

# ОПТИМІЗАЦІЯ РОЗВИТКУ ТА УПРАВЛІННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯМ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

УДК 620.9

**О.О. РУБАН-МАКСИМЕЦЬ**

Інститут загальної енергетики НАН України, м. Київ

## ОПТИМІЗАЦІЙНІ МОДЕЛІ ПРОГНОЗУВАННЯ ПОТРЕБИ В ЕНЕРГОРЕСУРСАХ НА ОСНОВІ СИНТЕЗУ МЕТОДІВ ФОРМУВАННЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО МІЖГАЛУЗЕВОГО ТА ПАЛИВНО-ЕНЕРГЕТИЧНОГО БАЛАНСІВ З УРАХУВАННЯМ ЕКОЛОГІЧНИХ ОБМЕЖЕНЬ

*Розглянуто проблему прогнозування попиту на паливно-енергетичні ресурси. Представлено загальні принципи побудови оптимізаційних моделей визначення перспективної потреби в енергоресурсах на базі міжгалузевих та паливно-енергетичних балансів з урахуванням екологічних обмежень. Наведено базову оптимізаційну модель прогнозування попиту на паливно-енергетичні ресурси.*

*Ключові слова:* міжгалузевий баланс, модель, паливно-енергетичні ресурси, паливно-енергетичний баланс, прогноз.

*Постановка проблеми.* Одна з головних і найскладніших проблем розвитку економіки України є проблема задоволення потреб країни паливно-енергетичними ресурсами (ПЕР) при їхньому максимально ефективному використанні. Розв'язання цієї проблеми потребує поглибленого аналізу ефективності використання палива, енергії, а також коректного науково обґрунтованого прогнозування перспективної потреби країни в енергоресурсах.

Дослідженню проблем прогнозування енергетичного забезпечення розвитку економіки присвячені численні роботи таких провідних учених як Геєць В.М., Кононов Ю.В., Криво-руцький Л.Д., Кулик М.М., Макаров О.О., Мелентьев Л.О., Некрасов О.С, Яременко Ю.В. та інших. Ними створені значні теоретичні та практичні основи системних досліджень розвитку економіки, енергетики, напрями підвищення ефективності використання ПЕР тощо. На основі цих напрацювань розроблені численні підходи до прогнозування, які на сьогодні стали традиційними і базуються на використанні алгоритму, який в узагальненому вигляді показано на рис. 1 [1, 2].

Ці підходи передбачали поетапне розв'язан-

ня завдання прогнозування розвитку систем енергозабезпечення країни. Спочатку розробляли прогноз розвитку економіки країни, потім послідовно визначали перспективну потребу економіки в ПЕР та формували варіант розвитку паливно-енергетичного комплексу (ПЕК). Такі підходи були цілком коректні для умов замкнутої економіки, коли енергетика була інфраструктурною галуззю та основним завданням прогнозування перспективної потреби в енергоресурсах було забезпечення покриття потреби економіки країни в ПЕР за мінімальних витрат без врахування зворотних зв'язків та сукупних національних екологічних обмежень.

У сучасних умовах господарювання метою прогнозування стає оцінка впливу різноманітних факторів (умов розвитку економіки, темпів зростання енергетичної ефективності, впровадження нових технологій в енергетиці та ін.) на формування прогнозу попиту на енергоресурси. Завдання прогнозування потреби в енергоресурсах також стикається з низкою труднощів, серед яких відкритість та нестабільність тенденцій розвитку національної економіки, глобалізація і лібералізація світової економіки, швидкі зміни кон'юнктури ринків, зокрема ринків палива і енергії, інтернаціоналізація

© О.О. РУБАН-МАКСИМЕЦЬ, 2010

екологічних вимог і обмежень та ін. Зазначені обставини значною мірою знижують ефективність застосування для розв'язання вказаного завдання традиційних методів прогнозування.

Тому успішне розв'язання завдання прогнозування перспективної потреби в ПЕР з урахуванням швидкого розвитку світових інтеграційних процесів потребує побудови такої моделі, яка б дозволяла враховувати взаємозв'язки між усіма галузями економіки та різні варіанти динаміки зазначених процесів.

Один з підходів до розв'язання означеного завдання є розроблений в рамках фундаментальних досліджень Інституту загальної енергетики НАН України підхід, що базується на моделях оптимізації, які ґрунтуються на синтезі методів формування перспективних міжгалузевих та паливно-енергетичних балансів з урахуванням екологічних обмежень [3, 4].

