

УДК 338.246: 621.311

ТЕОРЕТИКО-ІГРОВИЙ АНАЛІЗ РИНКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ З ДВОСТОРОННІМИ КОНТРАКТАМИ

М.І. ХОДАК

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Розроблено модель та проведено теоретико-ігровий аналіз ситуації, в якій укладаються угоди з продажу та купівлі електроенергії на ринку з двосторонніми контрактами. Для торгу між сукупностями виробників та покупців на ринку визначено характеристики взаємно прийнятних угод, що відповідають оптимальності по Парето, та ситуації рівноваги на одиничному і контрактному інтервалах часу

Стан електроенергетичної галузі істотно впливає на конкурентноздатність і можливості розвитку вітчизняних товаровиробників, а також економічну безпеку держави. Створений в 1996 році оптовий ринок електричної енергії (ОРЕ) України функціонує на основі механізму, що має у світовій практиці назву моделі єдиного покупця. Відповідно до цієї моделі, одна спеціально створена компанія (ДП «Енергоринок») купує всю вироблену в країні електроенергію й одночасно являється єдиним продавцем оптової електроенергії розподільним компаніям і великим споживачам. Формування цін покупки електроенергії у виробників здійснюється у відповідності або із ціновими заявками, або із ціновими тарифами, які встановлюються Національною комісією регулювання електроенергетики. Для споживачів ціна продажу формується на основі середньої оптової ціни покупки електроенергії від виробників.

Недолік моделі єдиного покупця полягає в тому, що вона не дає можливості формувати ефективну ринкову ціну на електричну енергію та з цієї причини приводить до неоптимальності цінових сигналів учасникам ОРЕ, споживачам і потенційним інвесторам. Прийнятою в 2002 році Концепцією функціонування й розвитку ОРЕ намічений його поступовий перехід до лібералізованого ринку шляхом впровадження прямих товарних поставок електроенергії по двосторонніх контрактах між виробниками, постачальниками й кінцевими споживачами, а також балансуючого ринку електроенергії й ринків фінансових контрактів і допоміжних послуг. У зв'язку із цим, *загальна постановка проблеми* полягає в розробці й впровадженні нових механізмів функціонування електроенергетичного ринку, заснованих на сучасних моделях, які позитивно зарекомендували себе у світовій практиці.

Теоретичні й прикладні питання ефективного функціонування ринку електроенергії розглядалися в працях Г.К. Вороновського, В.І. Едельмана, Т.Б. Ігнашкіна, Н.Н. Кожевникова, Т.А. Коцка, Є.В. Крикавського, О.Є. Кузьміна, В.І. Лапицького, С.Л. Прузнера та ін. Разом з тим, залишаються маловивченими закономірності функціонування ринку в умовах нових перспективних моделей, зокрема, питання формування взаємоприйнятних угод купівлі-продажу електроенергії для укладання двосторонніх контрактів.

Постановка завдання

Метою роботи є побудова моделі ситуації, в якій формуються угоди купівлі-продажу електроенергії на ринку з двосторонніми контрактами, а також визначення характеристик і властивостей взаємоприйнятних угод.

Результати та їх обговорення

Для відшукування характеристик параметрів стану ринку в цілому будемо розглядати всіх генераторів як узагальненого продавця електроенергії, а всіх її постачальників і великих споживачів - як узагальненого покупця. Мінімальний інтервал часу, за який фіксуються обсяги спожитої електроенергії (наприклад, одна година), назвемо одиницею часу функціонування електроенергетичного ринку. Домовимося, що період, на який укладаються угоди купівлі-продажу електроенергії, становить T одиниць часу. Будемо виходити з моделі формування двосторонніх контрактів на основі погодинних угод. Відповідно до цієї моделі загальна угода, яку укладають продавець і покупець на контрактний період у цілому, розглядається як результат їхніх погодинних угод, прийнятих для окремих одиничних інтервалів часу t , $t = 1, 2, \dots, T$. Варіанти угод, обговорювані продавцем і покупцем щодо деякого одиничного інтервалу часу, будемо описувати векторами виду $x_t = (w_t, s_t)$, де w_t – обсяг виробництва-споживання електроенергії протягом розглянутої одиниці часу t , s_t – вартість купівлі-продажу електроенергії в обсязі w_t . При цьому $s_t = p_t w_t$, де p_t – ціна купівлі-продажу електроенергії на розглянутому інтервалі часу t . Будемо позначати остаточно прийняті варіанти погодинних угод як $x_t^{i\delta}$, а вектор параметрів загальної угоди на контрактний період в цілому – як x^T , $x^T = (w^T, s^T)$. Відповідно до моделі формування двосторонніх контрактів на основі погодинних угод виявляється, що $\delta^T = \sum_{t=1}^T x_t^{i\delta}$.

