

УДК 621.316.1.017

**О.В. НОВОСЕЛЬЦЕВ**, чл.-кор. НАН України**М.І. КАПЛІН**, наук. співроб.

Інститут загальної енергетики НАН України, Київ

## БАЛАНСОВО-ОПТИМІЗАЦІЙНА МОДЕЛЬ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗАНИХ СИСТЕМ ТРАНСПОРТУВАННЯ І РОЗПОДІЛУ ПАЛИВНО-ЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕСУРСІВ

*Розглянуто можливості застосування балансово-оптимізаційних економіко-математичних моделей виробничого типу до аналізу енергетичних балансів паливно-енергетичного комплексу країни. Запропоновано принципи та алгоритми побудови таких моделей для розв'язання оптимізаційних задач підвищення енергетичної ефективності взаємозв'язаних підсистем транспортування і розподілу енергетичних продуктів з мережною структурою.*

### Постановка задачі

Складність проблеми моделювання паливно-енергетичних балансів (ПЕБ) країни визначається багаторівневою ієрархічною структурою виробництва, перетворення і споживання паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР) в країні. Оптимізація ПЕБ в ринкових умовах функціонування економіки потребує проведення одночасних структурно-технологічних та цінових розрахунків.

Підсистеми транспортування та розподілу ПЕР є невід'ємними складовими паливно-енергетичного балансу, що суттєво впливають на його кількісні і якісні показники. Так, за оцінками фахівців втрати валового внутрішнього продукту (ВВП) від неефективного транспортування та розподілу ПЕР у країнах з перехідною економікою, до яких належить і Україна, досягають 20% і більше [1, 2].

Серед відомих балансово-оптимізаційних моделей енергетики, що містять підсистеми моделювання процесів транспортування і розподілу енергоносіїв [3–5], найбільш потужною є система моделей MESAP, яка описує енерго-економічні процеси із застосуванням методів лінійної оптимізації [5]. Структура енергетичної системи представлена в MESAP у вигляді орієнтованого графа – вузлів та направлених зв'язків між ними. Зв'язки описують потоки енергії і матеріалів, вузли – абстрактні об'єкти, де енергетичні і матеріальні потоки зустрічаються й трансформуються. Обмеженнями служать загальні витрати в енергосистемі, обсяги імпорту енергоресурсів, верхні та нижні гра-

ниці енергетичних потоків. Принциповим недоліком розглянутих моделей потокового типу є їх спрямованість на розв'язання транспортних задач, які не враховують технологічних та режимних обмежень, що обумовлюються законами потокорозподілу в системах з мережною структурою, а значить – не дозволяють коректно розраховувати технологічні витрати ПЕР в цих мережах.

Основна увага даної роботи зосереджується на розробці оптимізаційної моделі ПЕБ, що враховує мережні особливості взаємодії підсистем транспортування й розподілу енергоносіїв та дозволяє відслідковувати втрати ПЕР від їх неефективного транспортування й розподілу.

Рішення цієї задачі пропонується у класі багатопродуктових балансово-оптимізаційних моделей виробничого типу, де фактичні (статистичні) баланси енергоносіїв можуть бути отримані як розв'язки оптимізаційної задачі на графі взаємозв'язаних мереж. Визначальною для такого вибору властивістю моделей виробничого типу є використання загального поняття технологічного способу, що дозволяє моделювати будь-які об'єкти складних енергетичних систем, пов'язаних технологічними або структурними чи функціональними зв'язками. Звідси випливає можливість застосування таких моделей до дослідження енергетичних балансів взаємозв'язаних систем транспортування і розподілу різнорідних за фізичною природою енергетичних продуктів у системах електро-, тепло-, водо-, газопостачання тощо. Такі системи характеризуються: 1) наявні-

стю транспортно-розподільних мереж і 2) залежністю між фізичними параметрами процесу транспортування й розподілу енергетичних продуктів, яка виражається у формі балансових рівнянь і узагальнюється поняттям режиму поточкорозподілу.