Основною метою даної статті є визначення базових принципів побудови оптимізаційних моделей прогнозування попиту на ПЕР на основі синтезу методів формування перспективного міжгалузевого та паливно-енергетичного балансів з урахуванням екологічних обмежень.

Енергетичну систему необхідно розглядати як єдину інтегровану виробничо-господарську структуру, що складається з автономних, у певній мірі, економічних підсистем, функціонування яких узгоджується між собою, також з динамікою розвитку економіки та враховує зміни ринкового середовища, обмеження екологічного та соціального характеру. Ефективність такої узгодженості не може бути досліджена на рівні окремої підсистеми, оскільки такі дослідження мають враховувати весь комплекс виробничих та економічних зв'язків на галузевому, міжгалузевому та макроекономічному рівнях.

Тому при розробці моделі прогнозування потреби в енергоресурсах було враховано можливість як її самостійного застосування, так і можливість її використання в рамках системи комплексного прогнозування розвитку енергетики як координуючої моделі [5, 6].

Базова математична модель складається з чотирьох блоків та функціоналу, показаних на рис. 2.

Розглянемо методичні засади запропонованого підходу. Головною особливістю запропонованого підходу є те, що він дозволяє досліджувати вплив на прогноз попиту на енергоре-

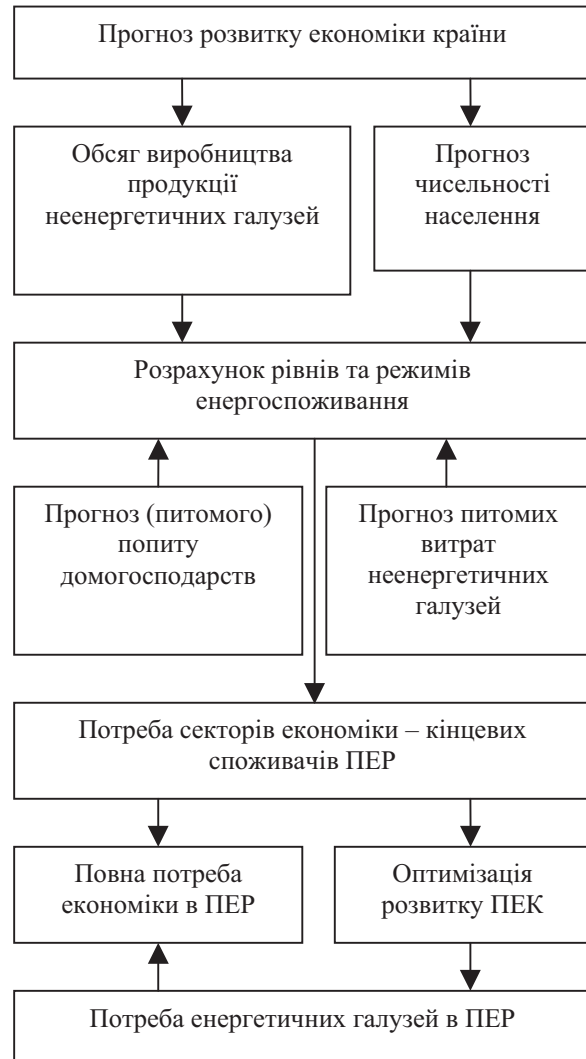


Рис. 1. Структурна схема алгоритму прогнозування потреби країни в ПЕР

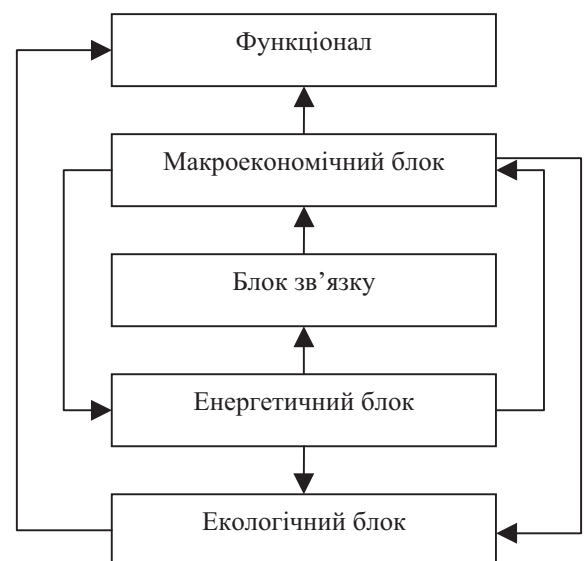


Рис. 2. Структурна схема базової математичної моделі

сурси різноманітних факторів (розвиток галузей економіки, ефективність використання ресурсів, потреба секторів кінцевого споживання в ПЕР, ефективність використання експорту, імпорту та власного виробництва, очікуваний рівень життя населення та ін.) шляхом можливості модифікацій базової моделі відповідно до завдань дослідження.

