

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ І СИСТЕМ

УДК 004.942:622.68

О.В. СТОГНІЙ, канд. техн. наук, М.І. КАПЛІН, Т.Р. БІЛАН,
Інститут загальної енергетики НАН України, м. Київ

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ВРАХУВАННЯ ФАКТОРІВ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ В ЕКОНОМІКО-МАТЕМАТИЧНІЙ МОДЕЛІ ПАЛИВОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КРАЇНИ

Врахування вимог енергетичної безпеки здійснюється в моделі паливозабезпечення країни вже на етапі моделювання потоків та балансів палив. Обґрунтовано необхідність перерозподілу обсягів між країнами-експортерами та обмеження загальної величини імпорту відносно власного видобутку. Запропоновані методи врахування вимог енергетичної безпеки ґрунтуються на представленні факторів енергетичної безпеки у вигляді обмежень задачі лінійного програмування. Обмеження, утворені факторами енергетичної безпеки, виражено через змінні обсяги продуктів моделі виробничого типу, побудованої на основі поняття технологічного способу Канторовича.

Ключові слова: паливозабезпечення, фактори енергетичної безпеки, модель виробничого типу, технологічний спосіб.

Формування цілісної та замкненої системи показників (індикаторів) енергетичної безпеки має здійснюватися на основі виконання попереднього аналізу процесів, що відбуваються у сфері виробництва, постачання, розподілу та споживання енергоресурсів у країні, а також реальних та потенційних загроз енергетичній безпеці. Ці загрози мають розглядатися у контексті зниження рівня захищеності життєво важливих інтересів населення, підприємств, муніципальних утворень і регіонів країни в цілому на поточний момент і у прогнозованій перспективі. Такі індикатори можуть мати як кількісні, так і якісні характеристики з визначенням для кожного показника межових інтервалів зміни, в рамках яких вважається, що загрози енергетичній безпеці немає.

Сьогодні для оцінки стану енергетичної безпеки держави використовується «Методика розрахунку рівня економічної безпеки України», затверджена наказом Мінекономіки від 02.03.2007 р. № 60 [1]. Перелік наведених у ній показників енергетичної безпеки не повною мірою характеризує процеси, що відбуваються у сфері виробництва, постачання, роз-

поділу та споживання енергоресурсів у країні (зокрема, не враховує монополізації ринку енергетичних ресурсів, змін у формах власності підприємств ПЕК, можливостей взаємозаміщення паливно-енергетичних ресурсів тощо). Методикою також не передбачається оцінка зазначених процесів на рівні окремих галузей та регіонів України, а також можливості порівняння стану тенденцій, які відбуваються у сфері енергетичної безпеки України, з іншими країнами. Останній момент має особливе значення з огляду на те, що стан енергетичної безпеки здійснює винятковий вплив на конкурентоспроможність національної економіки та привабливість країни для іноземних інвесторів. Виходячи з цього необхідно переглянути існуючі індикатори енергетичної безпеки та сформувати новий їх перелік, який дозволить би більш повно характеризувати процеси, що відбуваються у вказаній сфері на національному, регіональному та галузевому рівнях і впливають на життя та добробут кожного громадянина України (соціальний та екологічний аспекти). Перелік індикаторів енергетичної безпеки доцільно поділити за функціональними ознаками на економічні, технічні, соціальні, екологічні, а їх аналіз проводити не тільки

© О.В. СТОГНІЙ, М.І. КАПЛІН, Т.Р. БІЛАН, 2012

на рівні країни, а й на рівні регіонів та окремих галузей ПЕК. Зазначене групування може виявитися умовним, проте воно дозволяє конкретизувати джерела необхідної інформації.

Граничні або порогові значення індикаторів мають визначатися з урахуванням поточної ситуації та прогнозних очікувань, враховуючи реальний стан національної економіки та можливий вплив зовнішніх чинників.