### **Багатопродуктові балансово-оптимізаційні моделі виробничого типу на базі поняття технологічного способу**

Балансово-оптимізаційна модель, що охоплює всі галузі ПЕК: електроенергетику, теплоенергетику, вугільну, газову та нафтову промисловості будується як варіантна система лінійних рівнянь, матриця якої утворюється із векторів-стовпчиків технологічних способів [4]. Технологічні способи є сукупності технологічних коефіцієнтів випуску і витрат. Технологічні способи відображають процеси виробництва енергопродуктів, їх транспортування мережами (електричними, тепловими), в газопроводах, нафтопроводах та продуктопроводах, для природного газу зберігання в сховищах, розподіл енергопродуктів для кінцевого споживання. Вектори-стовпчики технологічних способів групуються по галузях у формі блоків, причому галузеві продуктові та ресурсні матриці розділяються по горизонталі та по вертикалі з тим, щоб отримати продуктову та ресурсну матриці для всього ПЕК з блочно-діагональними структурами. Продуктова матриця характеризується наявністю ненульових елементів в позадіагональних блоках, які слугують для відображення перетоків і потоків енергопродуктів між галузями ПЕК і, взагалі кажучи, будь-яких енергетичних об'єктів, між якими існують технологічні, функціональні зв'язки. Праві частини системи рівнянь моделі містять обсяги кінцевого споживання.

Багатопродуктовість є основною характерною рисою моделі виробничого типу на відміну від моделей транспортно чи розподільного типу, а також виробничо-транспортного типу, в яких моделюється виробництво та транспортування одного продукту.

Модель міжпродуктового балансу за схемою Леонтьєва перетворюється у оптимізаційну модель виробничого типу, якщо в ній представлено декілька технологічних способів виробництва одного й того ж основного продукту, можливі комплексні виробництва, а також додана ресурсна система рівнянь. Процеси транспортування моделюються як переміщення

певного продукту за певним маршрутом, тобто транспортування розглядається як різновид виробництва. Модель має більше змінних, ніж рівнянь, і є варіантною. Для отримання змістовного розв'язку до системи рівнянь додається цільова функція, що виражає прийнятій енергоекономічній критерій оптимальності.

Математично модель виробничого типу є задачею лінійного програмування з певною структурою. Структура моделі визначається сукупністю впорядкованих зв'язків типу виробіток – перетворення – споживання для всіх продуктів модельованої системи.

### **Методика відображення топології мереж транспортування енергетичних продуктів в структуру технологічної матриці моделі виробничого типу Леонтьєва – Канторовича – Купманса (Л–К–К)**

Розробка методики обумовлюється необхідністю оптимізації функціонування багатоконпонентних систем виробництва, транспортування, розподілу фізично різнорідних енергетичних продуктів, до складу яких входять структурно та режимно взаємозв'язані ресурсотранспортні мережі. Комплексний аналіз продуктивності таких систем передбачає, поперше, узгоджене визначення режимів поточкорозподілу в мережах і, крім того, таку постановку оптимізаційної задачі, яка забезпечила б можливість формулювання єдиного критерію оптимальності для багатоконпонентної системи з різнотипними продуктами. Останній вимозі відповідає, зокрема, оптимізаційно-балансова модель Л–К–К, застосовувана в техніко-економічних дослідженнях великих багатопродуктових виробничих систем [4]. Нижче пропонується підхід до побудови моделі Л–К–К, що спирається на традиційний для мережних систем спосіб опису їх стану за допомогою рівнянь усталеного режиму на графі мережі – структурно-режимний формалізм.

Розглянемо мережу системи виробітку, транспортування-розподілу, споживання формалізованого енергетичного продукту – електрична, теплова енергія, газ, нафта, вугілля тощо, фрагмент графа якої зображено на рис. 1. Граф мережі складається з вузлів та ребер. Вважаємо режим мережі визначеним, якщо для вузлів задаються величини виробітку,  $P_{gen}$ , споживання,  $P_{cons}$ , вхідний та вихідний зовнішні, екзогенні потоки продукту,  $P_{inp}^{exog}$  і  $P_{outp}^{exog}$  відповідно (табл. 1), для ребер – напрямком потоку продукту і його величини на початку та в кінці ребра, на рис. 1 –  $\vec{P}_{1,2,1}$  і  $\vec{P}_{1,2,2}$  відповідно.

