

ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ДОСЛІДЖЕННЯ СОЦІАЛЬНО-ЕКОНОМІЧНИХ ПРОБЛЕМ

УДК 519.8

В.М. Горбачук

Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова, м. Київ

ОРГАНІЗАЦІЯ НЕПОВНИХ ПОЄДНАНИХ ЕНЕРГОРИНКІВ

У статті розглядаються питання сучасної організації Європейського електроринку, що складається з неповних поєднаних ринків генерації та передачі енергії.

Ключові слова: європейський електроринок, неповні ринки, поєднані ринки, генерація, передача, узагальнена рівновага Неша.

В статье рассматриваются вопросы современной организации Европейского электрорынка, состоящего из неполных соединенных рынков генерации и передачи энергии.

Ключевые слова: европейский электрорынок, неполные рынки, соединенные рынки, генерация, передача, обобщенное равновесие Нэша.

The article is discussing the issues of modern organization of European electricity market consisting of incomplete linked markets of generation and transmission.

Key words: european electricity market, incomplete markets, linked markets, generation, transmission, generalized Nash equilibrium.

Перехід від централізованої планової економіки до децентралізованої ринкової означає перехід до ринкових стимулів, зокрема прибутку [1].

Традиційне планування розширення генерації (generation expansion planning; GEP) комунальної послуги (комунального продукту) має на меті централізований пошук таких технологій, величини розширення, вибору місця та часу для будівництва нової потужності генеруючої установки, які мінімізують витрати і задовольняють плановий зростаючий попит. Внаслідок дерегуляції GEP має інші цілі: кожна (генеруюча) фірма, конкуруючи з іншими, здійснює свій інвестиційний план для максимізації свого прибутку [2].

Оскільки за дерегуляції відпадає потреба у традиційній гарантованій віддачі на інвестиції, то конкуруючі інвестори, прагнучи швидшої окупності своїх інвестицій, звужують горизонт планування. Конкуренція не створює повністю конкурентної структури у галузі надання комунальної послуги: оскільки галузь складається з певної кількості N фірм з існуючими технологіями, то дерегульована галузь матиме олігополістичну структуру. Чим довший горизонт планування T , тим більша вірогідність появи нової фірми у галузі.

Крім того, конкуренція веде до стратегічної взаємодії фірм, що планують розширення генерації: фірми мають вищі ризики і прагнуть швидших віддач, а рішення кожної фірми впливає на рішення і прибутки інших фірм.

Можна вважати, що фірми галузі виробляють однорідний продукт, який не зберігається, тобто всі обсяги виробленого продукту негайно продаються. Це стосується первинних продуктів конкурентних ринків генерації, енергії і пропускну здатності.

Ринкова ціна визначається через процес аукціону, що врівноважує пропозицію галузі та агрегований попит на однорідний продукт. Подібний процес характерний

для організованих ринків сільгосппродуктів, таких, як пшениця, кукурудза, рис. Дерегульоване GEP передбачає вибір обсягу розширення кожною фірмою. У галузях, де генерація визначається пулом, ціни визначаються після вибору обсягів. Прикладами пулу є колишній британський енергетичний пул (British Power Pool) і система енергобіржі незалежних системних операторів ISO/PX Каліфорнії (ISO означає independent system operator, а PX – power exchange). PX – це оператор, місія якого полягає в організації та економічному управлінні ринком електрики, а також в гарантуванні конкуренції між виробниками електрики.

Коли фірми обирають обсяги розширення неодноразово, то якась фірма має перевагу, що викривлює конкуренцію.

Двокрокове GEP, де на першому кроці визначається обсяг, а на другому – ціна, зводиться до олігополії Курно, де стратегіями є обсяги.

GEP включає рішення про будівництво нової установки в окремий момент часу при наявних технологічних можливостях з використанням вугільнопаливних, нафтопаливних, ядерних, газотурбінних блоків тощо.

Нехай єдина енергобіржа (ринок енергії; PE) сприяє купівлі та продажу енергії через аукціони. Крім того, є ринок в реальному часі (РРЧ), що збалансовує енергію, яка надходить в реальному часі через пропозиції енергії та переможні пропозиції резервів. Для простоти припустимо, що продаж енергії відбувається тільки через енергобіржу і немає двосторонніх угод на такий продаж між фірмами. Вважаємо, що існують довгострокові контракти на резерви, які забезпечуються незалежними системними операторами за наперед визначеною ціною.

