

УДК 519.6

Моделі стратегічного розвитку генеруючих потужностей в умовах енергоринку

Борисенко А.В.

Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є.Пухова
alyaarg@ukr.net

Abstract

Borysenko A. Models of strategic power generation capacities development in electricity market conditions. The model of power generation capacities development in imperfectly competitive market is created. It is grounded separation of short- and long-term generators' decisions and market game type. Simultaneous problems solving is used for all the competitors' short- and long-term solution finding. It is represented conversion of the competitors' optimization problems into the systems of equities and inequalities, which can be solved with existing solvers.

Актуальність дослідження.

В українській електроенергетиці ринкові перетворення були розпочаті у 1995 році. На сьогодні функціонує система з єдиним покупцем електроенергії, конкуруючими генеруючими та регульованими розподільчими компаніями. Уряд задекларував плани щодо подальшого реформування ринку та продовження приватизації енергокомпаній.

Досвід країн Західної Європи та США показав, що в результаті реструктуризації та приватизації енергетики створюються великі компанії, здатні впливати на ринкові ціни та об'єми виробництва електроенергії, що є проявами роботи ринку в умовах недосконалої конкуренції.

Забезпечення економічного та надійного виробництва електроенергії в Україні вимагає проведення модернізації та заміни застарілого устаткування електростанцій. Актуальним завданням є створення моделей для обґрунтування розвитку генеруючих потужностей в умовах недосконалої конкуренції, здатних враховувати складність технологій та режимів експлуатації устаткування та особливості роботи енергетичного сектору України.

Моделювання ринку з досконалою та недосконалою конкуренцією.

Основним проявом недосконалої конкуренції на ринку є збільшення ціни вище рівня маржинальних витрат, тобто найбільших питомих витрат блоку із задіяних у виробництві електроенергії. Для аналізу досконалої та недосконалої конкуренції на ринку зазвичай використовуються ігрові моделі.

Модель досконалої конкуренції [1].

Для опису ринків з досконалою конкуренцією використовується модель

Бертрана, в якій передбачається, що жоден з виробників не може впливати на ціну ($p_j = p$):

Дохід фірми j :

$$R_j^{Bertrand} = p_j \cdot y_j = p \cdot y_j, \quad (1)$$

де y_j - об'єми виробництва фірми j ,

Маржинальний дохід:

$$MR_j^{Bertrand} = \partial(p \cdot y_j) / \partial y_j = p. \quad (2)$$

Модель недосконалої конкуренції.

Для характеристики поведінки виробників на ринку з недосконалою конкуренцією застосовується модель Курно.

В цій моделі виробники усвідомлюють, що зміна їх об'ємів виробництва впливає на ціну ($\partial p / \partial y_j \neq 0$), але припускають, що інші виробники не реагують на зміну їх об'ємів виробництва ($\partial y_{-j} / \partial y_j = 0$), де y_{-j} - об'єм поставок інших виробників.

За цих умов дохід фірми j визначається виразом:

$$R_j^{Cournot} = p(y) \cdot y_j = p(y_j + y_{-j}) \cdot y_j, \quad (3)$$

а маржинальний дохід:

$$MR_j^{Cournot} = \frac{\partial(p \cdot y_j)}{\partial y_j} = p + \frac{\partial p}{\partial y} \cdot \left(1 + \frac{\partial y_{-j}}{\partial y_j}\right) \cdot y_j, \quad (4)$$

$$= p + \frac{\partial p}{\partial y} \cdot (1 + 0) \cdot y_j = p + \frac{\partial p}{\partial y} \cdot y_j$$

де $p(y)$ - обернена функція попиту на електроенергію.

Задачі виробників електроенергії в ринкових умовах.

Особливістю роботи сектору виробництва електроенергії є взаємний вплив рішень виробників щодо об'ємів виробництва та введення нових потужностей [2].

При роботі в ринкових умовах виробники електроенергії паралельно приймають два основні типи рішень:

1. Визначення оптимальних цінових заявок для поточного ринку електроенергії, яке можна охарактеризувати як короткострокову статичну задачу. Подаючи на оптовий ринок цінові заявки виробники приймають участь у короткостроковій статичній грі, намагаючись збільшити свою частку на ринку та не допускаючи при цьому зайвого зниження ціни. Баланс на ринку досягається внаслідок зменшення ціни при зростанні пропозиції.