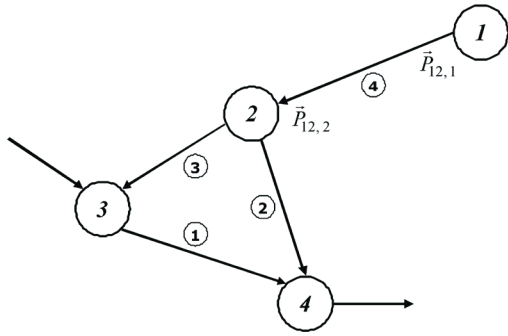


Рис. 1. Граф мережі

Таблиця 1. Вузли мережі

Вузол	Тип вузла	$P_{gen}$	$P_{cons}$	$P_{inp}^{exog}$	$P_{outp}^{exog}$
1	виробіток	$P_{gen,1}$	0	0	0
2	споживання	0	$P_{cons,2}$	0	0
3	споживання	0	$P_{cons,3}$	$P_{inp,03}^{exog}$	0
4	споживання	0	$P_{cons,4}$	0	$P_{outp,40}^{exog}$

Параметри режиму задовольняють систему рівнянь балансу потоків продукту у вузлах мережі:

$$\sum_{i'} P_{ij,j} - \sum_{i''} P_{ji'',j} = (P_{cons,j} - P_{gen,j}) - \left( \sum_{k'} P_{inp,k'j}^{exog} - \sum_{k''} P_{outp,k''j}^{exog} \right), j = \overline{1, N}, \quad (1)$$

де індекси  $i'$  та  $i''$  належать до множин вхідних та вихідних потоків вузла  $j$ , а  $k'$  і  $k''$  – вхідних та вихідних екзогенних потоків відповідно.

Праві частини рівнянь (1) для прикладу графа мережі на рис. 1 представлено в табл. 2.

Таблиця 2. Права частина системи рівнянь балансу продуктів у вузлах мережі

Вузол	Права частина (RHS)
1	$-P_{gen,1}$
2	$P_{cons,2}$
3	$P_{cons,3} - P_{inp,03}^{exog}$
4	$P_{cons,4} + P_{outp,40}^{exog}$

Визначення елементів технологічної матриці моделі Л–К–К (технологічних коефіцієнтів) передбачає попереднє створення переліку модельних продуктів. Основним продуктом, що виробляється в ребрі мережі як технологічному способі моделі Л–К–К, будемо вважати вихідний потік ребра –  $\bar{P}_{12,1}$  на рис. 1. Основний продукт вузла є алгебраїчна сума виробітку  $P_{gen}$ , вхідного екзогенного потоку  $P_{inp}^{exog}$  і вхідних потоків приєднаних ребер  $\sum_{i'} P_{ij,j}$ . Тоді тех-

нологічні коефіцієнти, що за змістом є коефіцієнтами втрат та витрат продуктів у технологічному способі, природно визначати наступним чином. Технологічний коефіцієнт ребра  $k$  з початком у вузлі  $i$  і кінцем у вузлі  $j$  дорівнює відношенню втрат продукту в ребрі  $k$ :

$$g_{lm} = \frac{P_{ij,i} - P_{ij,j}}{P_{ij,i}},$$

де індекси  $l$  та  $m$  вказують позицію технологічного коефіцієнта виробітку основного продукту ребра  $k$  в технологічній матриці моделі.

Аналогічно технологічним коефіцієнтом вузла  $j$  є відносні внутрішні втрати продукту в вузлі:

$$g_{lm} = \frac{\left( P_{gen,j} + \sum_{k'} P_{inp,k'j}^{exog} \right) + \sum_{i'} P_{inp,i'j} - \left( P_{cons,j} + \sum_{k''} P_{outp,k''j}^{exog} \right) - \sum_{i''} P_{outp,i''j}}{\left( P_{gen,j} + \sum_{k'} P_{inp,k'j}^{exog} \right) + \sum_{i'} P_{inp,i'j}}.$$

Далі формуємо структуру технологічної матриці моделі Л–К–К, що відповідає даним вище визначенням основних продуктів техспособів. Вузол мережі в такій моделі представляється групою техспособів технологічної матриці, табл. 3.