Припускаємо, що будь-яка фірма $i = 1, \dots, N$, самостійно вибираючи свій рівень резерву потужності, спочатку пропонує всю свою нерезервну потужність на PE, а потім пропонує на РРЧ всю потужність, відхилену PE, разом з усім законтракованим резервом потужності. Коли фірми діють самостійно і конкурують між собою, то продають енергію за ціною, рівною граничним витратам (якщо дві фірми належать одному власнику, то вони не конкурують між собою). Наслідки аукціонів – врівноважуючі (clearing) ціни та плани обсягів виробництва кожною фірмою. Якщо цінова пропозиція фірми перемагає в аукціоні, то фірма дістає платежі за енергію за врівноважуючою ціною.

Виручка (revenue) фірми i складається з ринкових платежів $R_i(\vec{x}_c, \vec{x}_o)$ на PE та РРЧ, а також законтракованих платежів $P(X_o) \times x_{oi}$ за резерви, де: $0 \leq x_{oi}$ – рішення фірми i про резервування потужності; $\vec{x}_o = (x_{1o}, x_{2o}, \dots, x_{No})$ – вектор резервування потужності; $x_{oi} \leq x_{ci}$ – рішення фірми i про розширення потужності; $\vec{x}_c = (x_{1c}, x_{2c}, \dots, x_{Nc})$ – вектор розширення потужності; X_o – галузева пропозиція резерву потужності; $P(X_o)$ – ринкова ціна одиниці законтракованих резервів.

Ринкові платежі фірмі i становлять

$$R_i(\vec{x}_c, \vec{x}_o) = \sum_{t=1}^T MCP_t \times e_{ti} + \sum_{t=1}^T RTP_t \times r_{ti},$$

де MCP_t – паливна гранична вартість (marginal cost) на EP (у період t), яка за припущенням дорівнює ціні (price) продажу енергії;

$x_{ci} - x_{oi} \geq e_{ti}$ – зобов'язання виробництва енергії (energy) фірми i ;

RTP_t – паливна гранична вартість на ринку в реальному часі (real time);

$x_{ci} - x_{oi} \geq r_{ti}$ – виробництво в реальному часі фірми i .

Законтраковані платежі фірмі i за резерви становлять

$$P(X_o) \times x_{oi} = T \times (1 - p_i) \times ELDC_o(Y_o + X_o) \times a \times x_{oi},$$

де p_i – рівень вимушеного простою (outage) фірми i ;

$ELDC_o$ – крива тривалості еквівалентного навантаження (equivalent load duration curve) початкової (існуючої) системи;

Y_o – загальна потужність існуючої системи;

a – середня (average) по системі споживча вартість простою.

Витрати фірми i – це її експлуатаційні витрати $F_i(\bar{x}_c, \bar{x}_o)$, середньорічна вартість $C_i(x_{ci})$ капітальних (capital) інвестицій, втрати від простоїв

$$O_i(\bar{x}_c, \bar{x}_o) = \sum_{t=1}^T RTP_t \times p_i \times (e_{ti} + r_{ti}).$$

Тоді кожна фірма i максимізує по x_{ci} , x_{oi} свій прибуток

$$\pi_i(\bar{x}_c, \bar{x}_o) = R_i(\bar{x}_c, \bar{x}_o) + P(X_o) \times x_{oi} - F_i(\bar{x}_c, \bar{x}_o) - C_i(x_{ci}) - O_i(\bar{x}_c, \bar{x}_o),$$

враховуючи також балансові обмеження на EP і РРЧ

$$\sum_{i=1}^N e_{ti} \leq L_t, \quad t = 1, \dots, T,$$

$$\sum_{i=1}^N r_{ti} \leq \sum_{i=1}^N p_i \times e_{ti}, \quad t = 1, \dots, T,$$

де L_t – навантаження (load).

Триває реструктуризація Європейського ринку електрики, в який поступово інтегрується Україна [3]. Інтеграція різних національних ринків через підхід так званого поєднання ринків (market coupling) на початок ХХІ сторіччя вважається найпередовішим ринковим планом. Якщо стандартний підхід США до реструктуризації спрямований на перетворення численних обмежень, що з'являються в електросистемі, у спеціально підібрані ринки, то підхід поєднання ринків істотно покладається на РЕ, залишаючи більшість цих обмежень на розсуд передавальних системних операторів. Передавальний системний оператор (transmission system operator; TSO) – це компанія, відповідальна за експлуатацію, збереження та розвиток передавальної системи для області управління та її вузлів (www.entso.org). Щоб брати до уваги обмеження електросистеми, TSO може застосовувати суміш ринків та розрахунки. У результаті ринок може не вказувати цін для деяких обмежень і тому бути неповним (incomplete).