2. Вибір інвестиційних рішень, зважаючи на тривалі терміни експлуатації енергетичного устаткування, є довгостроковою динамічною задачею. Споруджуючи нові потужності, фірми приймають участь у довгостроковій динамічній грі, намагаючись покращити структуру своїх потужностей і не допустити при цьому введення надто великих потужностей на ринок. При заданому попиту на електроенергію зі зростанням потужностей прибутковість виробництва зменшується і, при певному рівні потужностей, подальше їх зростання стає збитковим.

Зазначені два рішення є взаємопов'язаними:

1. Об'єми введення нових електростанцій залежать від прибутковості діяльності фірми на оптовому ринку.

2. Прибутковість цінових заявок в свою чергу залежить від того наскільки інвестиційна політика забезпечує зростання ефективності та потужності устаткування компанії.

Слід зауважити, що при прийнятті рішень в ринкових умовах, виробникам необхідно не тільки аналізувати простір можливих власних стратегій, але і враховувати можливі стратегії конкурентів.

На практиці фірми не можуть враховувати всього можливого комплексу стратегій та їх взаємозв'язків, а фокусуються на найбільш важливих з них.

Очевидно, що електростанції введені сьогодні внаслідок тривалого періоду експлуатації впливатимуть на майбутні рішення на оптовому ринку. В свою чергу майбутня робота компанії на оптовому ринку впливатиме на ефективність поточних інвестиційних рішень.

В той же час можна припустити, що поточні рішення на оптовому ринку не впливають на майбутні інвестиційні рішення та аналогічно майбутні інвестиційні рішення не впливають на поточні цінові заявки.

Теоретично такий підхід обмежує поведінку виробників, не дозволяючи їм знижувати ціни для недопущення входу на ринок нових виробників. На практиці більш суттєві бар'єри для входження нових виробників створює обмеженість доступних площадок для будівництва та спроможність існуючих виробників значно скоротити інвестиції за

рахунок використання інфраструктури існуючих станцій.

Застосоване спрощення дозволяє розглядати статичні та динамічні задачі окремо.

Підхід аналогічний запропонованому вище застосовано у роботі [3].

Для розв'язку короткострокових та довгострокових задач виробників застосовано теорію досконалої рівноваги Маркова. Суть підходу полягає у тому, що можливий простір стратегій розвитку ринкового середовища описується марківським процесом, кожен зі станів якого характеризується потужностями конкуруючих фірм та ринковими умовами. Поділ задач на короткострокові та довгострокові дозволяє попередньо визначити стан короткострокової рівноваги для кожного зі станів процесу, а потім, за допомогою методів динамічного програмування, визначити стратегію оптимальну для кожного з конкурентів.

Вказана методика має суттєві недоліки пов'язані з використанням методів динамічного програмування. Внаслідок необхідності зменшення розмірності задачі виникає необхідність штучного укрупнення конкурентів, зменшення кількості технологій, що розглядаються, тощо. Слід відзначити що короткострокові моделі недосконалої конкуренції (наприклад модель Курно, що використана у роботі [3]) є винятково чутливими до кількості конкуруючих фірм.

В роботі [3] показано наявність рішення сукупної задачі. Внаслідок дискретності потужностей виробників можливі рівно ефективні стратегії. Для забезпечення унікальності рішення одному з виробників надається право першого кроку.

Використання наведеного підходу може бути доцільним при уточненні величин потужностей та черговості введення невеликої кількості електростанцій, попередньо визначених методами оптимізації що використовують неперервні змінні. Для подібного класу задач традиційно використовуються методи динамічного програмування [4].

Подолання недоліків моделі [3] можливе у разі спільного розв'язку статичних та динамічних задач всіх конкурентів. Розглянемо приклад реалізації подібної схеми.

Модель розвитку потужностей для ринків з недосконалою конкуренцією.

На практиці планування будівництва електростанцій здійснюється на тривалу перспективу – десятки років. Враховується конфігурація електричної мережі та особливості режимів роботи електростанцій. Визначення

перспектив розвитку для кожної з компаній здійснюється з урахуванням широкого спектру перспективних технологій, тощо.

Модель ринку з недосконалою конкуренцією включає умови:

- максимізації прибутку генеруючих компаній;
- максимізації послуг що надаються оператором мережі;
- максимізації прибутку арбітражних торгівців;
- досягнення рівноважного стану ринку.