Перший техспосіб групи забезпечує внутрішній виробіток вузла та надходження вхідного екзогенного потоку, наприклад, техспосіб 1 у групі вузла 1. Далі група вузла вміщує послідовність техспособів надходження у вузол потоків приєднаних ребер, наприклад, техспособи 2 і 3 у групі вузла 4. Кількість таких техспособів дорівнює кількості ребер, потоки продукту в яких є вхідними для розглядуваного вузла. Останній техспосіб групи відповідає за виробіток повного потоку вузла із заданим технологічним коефіцієнтом втрат. Вказані техспособи кожної групи вузла разом утворюють підсумовувальну конструкцію для внутрішнього виробітку, екзогенного вхідного потоку та вхідних потоків приєднаних ребер. Вироблений у вузлі повний (сумарний) потік продукту розподіляється між техспособами ребер вихідних потоків з допомогою відповідних конструкцій. Далі вихідні потоки, вироблені в техспособах ребер, надходять у відповідні техспособи вузлів.

Рівняння балансу потоків продукту у вузлі, згідно з порядком доданків за структурою моделі має вигляд:

$$\left( P_{gen,j} + \sum_{k'} P_{inp,k'j}^{exog} \right) + \sum_{i'} P_{inp,i'j} - \sum_{i''} P_{outp,i''j} = P_{cons,j} + \sum_{k''} P_{outp,k''j}^{exog}$$

Таблиця 3. Технологічна матриця моделі Л–К–К для графа мережі на рис. 1

		Техспособи вузлів								Техспособи ребер				Права частина
		Вузол								Ребро				
		1	2	3	4	1	2	3	4					
Вузол	1	1	-1											0
	2		1	1	-1									0
	3				0,96									0
	4					1	1	-1						0
Ребро	1								1	1	1	-1		0
	2												-1	0
	3													0
	4													0

P1, gen	0	P3, inp	0		
P1, gen	0	P3, inp	0		

**Методика формування набору даних моделі Л–К–К для двопродуктової мережної системи**

1. Структура мереж підсистем транспортування продукту 1 (підсистема 1) і продукту 2 (підсистема 2) задається орієнтованими графами, рис. 2. У вузлах графів вказуються величини виробітку, споживання та екзогенних потоків відповідних продуктів, в ребрах – величини та напрямки потоків продуктів. Значення вказаних параметрів отримуються як результат попередніх розрахунків режимів потокорозподілу в мережах підсистем 1 і 2. Вузли й ребра (елементи) графів підсистем нумеруються послідовними множинами натуральних чисел, що не перетинаються.

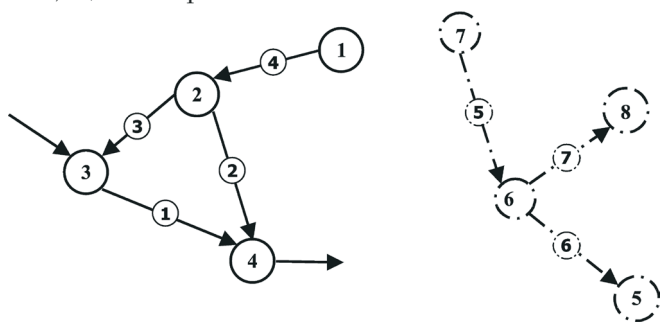


Рис. 2. Фрагменти графів мереж підсистем 1 і 2

2. Графам мереж підсистем 1 і 2, а також режимам потокорозподілу на них співставляються індивідуальні набори даних моделі Л–К–К, що містять: 1) технологічну матрицю мережної системи ресурсопостачання, 2) обмеження на інтенсивності технологічних способів згори і знизу, 3) вектор правих частин системи рів-

нянь балансу. Методику відображення режиму потокорозподілу на графі мережі у структуру набору даних моделі Л–К–К наведено вище.