При поєднанні ринків виникає проблема скупчення (congestion), яку можна усувати зустрічними продажами (counter-trading). Зустрічні продажі різними передавальними системними операторами на неповному ринку можна моделювати як узагальнену рівновагу Неша (generalized Nash equilibrium; GNE). Для пошуку GNE можна застосовувати квазіваріаційні нерівності (quasi-variational inequalities; QVIs), що узагальнюють варіаційні нерівності VIs (які відповідають рівновазі Неша NE).

NE описує рівновагу між агентами (гравцями), що взаємодіють через їхні виграші: дія одного агента впливає на виграш іншого агента. GNE враховує також взаємодію агентів через їхні множини стратегій: дія одного агента впливає на виграш і

множину допустимих дій іншого агента. Внаслідок законів Кірхофа дії одного TSO впливають на множину допустимих дій іншого TSO.

NE можна використовувати для аналізу ринкової влади, а також для ринків без ринкової влади, де гравці не впливають на ринкову ціну. NE для ринків без ринкової влади називають соціальною рівновагою Ерроу–Дебре [4; 5]. Соціальну рівновагу Ерроу–Дебре можна застосовувати для управління децентралізованим виробництвом, в якому кожна ділова одиниця (business unit; BU) має свій власний результат (виграш). Ці BU взаємодіють через їхні виграші, а також через спільні обмеження (на наявні ресурси чи обсяги виробництва). Оскільки такі взаємодії не визначаються виключно виробниками та споживачами продукту, то належать до зовнішніх ефектів. Зовнішні ефекти можуть як збільшувати суспільний добробут, так і зменшувати його. Хоча у теорії можна оптимізувати загальне виробництво, на практиці централізація операцій за такої оптимізації створює проблеми морального ризику [6], знижуючи стимули до ефективності окремих BU.

Процес децентралізації складається з 1) організації виробництва кожної BU й 2) організації внутрішніх ринків ресурсів для BU. Оскільки тоді кожна BU має стимул до росту своєї ефективності, то інтегровані операції BU разом збільшують ефективність загального виробництва продукту. Аналогічно ефективність загального виробництва має збільшуватися при створенні внутрішніх ринків для всіх спільних ресурсів BU. Такі ринки вводять обмеження у децентралізованій організації, подібні до спільних обмежень у декомпозиції Данцига–Вулфа. Водночас Нобелівський лауреат Вільямсон (2009 р.) зазначає, що участь BU у ринку має наслідком трансакційні витрати цієї BU. Тому при більшій децентралізації (і меншій координації) виникає питання про взаємообмін (trade-off) між зростанням ефективності за рахунок більших стимулів окремих BU і зниженням ефективності за рахунок трансакційних витрат BU.

Щоб відповісти на це питання, необхідно вирішити дві задачі: 1) знайти, якими видами діяльності мають займатися BU; 2) визначити, які ресурси такі BU мають купувати на внутрішньому ринку. Якщо на внутрішньому ринку ціна даного ресурсу однакова для всіх BU, то на інших ринках ціна іншого ресурсу може бути різною для різних BU. Такий ціновий арбітраж і похибка задачі 1) є джерелами неефективності, яку можна вимірювати [7].

Поняття GNE ввели Нобелівські лауреати Ерроу (1972 р.) і Дебре (1983 р.) [4; 5] для абстрактної економіки на основі поняття NE, яке ввів Нобелівський лауреат Неш (1994 р.) Лише наприкінці XX сторіччя GNE знайшла широке застосування в математиці, техніці, економіці. Олігополію на ринку електрики можна моделювати як GNE, де виробники обирають обсяги за Курно, а регулятори визначають ціни передачі [8]. Поведінку множинних лідерів і послідовників на ринку електрики можна моделювати як GNE. GNE можна узагальнювати як рівноважну задачу за рівноважних обмежень. GNE виникає, коли гравці поділяють спільний продукт (скажімо, в енергетичних, транспортних, телекомунікаційних мережах), який не має єдиної ринкової ціни. Тому GNE – це задача з поділеними обмеженнями. Оскільки для поділеного обмеження немає єдиної ціни, то ринок неповний, а кожному значенню ціни відповідає значення двоїстої змінної поділеного обмеження.

