

УДК 004.942:620.9

Микола Каплін, к.т.н., ст. досл., <https://orcid.org/0000-0001-9328-4257>

Тетяна Білан*, к.т.н., ст. досл., <https://orcid.org/0000-0002-0280-6716>

Інститут загальної енергетики НАН України, вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна

*Автор-кореспондент: bilan.ize@gmail.com

АГРЕГОВАНА МОДЕЛЬ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗА СТРУКТУРОЮ ДАНИХ ПРОДУКТОВОГО ЕНЕРГЕТИЧНОГО БАЛАНСУ

Анотація. Розроблено економіко-математичну модель виробничого типу, призначену для прогнозування енергозабезпечення країни шляхом розрахунку збалансованих обсягів постачання вуглецевмісних палив, електричної і теплової енергії від джерел генерування на викопному паливі та відновлюваних джерел. Модель побудовано на основі відкритих джерел даних за специфічною структурою технологічних способів Л.В. Канторовича, яка на відміну від відомих використовує підсистеми виробництва абстрактних продуктів, що відповідають асортименту випусків і витрат продуктового енергетичного балансу, а також використовує процедури їх вибіркового агрегування для побудови різних форм матриць міжпродуктового балансу. Це дозволило отримати стійкий до зростаючих обмежень інформаційного забезпечення інструмент прогнозування та оцінки енергетичних балансів, що відрізняється новою системою умов моделі виробничого типу за розширеним асортиментом продуктового енергетичного балансу Міжнародної енергетичної агенції, а також множиною запропонованих вперше технологічних способів Л.В. Канторовича, які разом визначили структуру випуску, витрат і продуктових зв'язків окремих виробників системи енергозабезпечення в межах взаємоузгодженого багатопродуктового балансу. Запропонована модель надає можливість використання статистичного і технологічного підходів до визначення коефіцієнтів випуску і витрат при вирішенні задач прогнозування, застосування внутрішньо притаманних засобів аналізу ретроспективних балансів щодо виявлення неврахованих, необлікованих обсягів ПЕР, а також обсягів їх споживання і перетворення в енергетичному секторі країни за значних змін структури потужностей генерування електричної і теплової енергії. Отримані в розрахунках за допомогою розробленої моделі енергозабезпечення прогнозні обсяги постачання основних видів енергетичних ресурсів дозволили стверджувати, що за досягнутих на 2020 рік показників ефективності використання енергоносіїв система енергозабезпечення країни здатна задовольнити потребу країни переважно за рахунок розвитку вітчизняних паливних баз.

Ключові слова: енергозабезпечення, продуктовий енергетичний баланс, модель виробничого типу.

1. Вступ

Системна трансформація економіки на сучасному етапі її переходу до безвуглецевого функціонування енергетичного сектора передбачає широке впровадження відновлюваних джерел енергії. Це породило низку взаємопов'язаних проблем технологічного розвитку енергосистем. Зокрема, в електроенергетиці – це підтримка параметрів поточкорозподілення за використання нестабільних джерел енергії, керування режимами та їх стійкістю тощо. Забезпечення надійного енергопостачання економіки країни в таких умовах покладається на традиційні генерувальні потужності, що використовують вуглецевмісне паливо та інші види енергетичних ресурсів не лише для виробітку своєї частки електричної й теплової енергії, але й з метою резервування відновлюваних джерел. Суттєвих змін зазнає зараз і сектор кінцевого споживання енергетичних продуктів. Зокрема, скорочення безпосереднього використання викопних палив у галузях економіки, а також на виробіток теплової енергії в побуті та комунальному господарстві супроводжується зростанням витрат електричної енергії, підвищенням рівня втрат в мережах енергосистем і, відповідно, необхідністю генерування її додаткових обсягів з використанням як відновлюваних, так і традиційних видів енергоносіїв. Тому зростання частки відновлюваних джерел в енергетичному балансі країни значно

ускладнює задачу надійного, збалансованого енергозабезпечення економіки. Зокрема, необхідність врахування всіх видів енергоносіїв і різноманітних технологій виробництва електрики і тепла, включно з технологіями узгодження функціонування ВДЕ у складі енергосистем обумовлюють її актуальність на сучасному етапі розвитку енергетичного сектора всіх країн світу.