3. Будується двомережна (двографова) потокова модель системи. Для цього встановлюється взаємно однозначна відповідність між підмножиною вузлів споживання продукту 1 в підсистемі 1 та підмножиною вузлів виробітку продукту 2 в підсистемі 2. Ця відповідність визначається списком пар номерів вузлів підсистеми 1 і підсистеми 2, що структурно і технологічно є тими самими об'єктами двопродуктової системи ресурсопостачання, але виконують функцію споживання в підсистемі 1 та виробітку (генерації) в підсистемі 2. Утворена таким чином структура опису двомережної системи ресурсопостачання складається з 1) графа мережі підсистеми 1 з власною нумерацією елементів; 2) графа мережі підсистеми 2 із власною нумерацією елементів, що не перекривається з такою для графа мережі підсистеми 1; 3) двостовпчиковою матрицею відповідності номерів вузлів виробітку-споживання.

4. Формування набору даних моделі Л–К–К двопродуктової мережної системи здійснюється шляхом:

- 1) розміщення технологічних матриць індивідуальних наборів даних моделі Л–К–К підсистем 1 і 2 в діагональних блоках технологічної матриці створюваного набору даних;
- 2) розташування векторів правих частин цих наборів у вказаній послідовності згори до низу у векторі правих частин;
- 3) об'єднання векторів обмежень згори і знизу на змінні оптимізації у відповідних век-

торах обмежень створюваного набору даних зліва направо для підсистем 1 і 2 відповідно;

4) визначення технологічних коефіцієнтів витрат і втрат для вузлів виробітку-споживання за формулою

$$g_{ij} = \frac{P_{i,cons}}{Q_{j,gen}},$$

де  $P_{i,cons}$  – споживання продукту 1 у вузлі  $i$  мережі підсистеми 1,  $Q_{j,gen}$  – виробіток продукту 2 у вузлі  $j$  мережі підсистеми 2, а пара  $(i, j)$  відповідає вузлу виробітку-споживання;

5) вилучення з векторів правих частин та обмежень згори величин,  $P_{i,cons}$  і  $Q_{j,gen}$  відповідно.

Технологічна матриця моделі Л–К–К двопродуктової мережної системи ресурсопостачання, створена на основі наведеного алгоритму, складається з 2-х вертикальних смуг технологічних способів, у яких можна виділити 4-и квадранти (блоки) технологічних коефіцієнтів. Перша смуга утворюється технологічними способами вузлів мережі і складається з послідовно розташованих зліва направо груп техспособів окремих вузлів. Кожна така група містить 1) техспосіб власного виробітку потоку продукту в вузлі; 2) підгрупу техспособів надходження у вузол потоків продукту з приєднаних ребер; 3) техспосіб виробітку сумарного вихідного потоку вузла. Оскільки перетворення потоків продуктів у вузлі розглядається як двоетапний процес первинного накопичення вхідних потоків з ребер, власного виробітку та екзогенних потоків – формування сумарного вхідного потоку вузла – продукт 1, і виробітку сумарного вихідного потоку – продукт 2, то кожному вузлу відповідає 2 рядки технологічної матриці.

До другої смуги належать технологічні способи ребер (ліній) мережі, причому кожному ребру відповідає єдиний техспосіб виробітку одного продукту – вихідного потоку ребра.

Виходячи з цих міркувань формалізується методика адресації (визначення індексів) ненульових елементів технологічної матриці моделі Л–К–К багатодуктової системи ресурсопостачання. Важливо зазначити, що адресація елементів технологічної матриці цієї системи виробітку-споживання енергетичних продуктів залежить не лише від структури (схем) задіяних мереж, але й від напрямків потоків про-

дуктів у ребрах відповідних графів, тобто конкретного режиму поточкорозподілу.

На основі даної методики адресації технологічної матриці розроблено програмну підсистему автоматизованого формування набору даних моделі Л–К–К за вихідною інформацією про графи та режими поточкорозподілу багатоконпонентної системи ресурсопостачання. Підпрограми та процедури підсистеми забезпечують введення інформації про графи мереж, розрахунок адрес і значень технологічних коефіцієнтів, визначення елементів векторів обмежень згори та знизу і правих частин набору даних. Підсистему виконано у середовищі табличного процесора Microsoft Excel на мові Visual Basic for Applications.