Математичні моделі, що використовуються для прогнозування, насамперед залежать від вхідної інформації, яка використовується для їхньої побудови. Крім цього, побудовані моделі можуть відрізнятися постановкою завдання та відповідно критерієм оптимізації і обмеженнями на змінні. Залежно від постановки задачі та вхідної інформації, при моделюванні на змінні можуть накладатися додаткові обмеження зверху, знизу, або двосторонні обмеження.

Однак для всіх модифікацій вірні загальні базові підходи до побудови, що використовуються в базовій моделі прогнозування попиту на ПЕР.

Отже, визначимо базову модель прогнозування перспективної потреби в енергоресурсах на основі зазначеного підходу та її принципи побудови. Введемо умовні позначення, *індекси*:  $f$  – режиму використання технології,  $f \in F$ ;  $i, m$  – галузей економіки,  $i, m \in I$ ;  $i'$  – енергетичної галузі економіки,  $i' \in I', I' \subset I$ ;  $i''$  – неенергетичної галузі економіки,  $i'' \in I'', I'' \subset I, I' \cap I'' = \emptyset$ ;  $j$  – енергоресурсу,  $j = 1$  – електроенергія,  $j = 2$  – тепло,  $j \in J$ ;  $k$  – технології,  $k \in K$ ;  $l$  – ітерації,  $l \in L$ ;  $p$  – забруднювача або парникового газу,  $p \in P$ ;  $r$  – джерела імпорту або експорту,  $r \in R$ ;  $t$  – часового періоду,  $t \in T$ ;  $t^{in}$  – часового періоду початку експлуатації технології.

*Змінні та константи:*

$a$  – коефіцієнт прямих матеріальних витрат;  $a'$  – коефіцієнт питомих матеріальних витрат;  $b$  – частка виробництва конкретної продукції в загальному обсязі виробництва технології;  $be$  – питомі викиди забруднювачів та парникових газів при енергетичному використанні у натуральному вимірі;  $bk$  – питомі технологічні викиди забруднювачів та парникових газів у натуральному вимірі;  $bN$  – питомі викиди забруднювачів та парникових газів при споживанні ПЕР населенням у натуральному вимірі;  $C$  – ціна за одиницю продукції, грн;  $d$  – коефіцієнт готовності технології;  $Exs$  – обсяг експорту у вартісних одиницях, грн;  $Expn$  – обсяг експорту у натуральному вимірі, т, т.у.п., м<sup>3</sup>;

$GDP$  – обсяг валового випуску продукції (ВВП) у вартісних одиницях, грн;  $H$  – час використання технології, год;  $Imc$  – обсяг імпорту у вартісних одиницях, грн;  $Imm$  – обсяг імпорту у натуральному вимірі, т, т.у.п., м<sup>3</sup>;  $Ksc$  – обсяг кінцевого споживання в вартісних одиницях, грн;  $Ksn$  – обсяг кінцевого споживання у натуральному вимірі, т, т.у.п., м<sup>3</sup>;  $n$  – коефіцієнт, що характеризує зростання ціни на ПЕР на шляху від виробника ПЕР до споживача, %;  $N$  – чисельність населення;  $On$  – обсяг викидів у натуральному вимірі, т;  $On^{low}$  – обсяг викидів, що описує різницю між нормативним та розрахованим рівнями викидів у випадку, коли нормативний обсяг перевищує розрахований обсяг викидів забруднювачів та парникових газів, у натуральному вимірі, т;  $On^{max}$  – нормативний обсяг викидів забруднювачів та парникових газів у натуральному вимірі, т;  $On^{up}$  – понаднормативний обсяг викидів забруднювачів та парникових газів у натуральному вимірі, т;  $q$  – частка втрат при транспортуванні та зберіганні ПЕР, %;  $T^{work}$  – термін експлуатації технології, рік;  $u$  – питомі витрати ПЕР;  $uN$  – питомий обсяг споживання ПЕР на одну особу;  $Wc$  – обсяг виробництва продукції у вартісних одиницях, грн;  $Wc^{GDP}$  – обсяг виробництва ВВП галуззю, у вартісних одиницях, грн;  $Xn$  – встановлена потужність існуючої технології у натуральному вимірі, кВт/год, т/год;  $Xn^{new}$  – встановлена потужність нової технології у натуральному вимірі, кВт/год, т/год;  $Xn^{old}$  – встановлена потужність технології, яка існувала в початковому періоді, що виводиться з роботи, у натуральному вимірі, кВт/год, т/год;  $Yn$  – потужність, що використовується технологією, у натуральному вимірі, кВт/год, т/год.