Введемо також такі позначення: n – загальна кількість енергогенеруючих блоків (ЕГБ) у всіх виробників електроенергії; w_{it} – обсяг виробленої електроенергії i -м ЕГБ за одиницю часу; w_i^0 – максимально можливий обсяг виробництва електроенергії i -м ЕГБ за одиницю часу; h_i – мінімальна ціна одиниці об'єму електроенергії (одного кВт*год.), виробленої i -м ЕГБ з урахуванням собівартості виробництва й забезпечення мінімальної рентабельності його діяльності.

Мінімальна вартість електроенергії в обсязі w , за яку виробники можуть погодитися її реалізувати, становить величину $\varphi^*(w)$:

$$\varphi^*(w) = \min \left\{ \sum_{i=1}^n h_i w_{it} \mid 0 \leq w_i \leq w_i^0, \sum_{i=1}^n w_{it} \leq w \right\}.$$

Неважко бачити, що функція $\varphi(w)$ є кусочно-лінійною, опуклою, зростаючою на інтервалі $[0, w^{\max}]$ свого визначення, де $w^{\max} = \sum_{i=1}^n w_i^0$. Привласнимо енергогенеруючим блокам номери i в порядку, який відповідає зростанню встановлених ЕГБ мінімальних цін на вироблену ними електроенергію: $h_i < h_{i+1}$, $i=1, 2, \dots, n$. Тоді функція $\varphi^*(w)$ може бути представлена в такому виді:

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

де номер генератора $n(w)+1$, що відповідає максимальній ціні генерації визначається з умови (1):

$$\sum_{i=1}^{n(w)} w_i^0 < w \leq \sum_{i=1}^{n(w)+1} w_i^0. \quad (1)$$

Для спрощення наступних викладень замість кусочно-лінійної функції будемо надалі як її еквівалент розглядати функцію $\varphi(w)$, що з необхідною точністю апроксимує $\varphi^*(w)$, але при цьому має

безперервну похідну. Позначимо як $f_t(w_t)$ залежність корисності, що отримується узагальненим споживачем від кількості електроенергії w_t , спожитої протягом t -ої одиниці часу. Значенням функції $f_t(w_t)$ будемо приписувати вартісні вирази, які можуть інтерпретуватися як максимально можливі вартості придбання електроенергії в певних обсягах w . Відповідно до теорії маргінальної корисності функції $f_t(w_t)$ ($t = 1, 2, \dots, T$) є вогнутими (опуклими нагору) неубутними функціями на всій області ненегативних значень w_t .

Враховуючи введені визначення, область взаємно припустимих угод між продавцем і покупцем електроенергії щодо її ціни й обсягу на розглянутому одиничному інтервалі часу буде описуватися множиною X_t :

$$X_t = \{x_t = (w_t, s_t) \mid w_t \in (0; w^{\max}], s_t \in [\varphi(w_t), f_t(w_t)]\}.$$

Виграш споживача F_t за одиницю часу визначатиметься у вартісній формі різницею між вартісним вираженням корисності й оплачуваної продавцеві вартістю спожитої електроенергії:

$$F_t = F_t(x_t) = f_t(w_t) - p_t w_t.$$

Споживач у випадку максимізації свого виграшу при заданій ціні p_t обере для покупки такий обсяг електроенергії a , при якому виконуватимуться умови: $\partial F_t / \partial w_t = 0$, $f'_t(a) = p_t$.

Виграш продавця Φ_t складатиме різниця між вартістю продажу виробленої ним електроенергії обсягом w_t та встановленої ним її мінімальної вартості:

$$\hat{O}_t = \hat{O}_t(x_t) = p_t w_t - \varphi(w_t).$$

Умови оптимальності продажу електроенергії в обсязі b при заданій ціні p_t описуються рівностями: $\partial \hat{O}_t / \partial w_t = 0$, $\varphi'(b) = p_t$. Таким чином, ціна p^* , при якій продавець і покупець можуть дійти згоди щодо обсягу купівлі-продажу електроенергії, визначається формулою (2):

$$p^* = f'_t(w^*) = \varphi'(w^*), \quad (2)$$

де w^* – взаємоприйнятний обсяг купівлі-продажу електроенергії.