Формулювання умов.

Розглянемо задачу планування розвитку генеруючих потужностей енергосистеми в умовах недосконалої конкуренції протягом планового періоду T , що складається з множини часових етапів $t \in T$.

Енергосистему складається з вузлів $i \in I$ з'єднаних електричними зв'язками $m \in M$, які мають обмежену потужність x_m^l .

У розробленій моделі для опису електричної мережі використовується спрощена модель, в якій втрати в мережі та реактивні потоки не враховуються, а для опису перетоків використовується система балансових співвідношень Кірхгофа аналогічна тій, що використовуються в теорії мереж постійного струму. Такий підхід дозволяє описати міжвузлові перетоки за допомогою фіктивного вузла (хаба), виходячи з припущення, що вся електроенергія вироблена у окремому вузлі направляється виробником в хаб, а вже звідти – у вузол споживання (p_{izt}^{rr} - ціна передачі електроенергії з вузла-хаба у вузол i). Плата за передачу по лінії береться тільки у випадку її перевантаження. При цьому потоки, які сприяють перевантаженню штрафуються, а потоки, що розвантажують лінію, преміюються.

Попит на електроенергію у вузлах представлено ступеневим графіком навантажень за тривалістю. Зони навантажень позначені $z = 1, \dots, Z$ та мають ширину H_{zt} .

Ціни у вузлах визначаються зворотними функціями попиту: $p_{izt} = a_{izt} - b_{izt} \cdot d_{izt}$,

де: a_{izt} та b_{izt} - постійні коефіцієнти, а попит у вузлі $d_{izt} = s_{izt}^{ar} + \sum_j s_{jizt}$ покривається поставками виробників s_{jizt} та арбітражного торгівця s_{izt}^{ar} .

На ринку представлені виробники $j \in J$, тип поведінки яких встановлюється за допомогою коефіцієнта C ($C = 0$ - конкурентна поведінка за Бертраном або $C = 1$ - стратегічно спрямована поведінка за Курно). Виробники вводять та експлуатують генеруючі потужності

$l \in L$ типів, яке має змінні витрати - c_{jil} та питомі капіталовкладення - k_{il} . Витрати на пуск енергоблоків при перспективному плануванні роботи електроенергетики не враховуються. В моделі виробники вважають, що не можуть впливати на ціноутворення при транспортуванні електроенергії.

Для забезпечення надійної роботи енергосистеми, в ній підтримується необхідний гарячий резерв (R - коефіцієнт гарячого резервування, як частина від обсягу загального її навантаження).

Постановка задачі.

Короткострокова задача розв'язується для кожної зони навантаження z прогнозного етапу t . Для спрощення запису короткострокової задачі індекси z та t в подальшому опустимо:

Модель поведінки генеруючої компанії.

Метою задачі для кожного з виробників $j \in J$ є максимізація поточного прибутку та визначення відповідних об'ємів виробництва y_{jil} , резервування потужностей r_{jil} та продажів електроенергії у вузлах системи s_{ji} , при цьому об'єми виробництва, резервування та продажів конкурентів (y_{-jil} , r_{-jil} , s_{-ji}) вважаються фіксованими, а виробничі потужності x_{jil} є зовнішніми змінними, які визначаються при розв'язку довгострокової задачі:

Прибуток компанії $j \in J$ від виробництва електроенергії можна записати у вигляді: (5)

$$\pi_j = \sum_{i \in I} \left((1-C) \cdot p_i + C \cdot \left(a_i - b_i \cdot \left(s_i^{ar} + \sum_{j \in J} s_{ji} \right) \right) \right) \cdot s_{ji} - \sum_{i \in I} \sum_{l \in L} c_{jil} \cdot y_{jil} - \sum_{i \in I} p_i^{rr} \cdot \sum_{l \in L} (s_{ji} - y_{jil})$$

$$\text{де: } \sum_{i \in I} \left((1-C) \cdot p_i + C \cdot \left(a_i - b_i \cdot \left(s_i^{ar} + \sum_{j \in J} s_{ji} \right) \right) \right) \cdot s_{ji}$$

- дохід фірми j від реалізації електроенергії у всіх вузлах системи;

$\sum_{i \in I} \sum_{l \in L} c_{jil} \cdot y_{jil}$ - змінні витрати фірми j на виробництво електроенергії;

$\sum_{i \in I} p_i^{rr} \cdot \sum_{l \in L} (s_{ji} - y_{jil})$ - витрати фірми j на транспортування електроенергії.