Критерієм для базової моделі є максимізація різниці ВВП та платежів за перевищення рівнів викидів на національному рівні, які визначаються міжнародними угодами

$$\sum_{t \in T} \sum_{i \in I} Wc_{it}^{GDP} - \sum_{t \in T} \sum_{p \in P} C_{pt} \cdot On_{pt}^{up} \rightarrow \max. \quad (1)$$

Цей новий критерій (1) враховує можливість перевищення крайною міжнародних екологічних зобов'язань при неефективній екологічній політиці.

*Макроекономічний блок.* У макроекономічному блоці процеси описуються з використанням підходів, що ґрунтуються на методах формування міжгалузевих балансів. Застосування

ітераційної процедури в блоці зумовлюється необхідністю визначення коефіцієнтів прямих матеріальних витрат та питомих обсягів споживання продукції, які можна визначити лише за наявності побудованого міжгалузевого балансу. На першій ітерації як початкові значення коефіцієнтів використовуються дані базового року, які надалі уточнюються в ході ітераційного процесу. Коли відхилення показників збігається до певного еталонного значення, ітераційний процес завершується.

Визначення обсягів виробництва продукції забезпечується шляхом застосування двох виразів (2), (3), які по-різному віддзеркалюють процес виробництва.

Баланс виробництва-споживання продукції галузей економіки через кінцеве використання продукції

$$Wc_{it}^l - \sum_{i \in I} a_{mit}^{(l-1)} \cdot Wc_{it}^l + \text{Im} n_{it}^l \cdot C_{it}^{(l-1)} - \text{Exn}_{it}^l \cdot C_{it}^{(l-1)} - Ksn_{it}^l \cdot C_{it}^{(l-1)} = 0. \quad (2)$$

Баланс виробництва-споживання продукції галузей економіки через вартісний склад випуску продукції кожної галузі

$$Wc_{it}^l - GDP_{it}^l - \sum_{i \in I} a_{mit}^{(l-1)} \times (Wc_{it}^l + \text{Im} c_{it}^l - \text{Exc}_{it}^l - Ksc_{it}^l) = 0. \quad (3)$$

*Блок зв'язку.* У блоці зв'язку макроекономічного та енергетичного блоків визначаються обсяги виробництва продукції для енергетичного та неенергетичного секторів, а також обсяги імпорту, експорту та кінцевого споживання для енергетичних секторів.

Виробництво продукції неенергетичних та енергетичних галузей моделюється у виразах (4), (5)

$$Wc_{i't}^l = \sum_{k \in K} \sum_{f \in F} Yn_{i'kft}^l \cdot H_{i'kft}^l, \quad (4)$$

$$Wc_{i't}^l = \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{f \in F} C_{i'jkft}^l \cdot (1 + n_{jt}^l) \beta_{i'jkft} \cdot Yn_{i'kft}^l \cdot H_{i'kft}^l. \quad (5)$$

Моделювання імпорту, експорту та кінцевого споживання енергетичних галузей економіки наведено у формулах (6), (7) та (8) відповідно:

$$\text{Im} c_{i't}^l = \sum_{j \in J} \sum_{r \in R_j} C_{i'jrt}^l \cdot \text{Im} n_{i'jrt}^l, \quad (6)$$

$$\text{Exc}_{i't}^l = \sum_{j \in J} \sum_{r \in R_j} C_{i'jrt}^l \cdot \text{Exn}_{i'jrt}^l, \quad (7)$$

$$Ksc_{i't}^l = \sum_{j \in J} C_{i'jt}^{(l-1)} \cdot uN_{i'jt}^l \cdot N_t^l. \quad (8)$$