До складу індикаторів енергетичної безпеки, які визначаються станом системи паливозабезпечення, з наданого в [2] загального їх переліку, можуть бути вибрані такі:

1) енергоємність виробленої продукції, у кг у.п./грн – розраховується на галузевому та регіональному рівнях;

2) частка власних джерел у балансі паливно-енергетичних ресурсів (%) – розраховується на загальнодержавному та регіональному рівнях (місцеві енергоресурси);

3) частка імпорту палива з однієї країни (компанії) в загальному його обсязі (%) – розраховується на загальнодержавному рівні;

4) частка домінуючого енергоресурсу у виробництві теплової і електричної енергії (%) – розраховується на державному і регіональному рівнях;

5) частка домінуючого постачальника енергоресурсів у споживанні валових паливно-енергетичних ресурсів (%) – розраховується на загальнодержавному, регіональному та галузевому рівнях;

6) частка ТЕС, спроможних працювати на двох і більше взаємозамінних видах палива (%) – розраховується на загальнодержавному, регіональному та галузевому рівнях;

7) зношеність основних виробничих фондів підприємств ПЕК (%) – розраховується на загальнодержавному, регіональному та галузевому рівнях;

8) частка коштів загального доходу підприємств ПЕК, що виділяються на їх модернізацію та технологічне оновлення основних фондів – розраховується на загальнодержавному та галузевому рівнях;

9) забезпеченість резервними обсягами та ємностями для зберігання запасів паливно-енергетичних ресурсів (нафта, нафтопродукти, у тому числі мазут, газ, вугілля тощо), у добах – розраховується на загальнодержавному, регіональному та галузевому рівнях;

10) співвідношення використання підземних сховищ газу для задоволення внутрішніх та експортних потреб, % – розраховується на загальнодержавному рівні;

11) рівень завантаженості транзитних потужностей (нафто-, газо- та енерготранспортних систем), % – розраховується на загальнодержавному та галузевому рівнях;

12) рівень завантаженості основних виробничих потужностей підприємств ПЕК, % – розраховується на загальнодержавному та галузевому рівнях;

13) частка експорту продукції, віднесеної до категорії критичного імпорту, від загальних обсягів її виробництва на підприємствах ПЕК, % – розраховується на загальнодержавному та галузевому рівнях;

14) співвідношення сумарної встановленої потужності електростанцій із максимальним фактичним навантаженням в енергосистемі (резервування), % – розраховується на загальнодержавному рівні;

15) коефіцієнт корисної дії енергогенеруючих потужностей, % – розраховується на загальнодержавному та галузевому рівнях;

16) непродуктивні втрати при перетворенні, розподіленні та передачі енергії (окремо для всіх видів енергії), % – розраховується на загальнодержавному, регіональному та галузевому рівнях;

17) співвідношення інвестицій у підприємства ПЕК із вартістю їх основних виробничих фондів, %;

18) частка підприємств ПЕК у формуванні загальних обсягів викидів парникових газів, % – розраховується з розбивкою по нормативних та понаднормативних обсягах на загальнодержавному, регіональному та галузевому рівнях.

Вказаний перелік може доповнюватися іншими показниками, що визначаються галузевими особливостями споживання окремих видів палива.

Оцінка рівня енергетичної безпеки за допомогою різноманітних систем факторів енергетичної безпеки здійснюється, як правило, за відомими або наперед обчисленими параметрами стану енергетичного сектору держави. Таке застосування цих факторів дозволяє робити вибір оптимальних режимів функціонування енергетики, отримувати інформацію щодо можливості кризових станів у галузі, аварій

тощо. Подібне оцінювання розглядає множину параметрів стану енергетики як наперед відому вхідну інформацію, на основі якої виконуються оцінки.