Ця задача може бути вирішена, зокрема, шляхом створення оптимізаційних моделей [1]–[2] енергетичного балансу, що охоплюють паливо-видобувні галузі, сектори виробництва електричної і теплової енергії, а також галузі кінцевого споживання для визначення обсягів збалансованого енергозабезпечення економіки країни.

Проблематика енергозабезпечення у різних аспектах дослідження енергетичних балансів, систем виробництва й постачання паливних продуктів, а також дотичні напрямки їх математичного моделювання широко представлені в роботах вітчизняних і зарубіжних дослідників. Серед них В.В. Леонт'єв [3], Т.С. Купманс [4]–[6], Л.В. Канторович [7]–[8], М.М. Кулик [9], В.К. Добровольский [10], Ahuja R.K. [11], Bazaraa M.S. [12], Bertsekas D.P. [13]–[14], Suwala W. [15] та ін. В роботах цих авторів ґрунтовно розроблені теоретичні основи та прикладні аспекти моделювання складних багатопродуктових систем в межах підходів моделей продуктового типу та потокових моделей. Економіко-математична модель виробничого типу, представлена нижче, призначена для прогнозування структури та обсягів енергозабезпечення країни шляхом розрахунку збалансованих обсягів постачання основних видів вуглецевмісних палив, електричної і теплової енергії із врахуванням обсягів виробітку відновлюваних джерел енергії. Важливою особливістю цієї моделі є її побудова за специфічною структурою технологічних способів Л.В. Канторовича, яка на відміну від відомих була розроблена на основі номенклатури продуктів та технологій енергетичного сектора, включених до продуктового енергетичного балансу в міжнародному форматі МЕА.

2. Методи та матеріали

Для створення моделей енергозабезпечення використано структури даних, тобто номенклатури продуктів і видів технологій (виробничої діяльності) чинного зараз Продуктового енергетичного балансу [16]–[17] країни, разом із наявними також у відкритому доступі Енергетичним балансом [18] та продуктовим енергетичним балансом МЕА для України [19]. Ці документи слугували джерелами структури технологічної матриці моделі виробничого типу, заснованої на понятті технологічного способу Л.В. Канторовича, і разом з тим надали мінімально необхідну сукупність обсягових показників щодо витрат і випусків енергетичного сектора і кінцевого споживання економіки в цілому.

Агрегована модель енергозабезпечення за структурою даних продуктового енергетичного балансу. В найбільш загальному вигляді баланси обсягів енергоносіїв енергетичного балансу України продуктового, далі – продуктового балансу, можна записати у вигляді (1)–(2)

$$X_i^{1, \text{вироб}} - \sum_{j \in \Omega^{\text{ПЕРЕТВ}}} X_{ij}^{2, \text{вироб}} - \sum_{k \in \Omega^{\text{ПЕС}}} X_{ik}^{1, \text{нec}} - X_i^{1, \text{вмп}} = X_i^{1, \text{номп}}, \quad (1)$$

$$X_l^{2, \text{вироб}} - \sum_{k \in \Omega^{\text{ПЕС}}} X_{lk}^{2, \text{нec}} - X_l^{2, \text{вмп}} = X_l^{2, \text{номп}}, \quad (2)$$

