынка в целом будем рассматривать всех генераторов как обобщённого продавца электроэнергии, а всех потребителей - как обобщённого покупателя. Минимальный интервал времени, за который фиксируются объёмы потребленной электроэнергии, назовём единицей времени рынка. Положим, что период, на который заключаются контракты на продажу-покупку электроэнергии, составляет  $T$  единиц времени.

Рассмотрим модель формирования двусторонних контрактов на основе повременных соглашений. В соответствии с этой моделью общее соглашение, которое принимают продавец и покупатель на контрактный период в целом, рассматривается как результат их повременных соглашений, принятых для отдельных единичных интервалов времени  $t$ ,  $t = 1, 2, \dots, T$ . Варианты соглашений, обсуждаемые продавцом и покупателем относительно некоторого единичного интервала времени, будем описывать векторами вида  $x_t = (w_t, s_t)$ , где  $w_t$  - объём производства электроэнергии в течение единицы времени  $t$ ,  $s_t$  - стоимость покупки-продажи электроэнергии в объёме  $w_t$ . При этом  $s_t = p_t w_t$ , где  $p_t$  - цена покупки-продажи электроэнергии на интервале времени  $t$ . Введем также следующие обозначения:  $n$  - общее количество электрогенерирующих блоков (ЭГБ) у всех производителей электроэнергии;  $w_{it}$  - объём произведенной  $i$ -м ЭГБ электроэнергии за период  $t$ ;  $w_i^0$  - максимально возможный объём производства электроэнергии  $i$ -м ЭГБ единицу времени;  $h_i$  - минимальная (исходя из себестоимости производства и минимальной рентабельности деятельности) цена одного кВт\*часа электроэнергии, произведенного  $i$ -м ЭГБ.

Присвоим номера  $i$  ЭГБ в порядке возрастания установленных ими минимальных цен на производимую электроэнергию:  $c_i < c_{i+1}$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ). Тогда минимальная стоимость электроэнергии в объёме  $w$ , по которой производители могут согласиться её реализовать, составит величину, определяемую соотношением (1):

$$\varphi^*(w) = \sum_{i=1}^{n(w)} h_i w_i^0 + h_{n(w)+1} w_{n(w)+1}, \quad (1)$$

где номер генератора  $n(w)+1$ , имеющего максимальную цену генерации определяется из следующего условия:  $\sum_{i=1}^{n(w)} w_i^0 < w \leq \sum_{i=1}^{n(w)+1} w_i^0$ . Нетрудно видеть, что функция  $\varphi^*(w)$  является кусочно-линейной, выпуклой, возрастающей на интервале  $[0, w^{\max}]$  своего определения, где  $w^{\max} = \sum_{i=1}^n w_i^0$ . Для упрощения изложе-

ния вместо кусочно-линейной функции  $\varphi^*(w)$  будем использовать как её эквивалент функцию  $\varphi(w)$ , которая с необходимой точностью аппроксимирует функцию, но имеет при этом непрерывную производную.

Обозначим как  $f_t(w_t)$  зависимость полезности, получаемой обобщённым потребителем от количества  $w_t$  потребленной в течение  $t$ -й единицы времени электроэнергии. Значениям функции  $f_t(w_t)$  будем приписывать стоимостные выражения, интерпретируемые как максимально возможные стоимости покупки электроэнергии в определенных объемах  $w$ . В соответствии с теорией маргинальной полезности функции  $f_t(w_t)$  ( $t = 1, 2, \dots, T$ ) являются вогнутыми неубывающими функциями на всей области неотрицательных значений  $w_t$ .