Разом з тим для вироблення напрямків зміцнення енергетичної безпеки такої складної взаємозв'язаної системи, як енергетика, апостеріорне оцінювання не дає можливості вказати дійсно оптимальні шляхи підвищення рівня енергетичної захищеності економіки країни. Складність внутрішніх зв'язків у середині галузей енергетичного сектору породжує необхідність врахування безпекових факторів ще на етапі визначення оптимальних режимів функціонування його підсистем і всієї енергетики в цілому. Навіть локальні внутрішньогалузеві обмеження, які накладаються вимогами енергетичної безпеки, на параметри стану енергосистеми можуть викликати істотні наслідки у всіх інших її підгалузях. Особливо виразно такий вплив відчувається в системі забезпечення економіки паливними ресурсами. У цій стратегічній для кожної держави галузі постають питання джерел, напрямків постачання палив, їх задовільної якості для потреб споживачів, відповідності асортименту видів палива особливостям структури споживання. Вирішення цих питань має чітко виражену часову залежність, яка зумовлюється швидкими змінами світових ринків енергоносіїв, екологічними чинниками, вимогами підтримання в державі основних засад сталого розвитку.

Тому врахування необхідного рівня енергетичної безпеки має здійснюватись апіорі, безпосередньо під час вирішення задач оптимізації режимів функціонування, планування перспективних напрямків розвитку енергетичного сектору, кардинальних змін у структурі паливного балансу, викликаних природними, екологічними, геополітичними чинниками.

Деякі підходи до вирішення задачі врахування факторів енергетичної безпеки в оптимізаційних балансових моделях паливозабезпечення є предметом дослідження цієї роботи. Ці підходи засновані на постулюванні наявності базової системи обмежень на змінні потоки паливних продуктів деякої оптимізаційної моделі, а також множини факторів енергетичної безпеки, які підлягають врахуванню. В свою чергу, фактори енергетичної безпеки являють собою функції від характеристик стану системи паливозабезпечення. Ці характеристи-

ки в загальному випадку не співпадають з поточними змінними моделі. Тому метою даного дослідження є розробка внутрішньо-притаманих оптимізаційної моделі засобів додавання змінних характеристик факторів енергетичної безпеки до базової системи обмежень оптимізаційної задачі. Ця задача розв'язується нижче за допомогою розробленої авторами системи мережних аналогій оптимізаційних моделей виробничого типу. До складу цієї системи входять математичні моделі вузла та лінії абстрактної мережі постачання паливних продуктів, що описуються в термінах поточних змінних. Нижче наводяться способи зв'язування цих змінних з характеристиками факторів безпеки в додаткових обмеженнях оптимізаційної задачі. Вказані обмеження розглядаються у контексті згаданих мережних аналогій як додаткові елементи абстрактної мережі. Доведено, що залишаючись у межах цих аналогій можна повністю сформулювати обмеження енергетичної безпеки, що породжуються її обсяговими факторами.

Врахування факторів енергетичної безпеки в економіко-математичній моделі паливозабезпечення. Дослідження впливу факторів енергетичної безпеки на структуру паливозабезпечення галузей національної економіки передбачає таку модифікацію економіко-математичної моделі паливозабезпечення, щоб розв'язки відповідної задачі оптимізації структури паливозабезпечення за видами палива *автоматично* задовольняли умови постачання паливних ресурсів, які задаються *допустимими значеннями показників (індикаторів) енергетичної безпеки*.

Визначення показника енергетичної безпеки в загальному вигляді можна подати формулою

$$\beta_k = f_k(x_1, x_2, x_3, \dots, x_{N_k}), \quad (1)$$

де β_k – змінна величина k -го показника енергетичної безпеки, яка, наприклад, у нормалізованому виразі, знаходиться в інтервалі $[0, 1]$ і характеризує один із аспектів безпеки постачання енергоносіїв;

$x_i, i = \overline{1, N_k}$ – змінні параметри функціонування системи паливозабезпечення, що впливають на рівень безпеки постачання паливних ресурсів і від яких безпосередньо залежить k -й показник енергетичної безпеки згідно з його специфічним визначенням;

$f_k(x_1, x_2, x_3, \dots, x_{N_k})$ – специфічна для кожного показника функція параметрів системи паливозабезпечення, що визначає k -й показник енергетичної безпеки і залежить від параметрів.