де $X_i^{1, \text{вироб}}$, $X_j^{2, \text{вироб}}$ – обсяги виробництва i -го первинного (1) та j -го вторинного (2) енергетичних ресурсів, відповідно; $X_{ij}^{2, \text{вироб}}$ – обсяги витрат i -го первинного (1) енергетичного ресурсу при виробництві j -го вторинного, відповідно; $X_{ik}^{1, \text{нec}}$, $X_{lk}^{2, \text{нec}}$ – обсяги витрат i -го первинного (1) та l -го вторинного (2) енергетичних ресурсів при задоволенні k -ї власної потреби енергетичного сектора, відповідно; $X_i^{1, \text{вмп}}$, $X_j^{2, \text{вмп}}$ – обсяги втрат (технологічних витрат) i -го первинного (1) та j -го вторинного (2) енергетичних ресурсів, відповідно; $X_i^{1, \text{номп}}$, $X_j^{2, \text{номп}}$ – обсяги потреби (кінцевого використання) на i -й первинний (1) та j -й вторинний (2) енергетичні ресурси, відповідно, $\Omega^{\text{ПЕРЕТВ}}$ –

множина технологій перетворення енергетичних ресурсів; $\Omega^{ПЕС}$ – множина напрямків власних технологічних витрат енергетичного сектора.

Ці рівняння подають співвідношення обсягів первинних та вторинних енергоносіїв відповідно, а також враховують їх витрати на потреби енергетичного сектора і втрати (технологічні витрати).

Модель системи енергозабезпечення, баланси продуктів якої описуються рівняннями (1)–(2), а вихідні дані щодо обсягів надходження та витрат можна витягти з документа [16]–[17] «Енергетичний баланс України (продуктовий)», має структуру, представлену в табл. 1. В рядках цієї таблиці подаються збалансовані обсяги первинних і вторинних енергетичних ресурсів, а стовпчики відповідають основним укрупненим ланкам їх обігу в системі енергозабезпечення. Так, виробництво первинних видів енергії утворює частину обсягу надходження в систему, який далі використовується у ланках перетворення – виробництвах вторинних енергоносіїв, а також витрачається в енергетичному секторі з урахуванням технологічних витрат (втрат).

Обсяги кінцевого використання енергетичних продуктів разом з обсягами імпорту та експорту враховуються в правій частині таблиці балансу [20]–[21]. Такі витрати як міжпродуктові передачі, статистичні розбіжності, морське бункерування тощо, які не можуть бути врахованими в моделі явно через невідомі наперед їх значення, виключаються з модельного балансу продукту, а відповідний їм обсяг буде визначатися як частина обсягу виробництва.

Таблиця 1. Структура моделі системи енергозабезпечення

Технологічні способи		Виробництво первинних ЕН (внутрішнє постачання)	Перетворення (виробництво вторинних ЕН)	Вир-во первинних ЕН на потреби енергетичного сектора (ПЕС)	Вир-во вторинних ЕН на потреби енергетичного сектора (ПЕС)	Втрати первинних ЕН (ВТП)	Втрати вторинних ЕН (ВТП)	Потреба (разом)	Потреба (за галузями) та кінцеве використання
Продукти		1	2		3		4	5	6
Основні: первинні ЕН	1	$X^1, ВИРОБ$	$-X^{12}, ВИРОБ$	$-X^1, ПЕС$		$-X^1, ВТП$		$X^1, ПОТП$	$= \sum \dots$
Основні: вторинні ЕН	2	0	$X^2, ВИРОБ$		$-X^2, ПЕС$		$-X^2, ВТП$	$X^2, ПОТП$	$= \sum \dots$
Первинні ЕН на потреби енергетичного сектора	3	$-X^1, ПЕС$	0	$X^1, ПЕС$				0	
Вторинні ЕН на потреби енергетичного сектора	4	0	$-X^2, ПЕС$		$X^2, ПЕС$			0	
Втрати первинних ЕН	5	$-X^1, ВТП$	0			$X^1, ВТП$		0	
Втрати вторинних ЕН		0	$-X^2, ВТП$				$X^2, ВТП$	0	

Взагалі модель енергозабезпечення за структурою продуктового енергетичного балансу може бути представлена у вигляді задачі лінійної оптимізації, яка формулюється наступним чином. Необхідно надати мінімальне значення загальним витратам на виробництво, перетворення та постачання первинних і вторинних енергетичних ресурсів (1) за умов забезпечення потреб галузей економіки, населення та соціальної сфери (2).