*Енергетичний блок.* В енергетичному блоці використовуються методи формування перспективних паливно-енергетичних балансів. Баланс паливно-енергетичних ресурсів наведено у виразі (9)

$$\sum_{k \in K} \beta_{ijkft} \cdot \sum_{f \in F} Xn_{ijkft} \cdot H_{ijkft} + \sum_{r \in R_j} (1 - q_{ijt}) \text{Im} n_{ijrt} - \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} a_{mijkt} \cdot \sum_{f \in F} Xn_{ijkft} \cdot H_{ijkft} - \sum_{r \in R_j} \text{Exn}_{ijrt} - uN_{ijt} \cdot N_t = 0. \quad (9)$$

Рівняння зв'язку для урахування зміни потужності технологій в динаміці представлено формулою (10)

$$Xn_{kt} = Xn_{kt-1} + \lambda_{kt} \cdot Xn_{kt}^{new} - \mu_{kt} \cdot Xn_{kt}^{new} - Xn_{kt}^{old}, \quad (10)$$

$$\text{де } \lambda_{kt} = \begin{cases} 1, & t = t_k^{in}; \\ 0, & t \neq t_k^{in}; \end{cases} \quad \mu_{kt} = \begin{cases} 1, & t-1 < t_k^{in} + T_k^{work} \leq t \\ 0, & t_k^{in} + T_k^{work} > t \text{ або } t_k^{in} + T_k^{work} \leq t-1 \end{cases}$$

В енергетичному блоці використано спрощений підхід до урахування впливу попиту на теплову і електричну енергію та на необхідність спеціального резервування певних типів генеруючих потужностей, зокрема вітрових та сонячних електростанцій, враховуючи призначення моделі. Його розроблено разом з Б.А. Костюковським на основі підходів наведених у роботі [7] і передбачає:

1. Використання двох графіків: електричного і теплового навантаження для днів максимальних та мінімальних електричних навантажень.

2. Для кожного графіка формуються три баланси потужності для генерації електричної та теплової енергії, а саме:

- пікової зони за мінімальної можливості використання генеруючих потужностей, які необхідно спеціально резервувати;
- базової зони за мінімальної можливості використання генеруючих потужностей, які необхідно спеціально резервувати;
- базової зони за максимальної можливості використання генеруючих потужностей, які необхідно спеціально резервувати.

3. Рівняння зв'язку, що забезпечують використання однакової встановленої потужності електростанцій і спеціальні вимоги до резерву-

вання, та споживачів-регуляторів, які забезпечують заповнення зони нічного провалу.

Відповідні баланси та рівняння зв'язку входять до енергетичного блоку.

*Екологічний блок.* Екологічний блок забезпечує врахування екологічних обмежень та вимог. Моделювання обсягів викидів забруднювачів та парникових газів секторами економіки згідно виразу (11)

$$On_{ipt} = \sum_{k \in K} \left( bk_{ikpt} + \sum_{j \in J} u_{ijkt} \cdot be_{ijkpt} \right) \times \sum_{f \in F} Yn_{ijkft} \cdot H_{ijkft} \quad (11)$$

Урахування вимог до об'ємів викидів забруднювачів та парникових газів на рівні країни описано формулою (12)

$$\sum_{i \in I} On_{ipt} + N_t \cdot \sum_{j \in J} uN_{jt} \cdot bN_{jpt} - On_{pt}^{max} - \gamma_{pt} On_{pt}^{up} + \rho_{pt} \cdot On_{pt}^{low} = 0, \quad (12)$$

$$\text{де } \gamma_{pt} = \begin{cases} 0, & \sum_{i \in I} On_{ipt} + N_t \cdot \sum_{j \in J} uN_{jt} \cdot bN_{jpt} \leq On_{pt}^{max} \\ 1, & \sum_{i \in I} On_{ipt} + N_t \cdot \sum_{j \in J} uN_{jt} \cdot bN_{jpt} > On_{pt}^{max} \end{cases};$$

$$\rho_{pt} = \begin{cases} 1, & \sum_{i \in I} On_{ipt} + N_t \cdot \sum_{j \in J} uN_{jt} \cdot bN_{jpt} < On_{pt}^{max} \\ 0, & \sum_{i \in I} On_{ipt} + N_t \cdot \sum_{j \in J} uN_{jt} \cdot bN_{jpt} \geq On_{pt}^{max} \end{cases}.$$

*Загальні обмеження на змінні.* Виведення з роботи встановлених потужностей технологій, що існували в початковому періоді відбувається згідно виразу (13)

$$Xn_{kt}^{old} \leq Xn_{kt-1}^{old} \quad (13)$$

Потужність, що використовується технологією, описується формулою (14)

$$Yn_{kt} \leq d_k \cdot Xn_{kt} \quad (14)$$

Як зазначалось раніше, залежно від конкретної постановки задачі базова модель може модифікуватися за рахунок урахування додаткових обмежень, використання різноманітних критеріїв та відповідно до наявної вхідної інформації. Наведемо кілька прикладів таких модифікацій моделі.