З іншого боку, економіко-математична модель системи паливозабезпечення, що подається у вигляді абстрактної мережі паливозабезпечення, і розв’язок якої дає оптимальну структуру обсягів постачання енергоносіїв та відповідну цим обсягам систему цін, записується у вигляді

$$Y_{i, \text{вироб}} + \sum_{r \in \Omega_{i, \text{вх}}} Y_{ir, \text{вх}} - Y_{i, \Sigma} = 0, \quad i = 1, N_{\text{вузлів}}, \quad (2)$$

$$g_i Y_{i, \Sigma} - \sum_{r \in \Omega_{i, \text{вх}}} Y_{ir, \text{вх}} = Y_{i, \text{спожив}}, \quad i = 1, N_{\text{вузлів}}, \quad (3)$$

$$-Y_{ir, \text{вх}} \Big|_{r \in \Omega_{i, \text{вх}}} + g_r Y_{kr, \text{вх}} \Big|_{r \in \Omega_{k, \text{вх}}} = 0, \quad r = 1, N_{\text{ліній}}, \quad (4)$$

$$\Theta_i(\{Y_{i, \text{вироб}}\}, \{Y_{ir, \text{вх}}\}, \{Y_{ir, \text{вх}}\}, \{Y_{i, \Sigma}\}) = 0, \quad i = 1, N_{\text{ДП}}, \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^{N_{\text{вузлів}}} C_i \cdot Y_{i, \text{вироб}} + \frac{1}{2} \sum_{i,r=1}^{N_{\text{вузлів}}} C_{ir} \cdot Y_{ir, \text{вх}} \rightarrow \min, \quad (6)$$

де $Y_{i, \Sigma}$ – сумарний вхідний потік – надходження модельного паливного продукту, надалі продукту, у вузол i ;

$Y_{kr, \text{вх}}$ – вхідний потік продукту ребра r , потік продукту в ребрі r є вихідним для вузла k ;

$Y_{ir, \text{вх}}$ – вихідний потік продукту ребра r , в свою чергу, потік продукту в ребрі r є вхідним для вузла i ;

$Y_{i, \text{вироб}}$ – власний виробіток продукту у вузлі i ;

$Y_{i, \text{спожив}}$ – споживання продукту у вузлі i ;

$$g_i = 1 - \frac{\Delta Y_i}{Y_{i, \Sigma}}, \quad g_r = 1 - \frac{Y_{kr, \text{вх}} - Y_{ir, \text{вх}}}{Y_{kr, \text{вх}}} -$$

технологічні коефіцієнти техспособів вузла i ребра моделі виробничого типу мережі, відповідно.

Рівняння (2), (3) описують баланси потоків вузла i , а (4) – баланс ребра r мережної системи у форматі запису моделі виробничого типу. Рівняння (5), що утворюють додаткову підсистему цієї моделі, являють собою фізично та/або технологічно зумовлені зв’язки на змінні Y , записані у формі співвідношень з

нульовою правою частиною і позначаються в загальному вигляді $\Theta_l, l = 1, N_{\text{ДП}}$ де $N_{\text{ДП}}$ – розмірність додаткової підсистеми.

Визначення показника енергетичної безпеки (1) породжує рівняння для допустимої області в множині параметрів функціонування системи паливозабезпечення, від яких безпосередньо залежить цей показник:

$$\tilde{f}_k(x_1, x_2, x_3, \dots, x_{N_k}, \overline{\beta}_k) = 0. \quad (7)$$

Тут $\overline{\beta}_k$ – гранично-допустиме, порогове, наперед задане значення показника енергетичної безпеки, при перевищенні якого функціонування системи паливозабезпечення розглядається як таке, що містить загрозу енергетичної безпеки за показником k .

У свою чергу, параметри системи паливозабезпечення x_i , що входять до (7), як правило, можна виразити через змінні-продукти моделі паливозабезпечення Y_k :

$$x_i = \xi_i(\{Y_k\}, k = \overline{1, N_k}), \quad i = N_{\text{неб}}, \quad (8)$$

де $N_{\text{неб}}$ – кількість параметрів функціонування системи паливозабезпечення, від яких залежить вся множина показників енергетичної безпеки;

$\xi_i(\{Y_k\})$ – специфічна залежність параметра x_i показника енергетичної безпеки від змінних обсягів продуктів моделі паливозабезпечення.