Розглянемо обмеження на поточну діяльність компаній та відповідні фіктивні змінні (вказані з права від обмежень в дужках):

– обмеження на обсяг виробництва електроенергії. Сума задіяної потужності устаткування та розмішеного на ньому гарячого резерву не повинна перевищувати наявної потужності устаткування:

$$y_{jiltz} + r_{jiltz} \leq x_{jil}, \forall j, i, l; \quad (\lambda_{jil}) \quad (6)$$

де: λ_{jiltz} - ціна обмеження максимальної потужності устаткування.

- обмеження на загальний об'єм гарячого резервування потужностей в енергосистемі. Сума резервних потужностей, розташованих, на всьому устаткуванні, повинна бути не меншою від необхідної для системи резервної потужності:

$$\sum_{j \in J} \sum_{i \in I} \sum_{l \in L} r_{jil} \geq R \cdot \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} s_{ji}; \quad (p^r) \quad (7)$$

де: p^r - плата за гарячий резерв.

- баланс об'ємів продажів та виробництва електроенергії для кожної компанії:

$$\sum_{i \in I} s_{ji} = \sum_{i \in I} \sum_{l \in L} y_{jil}, \forall j; \quad (\varphi_j) \quad (8)$$

де: φ_{jil} - ціна обмеження продажів компанії величиною власного виробництва.

- умови невід'ємності об'ємів виробництва, резервної потужності та поставок електроенергії:

$$y_{jil} \geq 0, \quad \forall j, i, l; \quad (9)$$

$$r_{jil} \geq 0, \quad \forall j, i, l; \quad (10)$$

$$s_{ji} \geq 0, \quad \forall j, i. \quad (11)$$

При проведенні практичних розрахунків до наведеної моделі поведінки виробників можуть бути додані обмеження щодо мінімальної потужності устаткування, умови щодо проходження добових мінімумів споживання, величин холодного резерву, тощо.

Модель поведінки на енергоринку оператора мережі.

Мета діяльності оператора полягає в досягненні максимального прибутку, який визначається цінами на передачу по лініях та відповідними об'ємами передачі:

$$\text{MAX} \sum_{i \in I} p_i^{tr} \cdot y_i^h \quad (12)$$

де: y_i^h - об'єм електроенергії, що передається оператором мережі з фіктивного вузла - хаба у вузол i .

Діяльність оператора мережі здійснюється в умовах обмежень на обсяги перетоків потужностей по лініях електропередачі.

Перетік по лінії m протягом етапу t у зоні навантаження z визначається надходженням електроенергії у вузлах мережі та коефіцієнтів потокорозподілу:

$$y_m^l = \sum_{i \in I} \gamma_{im} \cdot y_i^h, \quad \forall m. \quad (13)$$

де: γ_{im} - коефіцієнти чутливості змін потоків потужності в $m \in M$ лініях електропередачі до зміни обсягів надходження електроенергії у мережу з вузлів $i \in I$.

Перетік по лінії незалежно від напрямку не повинен перевищувати пропускну здатності лінії:

$$|y_m^l| \leq x_m^l \cdot (\lambda_m^-, \lambda_m^+) \quad (14)$$

де: $\lambda_{mtz}^-, \lambda_{mtz}^+$ - ціни обмеження максимальної потужності ЛЕП.

Модель поведінки на енергоринку арбітражного торговця. Мета його діяльності полягає в досягненні максимального прибутку:

$$\text{MAX} \sum_{i \in I} (p_i - p_i^{tr}) \cdot s_i^{ar}; \quad (15)$$

- баланс купівлі-продажу має вигляд:

$$\sum_{i \in I} s_i^{ar} = 0, \quad (p^h) \quad (16)$$

де: p^h - ціна електроенергії у хабі;

Умови узгодження змінних моделей агентів електроенергетичної системи. Узгодження змінних здійснюється за:

- ціновими показниками, що відповідають зворотним функціям попиту:

$$p_i = a_i - b_i \cdot \left(s_i^{ar} + \sum_{j \in J} s_{ji} \right), \quad \forall i; \quad (17)$$

- потоками потужностей у вузлах:

$$y_i^h = s_i^{ar} + \sum_{j \in J} \left(s_{ji} - \sum_{l \in L} y_{jil} \right), \quad \forall i. \quad (18)$$

Довгострокова задача.