$$\sum_{i \in \Omega^{ПЕРВ}} C_i^1 \cdot x_i^{1, \text{вироб}} + \sum_{l \in \Omega^{ВТОР}} C_l^2 \cdot x_l^{2, \text{вироб}} + \sum_{i \in \Omega^{ПЕРВ}} \sum_{k \in \Omega^{ПЕС}} u_{ik}^{1, \text{нec}} + \sum_{l \in \Omega^{ВТОР}} \sum_{m \in \Omega^{ПЕС}} u_{lm}^{2, \text{нec}} \rightarrow \min, \quad (3)$$

$$x_i^{1, \text{вироб}} - \sum_{j \in \Omega^{\text{ПЕРЕТВ}}} g_{ij}^{12, \text{вироб}} \cdot x_j^{2, \text{вироб}} - \sum_{k \in \Omega^{\text{ПЕС}}} x_{ik}^{1, \text{нec}} - x_i^{1, \text{emp}} = X_i^{1, \text{номп}} \Big|_{i \in \Omega^{\text{ПЕРВ}}}, \quad (4)$$

$$-g_{ik}^{1, \text{нec}} \cdot x_i^{1, \text{вироб}} + x_{ik}^{1, \text{нec}} = 0 \Big|_{i \in \Omega^{\text{ПЕРВ}}, k \in \Omega^{\text{ПЕС}}}, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} -g_{ik}^{1, \text{нec}} \cdot x_i^{1, \text{вироб}} + x_{ik}^{1, \text{нec}} + u_{ik}^{1, \text{нec}} = 0 \\ x_{ik}^{1, \text{нec}} - x_{ik}^{1, \text{нec}, \text{MAX}} \leq 0 \end{aligned} \Big|_{i \in \Omega^{\text{ПЕРВ}}, k \in \Omega^{\text{ПЕС}}}, \quad (6)$$

$$-g_i^{1, \text{emp}} \cdot x_i^{1, \text{вироб}} + x_i^{1, \text{emp}} = 0 \Big|_{i \in \Omega^{\text{ПЕРВ}}}, \quad (7)$$

$$x_l^{2, \text{вироб}} - \sum_{m \in \Omega^{\text{ПЕС}}} x_{lm}^{2, \text{нec}} - x_l^{2, \text{emp}} = X_l^{2, \text{номп}} \Big|_{l \in \Omega^{\text{ВТОР}}}, \quad (8)$$

$$-g_{lm}^{2, \text{нec}} \cdot x_l^{2, \text{вироб}} + x_{lm}^{2, \text{нec}} = 0 \Big|_{l \in \Omega^{\text{ВТОР}}, m \in \Omega^{\text{ПЕС}}}, \quad (9)$$

$$\begin{aligned} -g_{lm}^{2, \text{нec}} \cdot x_l^{2, \text{вироб}} + x_{lm}^{2, \text{нec}} + u_{lm}^{2, \text{нec}} = 0 \\ x_{lm}^{2, \text{нec}} - x_{lm}^{2, \text{нec}, \text{MAX}} \leq 0 \end{aligned} \Big|_{l \in \Omega^{\text{ВТОР}}, m \in \Omega^{\text{ПЕС}}}, \quad (10)$$

$$-g_l^{2, \text{emp}} \cdot x_l^{2, \text{вироб}} + x_l^{2, \text{emp}} = 0 \Big|_{l \in \Omega^{\text{ВТОР}}}. \quad (11)$$