Дописування співвідношень (7) та (8) до додаткової підсистеми моделі виробничого типу (5) забезпечує врахування показників енергетичної безпеки в модельних розрахунках оптимальної структури паливозабезпечення.

Пояснимо викладене вище на прикладі показника енергетичної безпеки «частка імпорту з одного джерела». Нехай в деякій системі показників він має індекс k . Цей показник виражається максимальним значенням відношення обсягу імпортування продукту з джерела i до сукупного обсягу імпорту, тобто у даному випадку:

$$\beta_k = \max_i \frac{Q_i}{Q_{\text{імп,}\Sigma}}. \quad (9)$$

Граничне значення даного показника у відсотковому виразі за даними міжнародних експертів не повинно перевищувати 30%, тобто $\overline{\beta}_k = 0,3$.

Врахування (9) в моделі (2)–(6) вимагає розрахувати значення $\frac{Q_i}{Q_{i,m,\Sigma}}$ для всіх джерел імпорту через обсяги потоків продуктів моделі Y_i і обмежити їх значення величиною β_k . У формулі (9) згідно з позначеннями (1) $x_1 = Q_i$; $x = Q_{i,m,\Sigma}$, тобто змінний параметр функціонування системи паливозабезпечення x_1 співпадає з обсягом імпортування продукту із джерела імпорту i , як змінною продукту моделі. Очевидно, що цей параметр обов'язково є змінною величиною оптимізаційної задачі (2) – (6) і входить до одного з її балансових рівнянь. Якщо розглядати імпорт як альтернативний варіант виробітку, то цим рівнянням буде одне з рівнянь (2). Тобто для змінної x_1 , від якої залежить значення показника «частка імпорту з одного джерела», $x_1 = Y_m = Q_i$ і тут ми вважаємо, що в загальній системі балансових рівнянь моделі індекс продукту імпорт з джерела i є m .

Параметр x_2 є сумою обсягів імпортування зі всіх джерел імпорту і *не обов'язково є змінною-продуктом моделі*, наприклад, достатньо деталізованої із диференційованим врахуванням джерел імпорту. У цьому випадку він має бути виражений через ці змінні. Якщо вважати, що всі обсяги імпорту із окремих джерел є продуктами, тобто для кожного i знайдеться таке s , що $Q_i = Y_s$, то

$$x_2 = \sum_{s=1}^{N_{di}} Y_s,$$

де N_{di} – число джерел імпорту моделі.

Це співвідношення є формулою зв'язку (8) між параметрами показників енергетичної безпеки та змінними-продуктами моделі, записаною для показника «частка імпорту з одного джерела», причому в даному випадку

$$\xi_i(\{Y_k\}) = \sum_{s=1}^{N_{di}} Y_s.$$

Остаточно, для врахування показника енергетичної безпеки, що розглядається в моделі паливозабезпечення, її додаткова підсистема (5) має бути доповнена рівняннями

$$\sum_{s=1}^{N_{di}} Y_s - x_2 = 0;$$

$$Y_s - 0,3 \cdot x_2 + e_s = 0, s = \overline{1, N_{di}},$$

де e_s – вирівнювальні змінні з нульовим коефіцієнтом у цільовій функції, які дають можливість показнику безпеки набувати значень в допустимому інтервалі $[0, \beta_k]$ (в даному випадку $[0, 0,3]$) залежно від інших умов, та коефіцієнтів цільової функції моделі.