Наприклад, якщо вхідною інформацією є обсяги виробництва в галузях економіки, тоді

модель формує такий прогноз повного енергоспоживання країни, за якого кінцеве споживання буде забезпечено за мінімізації витрат на енергозабезпечення за умови виконання екологічних обмежень.

Однією з можливих модифікацій базової моделі може бути модель, для якої вхідною інформацією є обсяги кінцевого споживання продукції, товарів та послуг. Також можуть накладатися обмеження на імпорт, експорт, обсяги викидів парникових газів. Критерієм такої моделі є максимізація ВВП.

У випадку, коли задано бажаний рівень ВВП, для побудови моделі використовується траєкторний підхід. Розрахований рівень ВВП визначається з міжгалузевого балансу як різниця між обсягами виробництва та проміжного споживання продукції. На країну накладаються міжнародні екологічні зобов'язання, тому модель має забезпечити таку динаміку зростання ВВП, яка буде їх враховувати. Критерієм такої математичної моделі може бути мінімізація різниці заданого бажаного та розрахованого в процесі моделювання рівнів ВВП.

## ВИСНОВКИ

Проблема прогнозування потреби України в енергоресурсах займає ключове місце з точки зору стійкого економічного зростання країни, розв'язання якої дозволить оцінити перспективи розвитку національних систем енергозабезпечення та сформувати на їхній основі довгострокову державну енергетичну політику України.

Традиційні підходи до прогнозування попиту країни на ПЕР вже не задовольняють сучасним умовам розвитку України, з урахуванням чого було розроблено новий підхід до прогнозування, який дозволяє враховувати вплив різноманітних факторів і базується на синтезі методів формування перспективного міжгалузевого та паливно-енергетичного балансів з урахуванням екологічних обмежень.

У рамках методичних засад запропонованого підходу наведена базова оптимізаційна модель прогнозування потреби в енергоресурсах та можливі напрями її трансформації залежно від постановки задачі, вхідної інформації та додаткових обмежень.

1. *Чернухин А.А., Флаксерман Ю.Н.* Экономика энергетики СССР. – М.: Энергия, 1980. – 344 с.
2. *Оптимизация* республиканского топливно-энергетического комплекса и его отраслевых систем / Кулик М.Н., Юфа А.И. и др. – К.: Наук. думка, 1992. – 216 с.
3. *Розроблення* теоретичних та методологічних основ і засобів прогнозування довгострокового розвитку паливно-енергетичного комплексу України в умовах ринкових та екологічних обмежень: звіт про НДР (заключний) / Інститут загальної енергетики НАН України. – № ДР 0104U006763. – К., 2006. – 335 с.
4. *Дослідження* методів та засобів прогнозування перспективного розвитку енергетики за умов лібералізації енергетичних ринків: звіт про НДР (заключний) / Інститут загальної енергетики НАН України. – № ДР 0107U000246. – К., 2009. – 250 с.
5. *Формування* узгоджених прогнозів розвитку економіки та енергетики з використанням оптимізаційних моделей / Костюковський Б.А., Максимець О.О., Шульженко С.В., Нечаєва Т.П. та ін. // Проблеми загальної енергетики. – 2008. – № 18. – С. 21–23.
6. *Теоретико-методологічні* основи прогнозування розвитку енергетики в умовах лібералізації та глобалізації мирової економіки та інтернаціоналізації екологічних обмежень / Костюковський Б.А., Рубан-Максимець Е.А., Сас Д.П., Парасюк М.В. // Проблеми загальної енергетики. – 2009. – № 19. – С. 31–38.
7. *Костюковський Б.А.* Моделювання розвитку структури генеруючих потужностей Об'єднаних електроенергетичних систем в умовах впровадження ринкових регулювань діяльності в електроенергетиці // Проблеми загальної енергетики. – 2007. – № 15. – С. 22–25.

Надійшла до редколегії: 31.05.2010