Область взаимно допустимых соглашений между продавцом и покупателем электроэнергии относительно её цены и объёма на рассматриваемом единичном интервале времени описывается множеством (2):  $X_t = \{x_t = (w_t, s_t) | w_t \in (0, w^{\max}), s_t \in [\varphi(w_t), f_t(w_t)]\}$ . (2)

Выигрыш потребителя  $F_t$  за единицу времени определяется разностью между стоимостным выражением полезности и оплачиваемой производителем стоимостью потребленной электроэнергии исходя из соотношения (3):

$$F_t = F_t(x_t) = f_t(w_t) - p_t w_t, \quad (3)$$

Потребитель в случае максимизации своего выигрыша при заданной цене  $p_t$  выбирает для покупки такой объём электроэнергии  $a$ , при котором выполняются условия:  $\partial F_t / \partial w_t = 0$ ,  $f'_t(a) = p_t$ .

Выигрыш продавца  $\Phi_t$  составляет разность (4) между стоимостью продажи электроэнергии объёмом  $w_t$  и минимальной его стоимостью:

$$\Phi_t = \Phi_t(x_t) = p_t w_t - \varphi(w_t). \quad (4)$$

Условия оптимальности продажи электроэнергии в объёме  $b$  при заданной цене  $p_t$  описываются равенствами:  $\partial \Phi_t / \partial w_t = 0$ ,  $\varphi'(b) = p_t$ . Тогда цена равновесия  $p_t^*$ , при которой продавец и покупатель могут прийти к соглашению относительно объёма продажи-покупки электроэнергии объёмом  $w_t^*$ , определяется формулой (5):

$$p_t^* = f'_t(w_t^*) = \varphi'(w_t^*), \quad (5)$$

При оптимальном по Парето варианте соглашения величина выигрыша продавца не может быть увеличена без уменьшения выигрыша покупателя, и наоборот. В [1] показано, что множество  $X_t^{\mathcal{P}}$  эффективных (оптимальных по Парето) соглашений на множестве  $X_t$  имеет следующий вид (6):

$$X_t^{\mathcal{P}} = \{x_t = (w_t, s_t) | w_t = w_t^*, s_t \in [\varphi(w_t^*), f_t(w_t^*)]\}. \quad (6)$$

Варианты соглашений в ситуациях равновесия на единичных интервалах времени принимаются сторонами как их повременные соглашения на контрактном периоде времени. В условиях согласованных цен  $p_t^*$  ( $t = 1, 2, \dots, T$ ) максимумы общих выигрышей продавца и покупателя на контрактном периоде достигаются при объёмах сделок  $w_t^*$  ( $t = 1, 2, \dots, T$ ):

$$\sum_{i=1}^T (f_i(w_i^*) - p_i^* w_i^*) = \max \sum_{i=1}^T (f_i(w_i) - p_i^* w_i), \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^T (p_i^* w_i^* - \varphi(w_i^*)) = \max \sum_{i=1}^T (p_i^* w_i - \varphi(w_i)). \quad (8)$$

При этом в условиях цен  $p_i^*$  ( $t = 1, 2, \dots, T$ ) максимально возможную величину составляет и сумма выигрышей продавца и покупателя.

Реализация эффективных равновесных параметров (цен и объёмов) продажи-покупки электроэнергии на рынке с моделью двусторонних торгов осуществляется в ходе проведения множества локальных торгов между продавцами и покупателями. При этом прогнозируемые повременные рыночные цены  $p_i^*$  ( $t = 1, 2, \dots, T$ ) и ожидаемые объёмы  $w_i^*$  ( $t = 1, 2, \dots, T$ ) сделок на рынке в целом составляют информационную основу для формирования участниками локальных торгов стратегий их переговоров. Вопросы формирования эффективных стратегий поведения продавцов и покупателей в локальных торгах на энергетическом рынке рассмотрены в работе [2].