#### **Приклад розрахунку поточкорозподілу і цін в моделі Л–К–К двопродуктової системи електро-, водопостачання. Мережні ціни**

Об'єктом моделювання є система електро-, водопостачання двох районів міста з населенням 70 і 120 тис. чоловік, для яких обсяги споживання води складають, відповідно, 7467,9 і 3650,0 тис. м куб на рік, а обсяги кінцевого електроспоживання – 70 і 127 ГВт-год на рік. Метою розрахунків за моделлю є знаходження необхідних обсягів постачання електричної енергії і води з водозаборів, потоків продуктів в елементах мереж: насосних станціях, ділянках трубопровідної мережі, трансформаторних підстанціях, лініях електропередач, а також цін за схемою ціни виробництва у вищезазначених елементах системи.

Моделювана система складається з 1) розподільної електричної мережі, до якої належать: трансформаторна підстанція 35/10 кВ, три трансформаторні підстанції 10/0,4 кВ, лінії електропередач напругою 10 і 0,4 кВ, а також два споживачі електричної енергії в мережі 10 кВ, 2) гідравлічної мережі системи водопостачання, до якої належать: дві насосні станції першого підйому води разом з водоочисними спорудами, дві насосні станції другого підйому, чотири ділянки трубопровідної мережі і два кінцевих споживачі води, рис. 3.

Економіко-математична модель системи електро-, водопостачання побудована на основі поняття технологічного способу Л.В. Канторовича, за допомогою якого формалізуються процеси надходження електричної енергії і води у

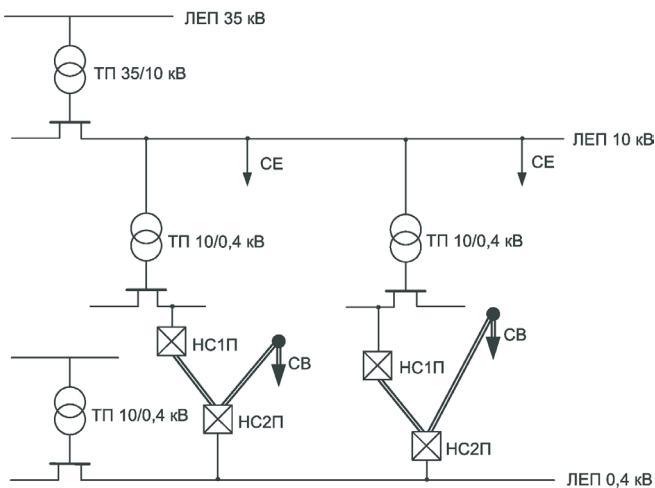


Рис. 3. Фрагмент схеми електро-, водопостачання міста

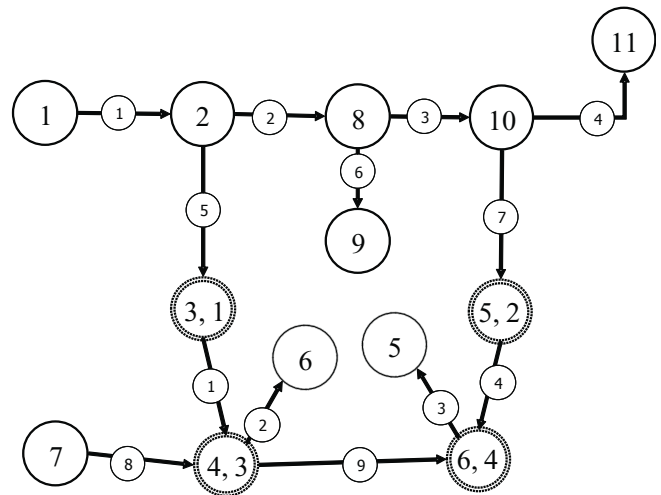


Рис. 4. Орієнтовані графи взаємозв'язаних мереж системи електро-, водопостачання міста

відповідні мережі, їх транспортування і перетворення в елементах мереж, а також витрату електричної енергії у розподільній електричній мережі на виробіток енергії потоку води в гідравлічній мережі.