У рівняннях (3)–(11) $x_i^{1, \text{вироб}}$, $x_l^{2, \text{вироб}}$ – обсяги первинних (1) і вторинних (2) енергетичних ресурсів у i -му та l -му технологічному способі їх виробництва в натуральних одиницях обліку, відповідно; $x_{ik}^{1, \text{нec}}$, $x_{lm}^{2, \text{нec}}$ – обсяги «виробництва» фіктивних продуктів моделі енергозабезпечення, які подають витрати i -го первинного енергетичного ресурсу на k -ту потребу енергетичного сектора, а також l -го вторинного енергетичного ресурсу на m -ту потребу енергетичного сектора, в натуральних одиницях обліку, відповідно; $x_i^{1, \text{emp}}$, $x_l^{2, \text{emp}}$ – обсяги технологічних витрат (втрат) первинних (1) і вторинних (2) енергетичних ресурсів в натуральних одиницях обліку, відповідно; $X_i^{1, \text{номп}}$, $X_l^{2, \text{номп}}$ – обсяги потреби на первинні (1) і вторинні (2) енергетичні ресурси в системі енергозабезпечення з урахуванням обсягів кінцевого споживання, імпортування та експортування, в натуральних одиницях обліку, відповідно; C_i^1 , C_l^2 – ціна виробника первинних (1) і вторинних (2) енергетичних ресурсів у i -му та l -му технологічному способі їх виробництва, відповідно, грн/од. обсягу; $u_{ik}^{1, \text{нec}}$, $u_{lm}^{2, \text{нec}}$ – зрівнювальні змінні у рівняннях балансу фіктивних продуктів моделі енергозабезпечення, що забезпечують обмеженість слабкозмінних обсягів i -го первинного енергетичного ресурсу на k -ту потребу енергетичного сектора, а також l -го вторинного енергетичного ресурсу на m -ту потребу енергетичного сектора; $g_{ij}^{12, \text{вироб}}$ – технологічний коефіцієнт витрат i -го первинного енергетичного ресурсу у j -му технологічному способі виробництва вторинного продукту, натуральні одиниці обліку i -го продукту/натуральні одиниці обліку j -го продукту; $g_{ik}^{1, \text{нec}}$, $g_{lm}^{2, \text{нec}}$ – технологічні коефіцієнти «виробництва» фіктивних продуктів моделі енергозабезпечення, які подають витрати i -го первинного енергетичного ресурсу на k -ту потребу енергетичного сектора, а також l -го вторинного енергетичного

ресурсу на m -ту потребу енергетичного сектора, відповідно, відношення натуральних одиниць обліку l -го продукту та основного продукту m -ї потреби енергетичного сектора; $g_i^{1,emp}$, $g_i^{2,emp}$ – технологічні коефіцієнти «виробництва» фіктивних продуктів моделі енергозабезпечення, що подають технологічні витрати i -го первинного енергетичного ресурсу (1) і l -го вторинного енергетичного ресурсу (2) в процесах їх обігу в системі енергозабезпечення; $x_{ik}^{1,nec,MAX}$, $x_{lm}^{2,nec,MAX}$ – максимальні обсяги слабкозмінних витрат i -го первинного енергетичного ресурсу на k -ту потребу енергетичного сектора, а також l -го вторинного енергетичного ресурсу на m -ту потребу енергетичного сектора, відповідно, зафіксовані протягом тривалого часу спостереження стану енергетичного сектора; $\Omega^{ПЕРВ}$ – сукупність технологічних способів виробництва первинних палив – енергетичного вугілля, природного газу, твердого біопалива; $\Omega^{ВТОР}$ – сукупність технологічних способів виробництва вторинних ресурсів (електричної і теплової енергії); $\Omega^{ПЕС}$ – сукупність статей технологічних витрат на потреби енергетичного сектора: підприємства з видобування вугілля; видобування нафти й газу; електростанції, ТЕЦ, теплоцентралі; акумулюючі установки; інші енергетичні підприємства; $\Omega^{ПЕРЕТВ}$ – сукупність технологічних способів виробництва вторинних енергетичних ресурсів у секторі перетворення: електростанції, ТЕЦ, теплоцентралі тощо.