Как было отмечено выше, на украинском рынке с Единым покупателем НКРЭ нормативно устанавливает тарифы, по которым для каждого  $i$ -го ЭГБ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , определяется цена  $c_i$  производства кВт-часа электроэнергии. В процессе работы энергосистемы диспетчер в течение каждой  $t$ -й единицы времени для обеспечения нужд потребителей в объёме  $w_t$  электроэнергии подключает ЭГБ с минимальными ценами её производства. Обозначим как  $s_t(w_t)$  денежную сумму, получаемую генерирующими предприятиями за свою работу в течение периода  $t$ . Для обеспечения сопоставимости исходных данных при проведении сравнения моделей Единого покупателя и двусторонних торгов будем полагать, что минимальные цены  $c_i, h_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) производства единичного объёма электроэнергии, устанавливаемые для каждого  $i$ -го ЭГБ в рассматриваемых моделях, совпадают между собой:  $c_i = h_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ). По этой причине в моделях Единого покупателя и двусторонних торгов будут совпадать функции  $g, \varphi$  минимальных стоимостей производства электроэнергии,  $g_e(w) = \varphi(w)$ . В соответствии с соотношением (9), вектору  $w = (w_t, t = 1, 2, \dots, T)$  фактических объёмов потребления электроэнергии в течении рассматриваемого периода времени  $T$  однозначно соответствуют сумма  $g$  необходимой оплаты производителям и фактическая средняя цена  $\zeta_\varphi$  реализации электроэнергии:

$$g = g(w) = \sum_{i=1}^T g_e(w_i), \quad \zeta_\varphi = \zeta_\varphi(w) = g(w) / \sum_{i=1}^T w_i \quad (9)$$

При заданной цене  $p$  максимум выгоды потребителя на  $t$ -й единице времени достигается при покупке и потреблении им электроэнергии в объёме  $v_t^* = v_t^*(p)$ , который определяется из условия, что  $f_t'(v_t^*) = p$ . Обозначим как  $v^*(p)$  вектор оптимальных объёмов потребления по цене  $p$  электроэнергии в течение периода времени  $T$ ,  $v^*(p) = (v_t^*(p), t = 1, 2, \dots, T)$ .

В модели Единого покупателя потребителю устанавливается цена  $\zeta$  (строго говоря, составляющая цены) покупки электроэнергии в течение периода

времени  $T$  исходя из прогнозируемого вектора  $z = (z_t, t = 1, 2, \dots, T)$  объёмов потребления электроэнергии и нормативно установленных цен  $c_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) на реализацию электроэнергии её предприятиями-генераторами. Тогда цена электроэнергии течения периода  $T$  будет определяться по формуле (10):

$$p = \zeta_\varphi(z) = \sum_{i=kT+1}^{T(k+1)} g_e(z_i) / \sum_{i=kT+1}^{T(k+1)} z_i. \quad (10)$$

Пусть цена  $\zeta$  покупки электроэнергии, установленная на плановый период времени  $T$ , представляет собой цену в ситуации динамического равновесия на рынке Единого покупателя, если она совпадает с фактической средней ценой  $\zeta_\varphi(v(\zeta))$  реализации электроэнергии в этом периоде:  $\zeta = \zeta_\varphi(v^*(\zeta))$ .

Если цена  $p$  электроэнергии будет установлена в размере меньше, чем цена  $\zeta$  в ситуации динамического равновесия, то реальные объёмы потребления  $v_t^*(p)$  ( $t = 1, 2, \dots, T$ ) полностью или частично будут превышать прогнозные значения потребления  $z_t$  ( $t = 1, 2, \dots, T$ ), на основе которых была рассчитана величина  $p$ . В результате окажется, что реальный размер необходимой годовой оплаты производителям  $g(v^*(p))$  и фактическая среднегодовая цена реализации электроэнергии  $\zeta_\varphi(v^*(p))$  окажутся больше, чем соответствующие запланированные величины  $g(z)$ ,  $p$ . Если цена покупки электроэнергии  $p$  будет больше цены  $\zeta$  в ситуации динамического равновесия, то реальные объёмы потребления  $v_t^*(p)$  ( $t = 1, 2, \dots, T$ ) будут меньше прогнозируемых величин  $z_t$  ( $t = 1, 2, \dots, T$ ). При этом будут иметь место следующие соотношения:  $g(v_t^*(p)) < g(z)$ ,  $\zeta_\varphi(v_t^*(p)) < p$ . На рынке в обоих рассмотренных случаях, при  $p \neq \zeta$ , возникает ситуация дисбаланса, характеризующаяся либо недоплатой производителям положенной суммы, либо переплатой потребителем купленной электроэнергии из-за завышенной цены на неё.