Довгостроковою метою кожного з виробників є визначення об'ємів вводу генеруючих потужностей, які максимізують його прибуток. Потужність певного виду устаткування $x_{jilt} = x_{jil0} + \sum_{\tau=1}^t \Delta x_{jilt}$ визначається його потужністю на початок планового періоду x_{jil0} та введенням потужностей протягом наступних етапів планового періоду Δx_{jilt} .

Таким чином кожен з виробників визначає Δx_{jilt} , вважаючи показники конкурентів y_{-jiltz} , s_{-jiltz} , r_{-jiltz} , а також Δx_{-jilt} фіксованими та визначеними у результаті вирішення довгострокових задач конкурентів, а показники виробництва y_{jiltz} , r_{jiltz} , s_{jiltz} визначеними у результаті рішення короткострокової задачі.

Прибуток компанії $j \in J$ від виробництва електроенергії протягом етапу планування t можна записати у вигляді:

$$\pi_{jt} = n_t \cdot \sum_{z \in Z} (H_z \cdot \pi_{jzt}) - k_{jt} \cdot \Delta x_{jilt}, \quad (19)$$

де: $n_t \cdot \sum_{z \in Z} (H_z \cdot \pi_{jzt})$ - прибуток від

експлуатації устаткування у всіх вузлах системи у зоні навантаження z прогнозного етапу t ;

$k_{lt} \cdot \Delta x_{jilt}$ - інвестиційні витрати пов'язані зі збільшенням потужностей устаткування.

Прибутки отримані у різні роки планового періоду мають для компанії різну цінність. Для врахування зміни вартості грошей у часі та приведення всіх прибутків та витрат компаній до єдиного часу використовується коефіцієнт дисконтування $\delta < 1$, в результаті сукупний прибуток компанії $j \in J$ від виробництва електроенергії можна записати у вигляді:

$$\pi_j = \sum_t \delta^t \cdot \pi_{jt} \quad (20)$$

Теоретично планування діяльності роботи компанії необхідно проводити на безкінечному плановому періоді, але в міру віддалення прогнозного року невизначеність зовнішніх умов зростає, а вплив на сукупний результат знижується. Тому з практичних міркувань детальне планування діяльності компаній проводиться на обмеженому періоді. При проведенні практичних розрахунків необхідно враховувати, що частина устаткування, особливо введеного наприкінці планового періоду, буде приносити прибуток ще тривалий час після завершення прогнозного періоду.

В результаті мета діяльності кожної компанії ($\forall j \in J$) полягає в досягненні максимального прибутку, після підстановки 19 до 20 отримаємо:

$$\pi_j = \sum_{t=1}^T \delta^t \cdot \left(n_t \cdot \sum_{z \in Z} (H_z \cdot \pi_{jzt}) - k_{lt} \cdot \Delta x_{jilt} \right), \quad (21)$$

за умови обмеження виробничих потужностей:

$$y_{jiltz} + r_{jiltz} \leq x_{jil0} + \sum_{\tau=1}^t \Delta x_{jilt\tau}, \quad (\lambda_{jiltz}) \quad (22)$$

$\forall j, i, l, t, z.$

Визначення умов Куна-Куроша-Таккера (ККТ).

Спільний розв'язок короткострокових та довгострокових задач декількох виробників, пов'язаних багатьма змінними, є нетривіальним завданням, яке не може бути вирішене традиційними методами.

Для пошуку спільного розв'язку задач оптимізації з використанням ККТ замінюються рівностями та нерівностями.

Розглянемо стандартну задачу максимізації з обмеженнями у вигляді нерівностей та рівностей:

$$\max F(x, y) \quad (23)$$

$$\text{за умов: } G(x, y) = 0, H(x, y) \leq 0, x \geq 0. \quad (24)$$

Функція Лагранжа для даної задачі:

$$L(x, y) = F(x, y) - \mu \cdot G(x, y) - \lambda \cdot H(x, y), \quad (25)$$

де μ та λ є фіктивними змінними для обмежень G та H відповідно.