Структурно модель складається з двох груп технологічних способів. Це технологічні способи вузлів і ділянок мережі. Кожному вузлу мережі відповідає група технологічних способів, що утворюється технологічним способом власного виробітку продукту у вузлі, групою технологічних способів надходження вхідних потоків вузла та технологічним способом виробітку сумарного вихідного потоку. Загальне число технологічних способів в групі вузла дорівнює кількості ліній з вхідними потоками, приєднаними до нього плюс 2. В технологічних способах ліній споживаються вихідні потоки вузлів і виробляються вхідні потоки. Кожній лінії мережі відповідає один технологічний спосіб моделі. Визначальною особливістю системи є наявність вузлів виробітку-споживання. У випадку системи електро-, водопостачання такими вузлами є насосні станції, в яких електрична енергія споживається на виробіток енергії потоку води. Вузли виробітку-споживання представлені в двопродуктовій моделі технологічними способами, що містять технологічні коефіцієнти, які пов'язують блоки підсистем електро- і водопостачання технологічної матриці моделі.

Орієнтовані графи системи, що моделюється, зображено на рис. 4.

Вершини (3, 1), (5, 2), (4, 3) і (6, 4) відповідають вузлам виробітку-споживання, 9, 11 – споживачам електричної мережі, 5 і 6 – споживачам системи водопостачання. Дуги 5 і 7

зображують лінії електропередач з трансформаторними підстанціями 10/0,4 кВ, вершини 1 і 7 – центри живлення розподільної електричної мережі, якими є трансформаторні підстанції 35/10 і 10/0,4 кВ відповідно.

Виконані розрахунки обсягів транспортування електричної енергії і води, а також цін на водопостачання та електричну енергію від розподільної мережі показують, що:

- ціна на енергоносії залежить від розміщення споживача в мережі і зростає при збільшенні кількості ділянок до центру живлення (джерела);
- ціни на водопостачання двох обраних споживачів в однопродуктовій моделі відрізняються на 64,12% – ефект мережної диференціації цін. У двопродуктовій моделі взаємозв'язаних мереж ця різниця становить 59,04%. Відмінність 5,08% є наслідком мережної диференціації цін в електричній мережі, тобто споживання електричної енергії у вузлах гідравлічної мережі за мережними цінами електричної мережі – ціновий ефект взаємодії мереж.

Виконано параметричні розрахунки залежності мережних цін на водопостачання та електричну енергію від коефіцієнтів втрат в електричній та гідравлічній мережах. У першому розрахунку коефіцієнти втрат всіх елементів гідравлічної мережі одночасно збільшувались від вихідних значень до 30% із кроком приблизно 2,5%. Встановлено, що:

- залежність ціни від коефіцієнта втрат є нелінійною. Це пояснюється мультиплікативною залежністю коефіцієнта втрат в кожному елементі мережі від коефіцієнтів

Таблиця 4. Залежність цін на водопостачання в елементах гідравлічної мережі від коефіцієнтів втрат