Для QVI характерна множинність розв'язків, серед яких є розв'язок потрібного VI. Розв'язки VI є тільки точками множини розв'язків QVI, коли двоїсті змінні поділених обмежень є однаковими для всіх гравців [9]. Як наслідок, розв'язування VI дає розв'язок QVI, але не дає інформації про решту розв'язків QVI. На відміну від задач VI, для задач GNE відомо лише кілька методів розв'язання [10].

Обмежена GNE узагальнює нормалізовану NE: нормалізована NE є GNE, де

множини поділених обмежень є (пропорційно) однаковими для всіх гравців. Для пошуку обмежених GNE запропоновано метод керованих штрафів, а для пошуку всіх GNE – методи цінової та ресурсної параметризації VI [7].

Алгоритм цінової параметризації має інтерпретацію для поєднання ринків та організації зустрічної торгівлі у реструктурованій Європейській електросистемі. У даний час відбувається поєднання ринків Франції, Бельгії, Нідерландів, яке далі поширюватиметься на Німеччину. Така ринкова організація основана на розмежуванні ринків енергії і передачі. У ринку енергії виділяють зони, кожна з яких контролює енергобіржа PX. Ці зони, взаємопов'язані лініями передач обмеженої місткості, утворюють спрощену сітку (grid). Беручи до уваги інформацію про ці взаємозв'язки між зонами, енергобіржі врівноважують ринки енергії, але результуючі потоки можуть не бути допустимими для реальної мережі.

Останнє змушує TSO перерозподіляти енергопотоки так, щоб усувати переповерхнення і досягати допустимості потоків. Діяльність таких TSO відома як зустрічна торгівля або передиспетчеризація. Витрати на перерозподіл залежать від міри координації різних TSO і зазвичай ці витрати стягують з виробників або споживачів енергії. Взаємодія між зонами, а також взаємодія між PX і TSO в межах зони є проблемою ієрархічного планування для управління виробництвом. Вважається, що спочатку PX координуються, а потім кожна PX діє як самостійна одиниця. TSO мають різні важелі в залежності від того, чи TSO координуються чи ні [11].

Виробникам та експортерам електроенергії України необхідно вести постійний моніторинг зовнішніх енергоринків.

Бібліографічні посилання і примітки

1. Горбачук В.М. Енергетичний сектор в економічній моделі України / В.М. Горбачук, А.О. Дроб'язко // Електроенергетика України: стратегія ефективності. – К.: Міжвідомча аналітично-консультативна рада з питань розвитку продуктивних сил і виробничих відносин; ACCELS, 2001. – С. 63-67.
2. Chuang A.S. A game-theoretic model for generation expansion planning: problem formulation and numerical comparisons / A.S. Chuang, F. Wu, P. Varaiya // IEEE transactions on power systems. – 2001. – November. – P. 885-891.
3. Борисенко А.В. Рівноважна модель вводу генеруючих потужностей в умовах недосконалої конкуренції / А.В. Борисенко, С.Є. Саух // Новини енергетики. – 2009. – № 12. – С. 23-29.
4. Debreu G. A social equilibrium existence theorem / G. Debreu // Proc. Nat. Acad. Sci. USA. – 1952. – October. – P. 886-893.
5. Arrow K.J. Existence of an equilibrium for a competitive economy / K.J. Arrow, G. Debreu // Econometrica. – 1954. – July. – P. 265-290.
6. Горбачук В.М. Методи індустріальної організації. Кейси та вправи. Економіка та організація виробництва. Економічна кібернетика. Економіка підприємства / В.М. Горбачук. – К.: А.С.К., 2010. – 224 с.
7. Nabetani K. Parametrized variational inequality approaches to generalized Nash equilibrium problems with shared constraints / K. Nabetani, P. Tseng, M. Fukushima // Computational optimization and applications. – 2009. – Vol. 48. – № 3. – P. 423-452.
8. Smeers Y. Spatial oligopolistic electricity models with Cournot generators and regulated transmission prices / Y. Smeers, Y.J. Wei // Operations research. – 1999. – January-February. – P. 102-112.
9. Harker P.T. Generalized Nash games and quasi-variational inequalities / P.T. Harker // European journal of operation research. – 1991. – September. – P. 81-94.
10. Facchinei F. Generalized Nash equilibrium problems / F. Facchinei, C. Kanzow // 4OR. – 2007. – Vol. 5. – № 3. – P. 173-210.
11. Generalized Nash equilibrium and market coupling in the European power system / Y. Smeers, G. Oggioni, E. Allevi, S. Schaible // CORE discussion paper 2010/52. – 2010. – 38 p.

Надійшла до редколегії 04.07.2011