Опишемо далі необхідне для врахування згаданих показників енергетичної безпеки розширення моделі в термінах її конструктивних елементів. До переліку продуктів моделі додається два продукти – основний продукт «сумарний обсяг імпортованого вугілля», а також допоміжний фіктивний, що містить частки підсумовуваних обсягів від окремих джерел імпорту. Виріток продукту «сумарний обсяг імпортованого вугілля» здійснюється групою технологічних способів, в кожному з яких споживається весь обсяг вугілля, імпортованого з окремого джерела, і виробляється відповідна цьому обсягу частка сумарного обсягу вугілля. Кількість таких техспособів дорівнює кількості джерел імпорту і кожен з них виробляє один і той самий фіктивний модельний продукт, який можна назвати «проміжний продукт підсумовування», або «продукт перетворення окремого продукту в сумарний». Розрахунок сумарного обсягу імпорту здійснюється у ще одному, наступному техспособі, де всі частки «проміжного продукту підсумовування», що відповідають окремим джерелам, споживаються, а основний продукт моделі – «сумарний обсяг імпортованого вугілля» – виробляється. Така група $(N_{di} + 1)$ технологічних способів називається підсумовувальною конструкцією. У даному випадку, можна говорити, що продуктом всієї підсумовувальної конструкції є «сумарний обсяг імпортованого вугілля», як похідна від первинних продуктів моделі величина, яка і є необхідним параметром показника енергетичної безпеки. В табл. 1, в якій подано модельні конструкції, що забезпечують врахування показника енергетичної безпеки «частка імпорту з одного джерела», підсумовувальна конструкція утворюється рядками 1–6 зображеного в таблиці фрагмента набору даних моделі.

Рядки 6–11 вміщують так звану розподільну конструкцію, яка здійснює розподілення сумарного обсягу імпортованого вугілля між чотирма змінними обсягами продуктів, які далі, наприклад, можуть споживатися в правій

Таблиця 1 – Модельні конструкції для врахування показника енергетичної безпеки «частка імпорту з одного джерела»

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	ПЧ
1	...	-1															
2	...			-1													
3	...		-1														
4	...				-1												
5		1	1	1	1	-1											
6						1	...	-1	-1	-1	-1						
7								1									v_1
8										1							v_2
9									1								v_3
10											1	...					v_4
11							...										
12			1					-1									0
13		1								-1							0
14					1				-1								0
15				1							-1						0
16						0.3		-1				1					0
17						0.3			-1				1				0
18						0.3				-1				1			0
19						0.3					-1				1		0
20						X_{max}											0
21						X_{Σ}											0
22						X_{min}											0

частині системи рівнянь балансу, в обсягах $v_1 - v_4$, стовпчик ПЧ у табл. 1. Якщо модель не передбачає безпосереднього споживання продуктів розподільної конструкції в заданих обсягах ($v_1 - v_4$), то існує можливість узгоджено перерозподілити ці обсяги, або пов'язати їх з величинами обсягів інших продуктів. Ця можливість забезпечується допоміжною підсистемою рівнянь моделі виробничого типу, приклад якої дається рядками 12–15 та 16–19 набору даних, наведеного в табл. 1. В силу рівнянь рядків 12–15 встановлюється рівність обсягів продуктів розподільної конструкції відповідним обсягам підсумовувальної конструкції, використаної для розрахунку в межах моделі, або, іншими словами, утворення нового модельно-

го продукту – «сумарного обсягу імпортованого вугілля», як необхідного для подальшого використання в моделі параметра показника енергетичної безпеки. Умова рівності обсягів розподільної конструкції обсягам підсумовувальної може накладатися з міркувань подальшого диференційованого використання в моделі продуктів імпорту з окремих джерел із збереженням первинних обсягів їх надходження. Особливого значення ця умова набуває тоді, коли йдеться про так звані *виділені ланцюги постачання палива*, що можуть мати місце в замкнених вертикально інтегрованих економічних структурах, переважно приватних, але обсяги паливозабезпечення яких з необхідністю мають бути враховані в показни-