Длительность контрактного периода в модели двусторонних торгов примем равной такому же сроку, в течение которого в модели Единого покупателя не изменяется цена продажи электроэнергии. Будем полагать, что цена электроэнергии, устанавливаемая на период времени  $T$  на рынке с Единым покупателем, совпадает с ценой в ситуации динамического равновесия.

Для каждой единицы времени  $t, t = 1, 2, \dots, T$ , введем в рассмотрение функции  $S_i^{PO}, S_i^{PP}, S_i^P$  такие, что:

$$S_i^{PO}(w_t) = f_t'(w_t), \quad S_i^{PP}(w_t) = \varphi'(w_t), \\ S_i^P(w_t) = S_i^{PO}(w_t) - S_i^{PP}(w_t) = f_t'(w_t) - \varphi'(w_t).$$

Из свойств выпуклости вверх функции  $f_t$  и выпуклости функции  $\varphi$  следует, что функция  $S_i^{PO}$  является убывающей, а функция  $S_i^{PP}$  – возрастающей. Поэтому функция  $S_i^P$  оказывается убывающей, причём нулевое значение она принимает при величине  $w_t = w_t^*$ , соответствующей ситуации равновесия на интервале времени  $t$ :  $S_i^P(w_t^*) = f_t'(w_t^*) - \varphi'(w_t^*) = 0$ . Из свойства выпуклости функции  $\varphi$  следует также что  $\zeta_\varphi(w_t) \leq \varphi'(w_t)$ . Тогда в соответствии с приведенными утверждениями получаем:  $f_t'(v_t^*(\zeta)) = \zeta \leq \varphi'(v_t^*(\zeta))$ ,  $S_i^P(v_t^*(z)) \leq 0$ . Из этих соотношений следует, что  $w_t^* \leq v_t^*(\zeta)$ ,  $p_t^* \leq \zeta$  ( $t = 1, 2, \dots, T$ ). Заметим, что на прак-

тике имеет место следующее соотношение:  $w_1^0 < v_i^*(\zeta)$ . При условии выполнения этого соотношения получаем, что  $\zeta < \varphi'(v_i^*(\zeta))$ ,  $S_i^p(v_i^*(\zeta)) < 0$ ,  $w_i^* \leq v_i^*(\zeta)$ . Таким образом, на каждом единичном интервале времени  $t, t=1, 2, \dots, T$ , объёмы и цены производства-покупки электроэнергии в модели двусторонних торгов оказываются меньше, чем в модели Единого покупателя. Соответственно общий объём и средняя цена производства-покупки электроэнергии за контрактный период времени в модели также оказываются меньше, чем в модели Единого покупателя.

**Выводы.** Механизм двусторонних контрактов на рынке электроэнергии позволяет участникам рынка оптимизировать цены и объёмы её производства-потребления. При переходе электроэнергетического рынка Украины от модели Единого покупателя к модели двусторонних контрактов следует ожидать снижения как цен на электроэнергию, так и объёмов её производства и потребления. Причины этих изменений будут состоять в более экономном расхо-

довании электроэнергии потребителями в моменты пикового спроса, и связанным с этим обстоятельством снижением объёмов её закупок у производителей с высокими ценами. Дальнейшие исследования будут посвящены анализу влияния макроэкономических факторов на рыночные цены, объёмы генерации и потребления электроэнергии. ■

#### ЛИТЕРАТУРА

**1. Ходак М. І.** Теоретико-ігровий аналіз ринку електроенергії з двосторонніми контрактами [Текст] / М. І. Ходак // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну №5 (55) 2010. – С. 180-184.

**2. Ходак М. І.** Эффективные стратегии продавцов и покупателей электроэнергетических ресурсов на рынке с двусторонними контрактами [Текст] / М. І. Ходак // Анализ, моделирование, управление, развитие экономических систем: науч. труды III Межд. школы-симпозиума АМУР-2009. – Симферополь, 2009 – С. 309-314.