ККТ умови мають вигляд:

Для x :

$$\frac{\partial F}{\partial x} - \mu \cdot \frac{\partial G}{\partial x} - \lambda \cdot \frac{\partial H}{\partial x} \leq 0; x \geq 0; \quad (26)$$

$$x \cdot \left(\frac{\partial F}{\partial x} - \mu \cdot \frac{\partial G}{\partial x} - \lambda \cdot \frac{\partial H}{\partial x} \right) = 0.$$

Тобто умови для x виконуються в наступних випадках:

- при $\frac{\partial L}{\partial x} < 0$ та $x = 0$;
- при $x > 0$ та $\frac{\partial L}{\partial x} = 0$;
- при $x = 0$ та $\frac{\partial L}{\partial x} = 0$.

Наведені співвідношення для x також називаються умовами додатковості і можуть бути записані у вигляді:

$$0 \leq x \perp \left(\frac{\partial F}{\partial x} - \mu \cdot \frac{\partial G}{\partial x} - \lambda \cdot \frac{\partial H}{\partial x} \right) \leq 0.$$

Аналогічно:

Для y :

$$\frac{\partial F}{\partial y} - \mu \cdot \frac{\partial G}{\partial y} - \lambda \cdot \frac{\partial H}{\partial y} = 0. \quad (27)$$

Для μ :

$$G(x, y) = 0. \quad (28)$$

Для λ :

$$H(x, y) \leq 0; \lambda \geq 0; \lambda \cdot H(x, y) = 0. \quad (29)$$

Рівняння пов'язані з невід'ємністю змінних x та λ називаються умовами додатковості.

ККТ умови для багатовузлової багатоперіодичної задачі.

Короткострокова задача:

Модель генеруючої компанії:

Для короткострокової задачі максимізації 5-18 отримаємо функцію Лагранжа:

$$L_j = \sum_{i \in I} \left((1-C) \cdot p_i + C \cdot \left(a_i - b_i \cdot \left(s_i^{ar} + \sum_{j \in J} s_{ji} \right) \right) \right) \cdot s_{ji}$$

$$- \sum_{i \in I} \sum_{l \in L} c_{jil} \cdot y_{jil} - \sum_{i \in I} p_i^r \cdot \sum_{l \in L} (s_{ji} - y_{jil})$$

$$- \sum_{i \in I} \sum_{l \in L} \lambda_{jil} \cdot (y_{jil} + r_{jil} - x_{jil})$$

$$- p^r \cdot \left(R \cdot \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} s_{ji} - \sum_{j \in F} \sum_{i \in I} \sum_{l \in L} r_{jil} \right)$$

$$- \varphi_j \cdot \left(\sum_{i \in I} s_{ji} - \sum_{i \in I} \sum_{l \in L} y_{jil} \right)$$

$\forall j \quad (30)$

При вирішенні короткострокової задачі кожен з виробників визначає y_{jil} , r_{jil} , λ_{jil} , s_{ji} , φ_j , p^r , p , p_i^r , p^h , λ_m^- та λ_m^+ вважаючи змінні y_{-jil} , r_{-jil} , s_{-ji} , які характеризують роботу конкурентів, фіксованими, а величини змінних x_{jil} - визначеними у результаті розв'язку довгострокової задачі. В результаті маємо наступні ККТ умови для короткострокової задачі:

- для кожного y_{jil} :

$$0 \leq y_{jil} \perp -c_{jil} + p_i^r - \lambda_{jil} + \varphi_j \leq 0, \quad \forall j, i, l \quad (31)$$

- для кожного r_{jil} :

$$0 \leq r_{jil} \perp p^r - \lambda_{jil} \leq 0, \forall j, i, l \quad (32)$$

– для кожного λ_{jil} :

$$0 \leq \lambda_{jil} \perp y_{jil} + r_{jil} - x_{jil} \leq 0, \forall j, i, l \quad (33)$$

– для кожного s_{ji} :

$$0 \leq s_{ji} \perp p_i - C \cdot b_i \cdot s_{ji} - p_i^{rr} - \varphi_j - p^r \cdot R \leq 0, \forall j, i \quad (34)$$

– для кожного φ_j :

$$\sum_{i \in I} s_{ji} - \sum_{i \in I} \sum_{l \in L} y_{jil} = 0, \forall j \quad (35)$$