Знайдемо властивості, якими володіє множина $X_t^{\hat{Y}}$ ефективних (оптимальних за Парето) угод на множині X_t взаємно припустимих угод, що відповідають розглянутому одиничному інтервалу часу. При оптимальному за Парето варіанті угоди величина виграшу продавця не може бути збільшена без зменшення виграшу покупця, і навпаки [1]. Виявляється, що множина $X_t^{\hat{Y}}$ має наступний вид:

$$X_t^{\hat{Y}} = \{x_t = (w_t, s_t) \mid w_t = w^*, s_t \in [\varphi(w^*), f_t(w^*)]\}.$$

Доведемо це твердження. Позначимо як Γ сумарний виграш продавця й покупця при фіксованому обсязі угоди w_t , $\Gamma = \Gamma(w_t) = f_t(w_t) - \varphi(w_t)$. Із умови (2) виходить, що $\Gamma'(w^*) = 0$. Це означає, що при обсязі угоди w^* досягається максимум сумарного виграшу продавця й покупця. Оскільки для всіх угод з безлічі $X_t^{\hat{Y}}$ сумарний виграш продавця й покупця становить однакову величину $f_t(w^*) - \varphi(w^*)$, то всі варіанти угод з множини $X_t^{\hat{Y}}$ взаємно не домінують один одного. Припустимо, що існує варіант угоди $x \in X \setminus X_t^{\hat{Y}}$, який домінує варіант $u \in X_t^{\hat{Y}}$. Тоді при варіанті x угоди сумарний виграш продавця й покупця повинен бути більше, ніж при варіанті угоди u . Однак це суперечить тому, що для

всіх угод з множини X_i^y сумарний вигравш є максимальним. З отриманого протиріччя випливає, що множина X_i^y містить тільки такі угоди, кожне з яких не домінує жодне інша угода з множини X_i .

Процес переговорів між продавцем і покупцем електроенергії щодо її ціни й обсягу представимо у вигляді гри, що проходить за наступними правилами. Продавець і покупець пропонують до взаємного розгляду свої варіанти ціни (відповідно, p_{np} та p_{no}) та обсягу угоди (w_{np} та w_{no}). Якщо запропоновані ціни p_{np} , p_{no} не співпадають, це означає, що угоди не досягнуто, та гравці (продавець і покупець) одержують вигрaші, що дорівнюють нулю. Величини w_{np} , w_{no} інтерпретуються гравцями при узгодженій ціні p як максимально прийнятні обсяги генерації й споживання електроенергії. Тому у випадку, коли $w_{i\delta} \neq w_{ii}$, обсяг угоди покладається рівним величині зі співвідношення (3):

$$w_{\min} = w_{\min}(w_{i\delta}, w_{ii}) = \min\{w_{i\delta}, w_{ii}\} \quad (3)$$

Будемо припускати, що якщо при узгодженій ціні p запропоновані обсяги угоди збігаються, $w_{i\delta} = w_{ii}$, то вигрaші обох сторін переговорів збільшуються на малу позитивну величину ε . Дане збільшення вигрaшів можна інтерпретувати як підвищення задоволеності сторін від угоди у випадку збігу їхніх пропозицій з фактичними параметрами контракту.

Позначимо як x_{np} , x_{no} вектори параметрів контракту, запропоновані відповідно продавцем і покупцем, $x_{np} = (p_{np}, w_{np})$, $x_{no} = (p_{no}, w_{no})$. З врахуванням введених «правил гри» і припущень, вигрaші продавця B_{np} і покупця B_{no} у переговорному процесі будуть задовольняти умовам (4) – (5):

$$\hat{A}_{i\delta} = \hat{A}_{i\delta}(x_{i\delta}, x_{ii}) = \xi_p(p_{i\delta}, p_{ii})(p_{i\delta} w_{\min} - \varphi(w_{\min})) + \xi_w(w_{i\delta}, w_{ii}), \quad (4)$$

$$\hat{A}_{ii} = \hat{A}_{ii}(x_{i\delta}, x_{ii}) = \xi_p(p_{i\delta}, p_{ii})(f(w_{\min}) - p_{ii} w_{\min} + \xi_w(w_{i\delta}, w_{ii})), \quad (5)$$

де функції $\xi_p(p_{i\delta}, p_{ii})$, $\xi_w(w_{i\delta}, w_{ii})$ визначаються відповідно формулами (6) та (7):

$$\xi_p(p_{i\delta}, p_{ii}) = 1, \text{ якщо } p_{i\delta} = p_{ii}, \text{ і } 0, \text{ якщо } p_{i\delta} \neq p_{ii} \quad (6)$$

$$\xi_w(w_{i\delta}, w_{ii}) = \varepsilon, \text{ якщо } w_{i\delta} = w_{ii}, \text{ і } 0, \text{ якщо } w_{i\delta} \neq w_{ii} \quad (7)$$