Коефіцієнт втрат в елементі мережі, б.од.										
Мережа водопостачання, НС 1	0,024	0,054	0,084	0,114	0,144	0,174	0,204	0,234	0,264	0,294
НС 2	0,024	0,054	0,084	0,114	0,144	0,174	0,204	0,234	0,264	0,294
НС 3	0,013	0,044	0,075	0,106	0,137	0,168	0,199	0,230	0,261	0,292
НС 4	0,013	0,044	0,075	0,106	0,137	0,168	0,199	0,230	0,261	0,292
Трубопровідна мережа, ділянка 1	0,010	0,041	0,073	0,104	0,135	0,167	0,198	0,229	0,260	0,292
Ділянка 2	0,010	0,041	0,073	0,104	0,135	0,167	0,198	0,229	0,260	0,292
Ділянка 3	0,030	0,059	0,089	0,118	0,147	0,177	0,206	0,235	0,264	0,294
Ділянка 4	0,030	0,059	0,089	0,118	0,147	0,177	0,206	0,235	0,264	0,294
Ціна на водопостачання по елементах мережі, дол/м куб										
Мережа водопостачання, НС 1	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025
НС 1, вихідний потік	0,1630	0,1488	0,1355	0,1231	0,1116	0,1009	0,0910	0,0819	0,0736	0,0660
НС 2, вхідний потік	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025
НС 2, вихідний потік	0,0909	0,0843	0,0781	0,0724	0,0672	0,0623	0,0579	0,0539	0,0502	0,0470
НС 3, вхідний потік	0,1646	0,1552	0,1461	0,1374	0,1290	0,1210	0,1135	0,1063	0,0995	0,0931
НС 3, вихідний потік	0,1828	0,1781	0,1736	0,1692	0,1649	0,1608	0,1569	0,1532	0,1497	0,1466
НС 4, вхідний потік, м куб	0,0937	0,0896	0,0857	0,0821	0,0788	0,0757	0,0729	0,0704	0,0683	0,0665
НС 4, вихідний потік, м куб	0,1126	0,1113	0,1102	0,1093	0,1087	0,1084	0,1084	0,1089	0,1099	0,1115
Вузол споживання 5, надходження, вхідний потік	0,1161	0,1183	0,1209	0,1239	0,1274	0,1316	0,1365	0,1423	0,1494	0,1579
Вузол споживання 5, споживання, вихідний потік	<b>0,1174</b>	0,1196	0,1222	0,1253	0,1289	0,1330	0,1380	0,1439	0,1510	<b>0,1597</b>
Вузол споживання 6, надходження, вхідний потік	0,1846	0,1858	0,1872	0,1888	0,1907	0,1929	0,1956	0,1987	0,2025	0,2070
Вузол споживання 6, споживання, вихідний потік	<b>0,1867</b>	0,1879	0,1893	0,1909	0,1928	0,1951	0,1977	0,2009	0,2047	<b>0,2093</b>
Трубопровідна мережа, ділянка 1	0,1646	0,1552	0,1461	0,1374	0,1290	0,1210	0,1135	0,1063	0,0995	0,0931
Трубопровідна мережа, ділянка 2	0,1846	0,1858	0,1872	0,1888	0,1907	0,1929	0,1956	0,1987	0,2025	0,2070
Трубопровідна мережа, ділянка 3	0,1161	0,1183	0,1209	0,1239	0,1274	0,1316	0,1365	0,1423	0,1494	0,1579
Трубопровідна мережа, ділянка 4	0,0937	0,0896	0,0857	0,0821	0,0788	0,0757	0,0729	0,0704	0,0683	0,0665

втрат всіх елементів, що передують йому на графі мережі, починаючи з кінцевого вузла;

- в однопродуктовій моделі системи водопостачання ціна на водопостачання, наприклад, вузла 5 збільшилась на 31,13%, вузла 6 на 12,13%, у двопродуктовій – на 36,03% і 12,14% відповідно, що показує підсилення впливу на вузлову диференціацію цін в гідравлічній мережі вузлової диференціації цін електричної мережі. Мережні ціни двопродуктової моделі подано в табл. 4.

У другому розрахунку при одночасному збільшенні коефіцієнтів втрат гідравлічної та електричної мереж до 30% ціна на водопостачання вузла 5 системи водопостачання

зросла у 2,45 раза при зростанні у вузлі 6 на 37,7%.

Таким чином:

1. В ПЕБ України відтворено багатопродуктову оптимізаційну модель виробничого типу, визначено її технологічні способи і продукти. Модель такого типу може розглядатись як верхній рівень агрегації деталізованих балансових моделей для подання розрахункових балансів у форматі MEA.

2. Розроблено методику та алгоритм побудови набору даних моделі Леонт'єва–Канторовича–Купманса багатомережної системи транспортування і розподілу енергетичних продуктів та інформацію про структуру та режими мереж.

1. Пустовойт О. Эффективность модели развития внутреннего рынка Украины // Экономика Украины. – 2008. – №5. – С. 24–36.
2. Ватагин М.Ю., Баталов А.Г., Бондаренко Ю.Н. ОЭС Украины 2007 // Энергетика та електрифікація. – 2008. – №6. – С. 3–12.
3. Макаров А.А., Мелентьев Л.А. Методы исследования и оптимизации энергетического хозяйства. – Новосибирск: Наука. – 1973. – 275 с.
4. Кулик М.М., Добровольський В.К., Голованов І.М. Модель рівноважних цін європейського ринку енергоресурсів // Проблеми загальної енергетики. – 2002. – № 7. – С. 7–11.
5. Подолець Р.З. Енергетичний баланс України: моделювання і прогнозування. – К.: Ін-т екон. та прогнозув. – 2007. – 174 с.