– для pr :

$$0 \leq p^r \perp R \cdot \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} s_{ji} - \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} \sum_{l \in L} r_{jil} \leq 0. \quad (36)$$

Модель оператора мережі:

– для кожного y_i^h :

$$p_i^{rr} + \sum_{m \in M} \gamma_m \cdot (\lambda_m^- - \lambda_m^+) = 0, \forall i \quad (37)$$

– для кожного λ_m^+ :

$$0 \leq \lambda_m^+ \perp \sum_{i \in I} (\gamma_{mi} \cdot y_i^h) - x_m^l \leq 0, \forall m \quad (38)$$

– для кожного λ_m^- :

$$0 \leq \lambda_m^- \perp -\sum_{i \in I} (\gamma_{mi} \cdot y_i^h) - x_m^l \leq 0, \forall m \quad (39)$$

Модель арбітражного торговця:

– для кожного s_i^{ar} :

$$p_i - p_i^{rr} - p^h = 0, \forall i \quad (40)$$

– для p^h :

$$\sum_{i \in I} s_i^{ar} = 0. \quad (41)$$

Клірингові умови ринку:

– для кожного p_i :

$$p_i - a_i + b_i \cdot \left(s_i^{ar} + \sum_{j \in J} s_{ji} \right) = 0, \forall i \quad (42)$$

– для кожного ptr_i :

$$y_i^h - s_i^{ar} - \sum_{j \in J} \left(s_{ji} - \sum_{l \in L} y_{jil} \right) = 0, \forall i \quad (43)$$

Довгострокова задача:

Для довгострокової задачі максимізації 21-22 отримаємо функцію Лагранжа - (44).

При розв'язку довгострокової задачі кожен з виробників визначає Δx_{jilt} , вважаючи показники конкурентів y_{-jilt} , s_{-jilt} , r_{-jilt} , а також Δx_{-jilt} фіксованими та визначеними у результаті вирішення довгострокових задач конкурентів, а показники виробництва y_{jilt} , r_{jilt} , λ_{jilt} , s_{jilt} , φ_{jilt} , p_{it}^r , p_{it} , p_{it}^{rr} , p_{it}^h , λ_{mz}^- та

λ_{mz}^+ визначеними у результаті рішення короткострокових задач.

$$L_j = \sum_{t=1}^T \delta^t n_t \left(\sum_{z \in Z} H_z \left(\begin{array}{l} \left((1-C) \cdot p_{itz} \right. \right. \\ \left. \left. + C \left(a_{itz} - b_{itz} \left(\sum_{j \in J} s_{jiltz} \right) \right) \right) \right) s_{jiltz} \right. \\ - \sum_{i \in I} \sum_{l \in L} c_{jilt} \cdot y_{jiltz} \\ - \sum_{i \in I} p_{itz}^{rr} \cdot \sum_{l \in L} (s_{jiltz} - y_{jiltz}) \\ - \sum_{i \in I} \sum_{l \in L} \lambda_{jiltz} \cdot \left(\begin{array}{l} y_{jiltz} + r_{jiltz} \\ - x_{jilt} - \sum_{\tau=1}^t \Delta x_{jilt\tau} \end{array} \right) \\ \left. - \sum_{t=1}^T \delta^t \cdot k_{it} \cdot \Delta x_{jilt} \right) \quad (44)$$

В результаті для кожного Δx_{jilt} :

$$0 \leq \Delta x_{jilt} \perp \left(\sum_{\tau=1}^T \left(\delta^\tau \cdot n_\tau \cdot \sum_{z \in Z} (H_z \cdot \lambda_{jiltz}) \right) - \delta^t \cdot k_{it} \right) \leq 0, \forall j, i, l, t \quad (45)$$

В результаті з використанням ККТ умов задачу багатокритеріальної оптимізації (5-18, 21-22) замінено системою рівностей та нерівностей (31-43, 45).

Отримана задача характеризується як змішана задача додатковості [5]. Безпосередній розв'язок подібних задач можливий з використанням програмних засобів MILES и PATH, інтегрованих до складу математичного пакету програм GAMS [6].

Таким чином створено модель розвитку генеруючих потужностей в умовах недосконалої конкуренції.

У запропонованій моделі на відміну від доступних в літературі аналогів [7-13] на основі аналізу роботи виробників в ринкових умовах обгрунтовано розділення коротко- та довгострокових задач роботи виробників та вибір типу ринкової гри. Подібний підхід використано у роботі [3].