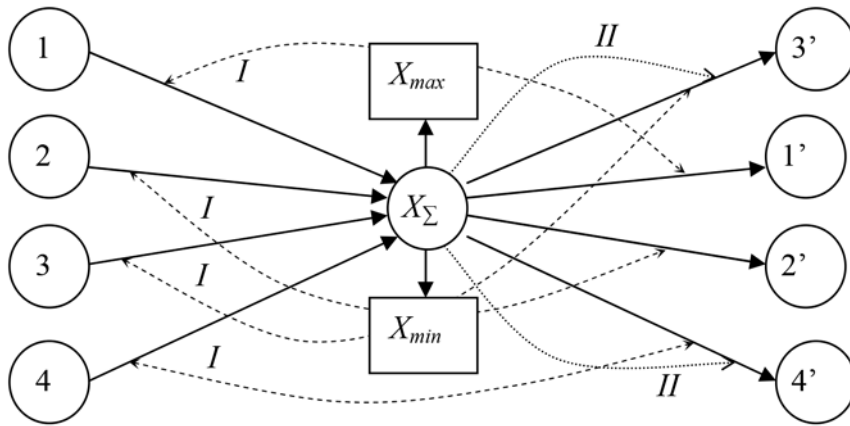


Рис. 1. Підсумовувальна та розподільна конструкції, модельні засоби зв'язування/пропорціонування змінних у термінах модельних абстракцій вузла і лінії мережного подання моделі паливозабезпечення виробничого типу

ках загальнодержавного значення, таких як показники енергетичної безпеки. Рівняння рядків 16–19 пов'язують сумарний обсяг імпорту із обсягами імпорту з окремого джерела і забезпечують порогове значення показника енергетичної безпеки «частка імпорту з одного джерела» на рівні 30%. Коефіцієнти +1 у стовпчиках 12–15 цих рядків є коефіцієнтами при ослаблювальних змінних, які перетворюють вихідні умови у вигляді нерівностей в рівняння. Коли значення ослаблювальної змінної в деякому оптимальному розв'язку моделі стає рівним нулеві, згаданий показник енергетичної безпеки досягає свого порогового рівня за обсягом імпорту з відповідного джерела. Таким чином, послідовне застосування підсумовувальної і розподільної конструкції моделі виробничого типу, разом із зв'язуванням необхідних змінних допоміжною системою рівнянь пропорціонування, дає можливість виключно модельними засобами сформулювати показники енергетичної безпеки в межах моделі виробничого типу, а також забезпечити знаходження їх значень у попередньо заданих допустимих інтервалах.

Зупинимось тепер на засобах автоматизації врахування показників енергетичної безпеки в наборах даних моделі паливозабезпечення країни. Як вже наголошувалося вище, в основі структури цієї моделі лежить поняття технологічного способу Канторовича, що забезпечує можливість безпосереднього розрахунку цін на

продукти за відомого оптимального розв'язку системи рівнянь балансу. Разом з тим специфічною властивістю даної моделі є побудова техспособів Канторовича для деякої абстрактної мережі, умови матеріального балансу якої співпадають з умовами балансу продуктів реальної системи паливозабезпечення. Основи цього підходу до моделювання системи постачання паливних ресурсів викладено в роботі [3], модель з аналогічною організацією структури для власне мережних систем наведена в

роботі [4], а систему рівнянь (2)–(5) якраз і записано для мережі, що опосередковує систему паливозабезпечення в економіко-математичній моделі виробничого типу, що будується на понятті технологічного способу.

Важливою для подальшого перевагою мережної аналогії в моделюванні є регулярна структура мережі, яку, як правило, описують в термінах теорії графів. Саме наявність регулярної структури дозволяє автоматизувати процес побудови технологічної матриці моделі виробничого типу за допомогою алгоритмів, розроблених в [4]. Ці алгоритми використовують запропоновані в [5] математичні моделі елементів графа мережі – ребра і лінії, для побудови техспособів Канторовича вказаних елементарних складових графа мережі. Утворена за допомогою цих алгоритмів технологічна матриця автоматично містить структурно вірні баланси відповідних продуктів у кожному рівнянні системи обмежень, а структура стовпчиків відповідає визначенню техспособу за Канторовичем.

Розглянемо тепер послідовність врахування показника енергетичної безпеки в термінах мережної абстракції системи паливозабезпечення. На рис. 1 обсяги імпортованого вугілля з окремих джерел зображено вузлами 1–4.

Згадана вище підсумовувальна конструкція, необхідна для розрахунку, або введення в модель, продукту «сумарний обсяг імпортованого вугілля» утворюється додаванням до графа абстрактної мережі нового вузла, позначеного на рис. 1

через X_{Σ} , та чотирьох ребер, які забезпечують надходження в цей вузол потоків обсягів вугілля з вузлів окремих джерел. Власне процедура підсумовування обсягів, як така, виконується в межах *математичної моделі вузла*, детально описаної в [5], і відображена в рівняннях вузла (2) і (3). Розподільна конструкція використовує спільно *математичні моделі вузла і лінії* [5].