Вектори $x_{i\delta}^0$ та x_{ii}^0 будуть відповідати ситуації рівноваги по Курно-Нешу, якщо для них справедливі співвідношення (8):

$$x_{i\delta}^0, x_{ii}^0 \in X, B_{i\delta}(x_{i\delta}^0, x_{ii}^0) = \max\{B_{i\delta}(x_{i\delta}, x_{ii}^0) \mid x_{i\delta} \in X\}, B_{ii}(x_{i\delta}^0, x_{ii}^0) = \max\{B_{ii}(x_{i\delta}^0, x_{ii}) \mid x_{ii} \in X\}. \quad (8)$$

Неважко бачити, що в розглянутій грі існує, і притім, єдина ситуація рівноваги $x_{i\delta}^0 = x_{ii}^0 = x^* = (p^*, w^*)$. Дійсно, якщо $p_{i\delta} \neq p^*$ або $p_{ii} \neq p^*$, то відповідно продавець або покупець отримують мінімальний вигравш, що дорівнює 0. Якщо $w_{i\delta} \neq w^*$ або $w_{ii} \neq w^*$, то вигрaші продавця й покупця відповідно задовольняють співвідношенням (9):

$$p^* w_{i\delta} - \varphi(w_{i\delta}) \leq p^* w^* - \varphi(w^*), f(w_{i\delta}) - p^* w_{i\delta} \leq f(w^*) - p^* w^*$$

$$\text{для всіх } w_{i\delta}, w_{ip} \in (0; w^{\max}]. \quad (9)$$

Варіанти угод у ситуаціях рівноваги на одиничних інтервалах часу приймаються сторонами як їхні погодинні угоди $x_t^{i\delta} = (p_t^{i\delta}, w_t^{i\delta})$ ($t = 1, 2, \dots, T$). Неважко побачити, що при узгоджених цінах $p_t^{i\delta}$ ($t = 1, 2, \dots, T$) максимуми загальних виграшів продавця й покупця досягаються при погодинних обсягах угод w_t ($t = 1, 2, \dots, T$), які співпадають з обсягами $w_t^{i\delta}$ ($t = 1, 2, \dots, T$) у погодинних ситуаціях рівноваги:

$$\sum_{t=1}^T (f_t(w_t^{i\delta}) - \delta_t^{i\delta} w_t^{i\delta}) = \max \sum_{t=1}^T (f_t(w_t) - \delta_t^{i\delta} w_t),$$

$$\sum_{t=1}^T (\delta_t^{i\delta} w_t^{i\delta} - \varphi(w_t^{i\delta})) = \max \sum_{t=1}^T (\delta_t^{i\delta} w_t - \varphi(w_t)).$$

При цьому в умовах цін $p_t^{i\delta}$ ($t = 1, 2, \dots, T$) максимально можливу величину становить і сума виграшів продавця й покупця.

Реалізація ефективних рівноважних параметрів (цін й обсягів) купівлі-продажу електроенергії на ринку в цілому здійснюється в ході проведення безлічі локальних торгів між продавцями й покупцями. При цьому прогнозовані погодинні ринкові ціни $p_t^{i\delta}$ ($t = 1, 2, \dots, T$) і очікувані обсяги $w_t^{i\delta}$ ($t = 1, 2, \dots, T$) угод на ринку в цілому становлять інформаційну основу для формування учасниками локальних торгів стратегій їхніх переговорів. Питання формування ефективних стратегій поведінки продавців і покупців у локальних торгах на електроенергетичному ринку розглянуті автором в роботі [2].

Висновки

Наявність властивості ефективності у цін та обсягів купівлі-продажу електроенергії в ситуації ринкової рівноваги означає, що вони однаковим чином відбивають інтереси сторін угод. Тому перехід до механізму двосторонніх контрактів на електроенергетичному ринку дозволить учасникам ринку оптимізувати ціни та обсяги виробництва-споживання електроенергії, а, отже, і надасть можливість більш обґрунтовано приймати рішення щодо нарощування або скорочення потужностей електроенергетичної галузі. Подальші дослідження будуть присвячені аналізу впливу різних макроекономічних факторів на ринкові ціни, обсяги генерації й споживання електроенергії.

ЛІТЕРАТУРА

1. Оптимальность по Парето [Электронный ресурс]/ Википедия. Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org>.
2. Ходак М.И. Эффективные стратегии продавцов и покупателей электроэнергетических ресурсов на рынка с двусторонними контрактами// Анализ, моделирование, управление, развитие экономических систем: Научные труды III Международной школы-симпозиума АМУР-2009. – Симферополь, 2009 – с. 309–314.

Надійшла 08.11.2010