Для подолання недоліків застосування теорії досконалої рівноваги Маркова [3], що вимагає штучного укрупнення конкурентів, зменшення кількості технологій, тощо, застосовано спільний розв'язок статичних та динамічних задач всіх конкурентів.

Представлено перехід від системи задач оптимізації до системи рівностей та нерівностей, які можуть бути розв'язані з використанням існуючих програмних засобів.

Висновки.

1. Задачі розвитку виробництва в потужних енергосистемах, повинні описувати діяльність декількох виробників, що експлуатують десятки електростанцій, враховувати обмеження з боку електричної мережі та діяльність оператора мережі, а також особливості правил роботи ринку, тощо.

2. Використання методики досконалої рівноваги Маркова для оптимізації структури генеруючих потужностей внаслідок використання динамічного програмування не дозволяє розв'язувати задачі високої розмірності і може бути рекомендоване для уточнення рішень з урахуванням дискретності потужностей устаткування.

3. Задача розвитку виробництва електроенергії в умовах недосконалої конкуренції для виробника електроенергії може бути представлена у вигляді системи короткострокових задач виду 5-18 та довгострокової задачі 21-22.

4. Ефективний розв'язок задач можливий шляхом приведення системи короткострокових та довгострокових задач учасників ринку з використанням умов Куна-Куроша-Таккера до однієї змішаної задачі додатковості.

Література.

1. Day C.J., Hobbs B.F., Pang J.-S.. Oligopolistic Competition in Power Networks: A Conjectured Supply Function Approach. // IEEE Transactions on Power Systems, Vol.17, №3, 2002. – p.597–607.

2. Борисенко А.В. Особенности учета динамических связей при оптимизации структуры мощностей и режимов работы электростанций. В кн: Сборник трудов конференции Моделирование – Киев: ИПМЭ им. Г.Е.Пухова, 16 – 18 мая 2006, с.125-131.

3. Bushnell J., Ishii J.. An Equilibrium Model of Investment in Restructured Electricity Markets. // Center for the Study of Energy Markets (CSEM) Working Paper 164, January 2007. - 38 p.

4. Беляев Л.С., Войцеховская Г.Б., Савельев В.А. и др. Системный подход при управлении развитием электроэнергетики. – Новосибирск: Наука, 1980. – 379 с., ил.

5. Billups S.C., Murty K.G.. Complementarity problems. // Journal of Computational and Applied Mathematics, Vol. 124, № 1-2, 2000. - p.303-318.

6. GAMS. The Solver Manuals. - GAMS Development Corporation, 2004, 428 p.

7. Wei J.-Y., Smeers Y.. Spatial Oligopolistic Electricity Models with Cournot Generators and Regulated Transmission Prices. // Operations Research, Vol. 47, № 1, 1999. – p.102–112.

8. Chuang A., Wu F., Varaiya P.. A Game-Theoretic Model for Generation Expansion Planning: Problem Formulation and Numerical Comparisons. // IEEE Transaction Systems on Power Systems, Vol.16, № 4, 2001. - p.885-890.

9. Linares P., Santos F.J., Ventosa M., Lapedra L.. Incorporating oligopoly, CO2 emissions trading and green certificates into a power generation expansion model. // Automatica, Vol.44, №6, 2008. – p. 1608-1620

10. Pineau P.-O. Electricity market reforms: Industrial developments, investment dynamics and game modeling. Ph.D. Thesis. - École des hautes études commerciales, 2000, 199 p.

11. Gilotte L., Finon D. Oligopolistic game around capacity expansion in liberalised electricity industries: the case of the French market. // European Colloquium of the International Association of Energy Economists (IAEE) "Energy markets in transition", Bergen, 26-27 August 2005. – 18p.

12. Schulkin J.Z., Hobbs B.F., Pang J.-S.. Long-Run Equilibrium Modeling of Alternative Emissions Allowance Allocation Systems in Electric Power Markets. // Cambridge Working Papers in Economics 0748, Faculty of Economics, University of Cambridge, September 2007. - 27 p..

13. Cate A., Lijesen A.M.. The Elmar model: output and capacity in imperfectly competitive electricity markets. Workshop "Market modelling of the Central Western European Electricity Market", 15-16 September 2005, 22 p.

Надійшла до редколегії 10.03.2009