Далі, для забезпечення рівності підсумовуваних обсягів, розподіленим в моделі, використано додаткові рівняння зв'язування обсягів. Ці рівняння належать до допоміжної підсистеми рівнянь моделі виробничого типу, а в мережному поданні цієї моделі вони означають рівність вхідних і вихідних потоків продукту у відповідних лініях мережі. На рис. 1 умови рівності цих потоків позначені пунктирними кривими *I*. Умова неперевищення порогового значення показника енергетичної безпеки, що розглядається, виконується в моделі шляхом зв'язування утвореного сумарного обсягу імпортованого вугілля з обсягами імпорту з окремих джерел у пропорції менше 0,3. В мережному поданні моделі ця умова виражається для обсягів імпорту з кожного джерела рівнянням небалансу порогової частки обсягу продукту у вузлі підсумовування і відповідного вихідного потоку. Небаланс враховується ослаблювальними змінними. Це зв'язування сумарного потоку вузла і окремих вихідних потоків ліній позначено пунктирними кривими *II* на рис. 1.

Розроблена авторами методика врахування фізично/технологічно зумовлених зв'язків між змінними обсягами в допоміжній системі рівнянь економіко-математичної моделі виробничого типу детально описана в роботі [6].

ВИСНОВКИ

1. Запропоновані методи врахування вимог енергетичної безпеки ґрунтуються на представленні факторів енергетичної безпеки разом з їх пороговими значеннями у вигляді лінійних обмежень задачі лінійного програмування.

2. Лінійні обмеження, утворені факторами енергетичної безпеки, виражаються через змінні обсяги продуктів моделі паливозабезпечення країни, що є моделлю виробничого типу, побудованою на основі поняття технологічного способу Канторовича.

3. Модель містить всі необхідні конструп-

тивні засоби врахування показників енергетичної безпеки, які визначаються функціонуванням системи паливозабезпечення, що дозволяє її застосування до абстрактної мережі паливозабезпечення з використанням мережних аналогій для узагальнення способів структурування технологічних способів.

1. «Методика розрахунку рівня економічної безпеки України», затверджена наказом Мінекономіки від 02.03.2007 р. № 60 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://me.kmu.gov.ua/control/uk/publish/article?art_id=97980&cat_id=38738 – Назва з екрана.

2. Земляний М.Г. До оцінки рівня енергетичної безпеки. Концептуальні підходи [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.db.niss.gov.ua/docs/energy/EnSecZeml.pdf. – Назва з екрана.

3. Стогній О.В. Структурні особливості балансово-оптимізаційної моделі паливозабезпечення країни / О. В. Стогній, М. І. Каплін // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. – 2011. – Спец. вип. Ч. 1. – С. 138–145.

4. Новосельцев О.В. Балансово-оптимізаційна модель взаємоз'язаних систем транспортування і розподілу паливно-енергетичних ресурсів в контексті загальноенергетичних балансів країни / О. В. Новосельцев, М. І. Каплін // Проблеми загальної енергетики. – 2009. – №20. – С. 62–68.

5. Костюк В.О. Структурна будова та розрахункові основи економіко-математичної моделі двомережної системи транспортування й розподілу енергетичних продуктів підприємства водопостачання і водовідведення / В. О. Костюк, М. І. Каплін, В. Г. Загурський, В. П. Сидоренко // Проблеми загальної енергетики. – 2010. – Вип. 1(21). – С. 54–58.

6. Каплін М.І. Врахування балансово-енергетичних закономірностей в техніко-економічній моделі складнозамкненої гідравлічної мережі системи водопостачання / М. І. Каплін, В. О. Костюк, В. П. Сидоренко // Проблеми загальної енергетики. – 2011. – Вип. 3(26). – С. 32–38.

Надійшла до редколегії 8.11.2012