Модель енергозабезпечення (1)–(11), яка належить до класу моделей виробничого типу, містить групу технологічних способів виробництва натуральних вторинних енергетичних продуктів, таких як електрична і тепла енергія. Технологічні коефіцієнти цих способів обчислюються шляхом ділення обсягу витрат у секторі перетворення на обсяг виробітку відповідного вторинного продукту. Разом з цим у даному варіанті моделі безпосереднє врахування витрат на потреби енергетичного сектора і витрат у технологічному коефіцієнті виробництва вторинних енергетичних продуктів не є доцільним. Зокрема, аналіз продуктових балансів за період від 2012 р. до 2020 р. показує слабку залежність цих витрат від обсягів виробництва основних продуктів або й відсутність такої залежності. Тому з метою збереження структурної відповідності моделі енергозабезпечення до асортименту продуктів і переліку статей витрат цього звітнього статистичного документа врахування згаданих слабкозмінних витрат здійснюється шляхом запровадження відповідних фіктивних продуктів моделі, які «виробляються» в системі окремими технологічними способами і споживаються у рівняннях балансу натуральних енергетичних продуктів.

Крім того, продуктовий енергетичний баланс як набір даних обсягів виробітку і витрат для побудови технологічних способів моделі виробничого типу є неповним з точки зору наявності всієї необхідної інформації для визначення технологічних коефіцієнтів. Зокрема, обсяги таких вторинних енергоносіїв як електрична енергія і тепло, вказуються у відповідних балансах сукупно – загальними сумарними величинами. Водночас, витрати цих продуктів у секторі перетворення є диференційованими за певними напрямками витрат, наприклад електричні станції, теплоелектроцентралі, теплоцентралі. Зрозуміло, що ці способи виробництва поєднують досить різноманітні технології, а віднесення витрат первинних енергоносіїв у цих технологіях до загального обсягу виробництва вторинних продуктів вносить неприпустимо велику структурну похибку визначення технологічних коефіцієнтів. Дійсно, технології генерування електричної енергії атомними електростанціями, ВДЕ, теплоцентралями навіть не використовують спільних видів палива. Тому номенклатура продуктів і відповідно технологічних способів моделі енергозабезпечення підлягає розширенню шляхом додаткового розподілення способів генерування згаданих енергетичних продуктів. З метою визначення часток обсягів електричної енергії, що виробляються електричними станціями різних типів, теплоелектроцентралями та ВДЕ, можна використати додаткові звітні статистичні документи, що також належать до відкритих джерел енергетичної інформації.

Зокрема, обсяг виробництва електричної енергії на теплоелектроцентралях можна знайти безпосередньо в енергетичному балансі України. Цей показник міститься на перетині рядка «Теплоелектроцентралі (ТЕЦ)» і стовпчика «Електроенергія/Electricity» й наприклад для 2020 року він становить 1417 тис. т.н.є.

Разом з тим загальний обсяг виробництва електричної енергії згідно з цим документом є:

$$E_{\Sigma}^{EB} = E_{EC}^{EB} + E_{ТЕЦ}^{EB}, \quad (12)$$

де E_{EC}^{EB} – обсяг виробництва електроенергії всіма видами електричних станцій за виключенням ТЕЦ.

Крім того, як можна встановити з іншого статистичного документа – таблиці продуктового балансу електричної енергії Міжнародної Енергетичної Агенції для України, цей же загальний обсяг можна подати у вигляді наступної суми часток виробітку за видами використаних первинних джерел енергії:

$$E_{\Sigma}^{EBП MEA} = E_{Вугілля}^{EBП MEA} + E_{Нафта}^{EBП MEA} + E_{Природний газ}^{EBП MEA} + E_{Інші}^{EBП MEA}. \quad (13)$$

Виходячи з того, що теплові електростанції, за виключенням тих, що працюють на біопаливі, не використовують інших видів первинної енергії окрім вугілля, нафти (мазуту) та природного газу, можна записати:

$$E_{ТЕС} + E_{ТЕЦ} = E_{Вугілля}^{EBП MEA} + E_{Нафта}^{EBП MEA} + E_{Природний газ}^{EBП MEA}, \quad (14)$$

і тоді:

$$E_{ТЕС} + E_{ТЕЦ} = E_{\Sigma}^{EBП MEA} - E_{Інші}^{EBП MEA}. \quad (15)$$

У результаті для теплових електростанцій, які використовують вугілля, мазут і природний газ, із врахуванням попередніх співвідношень, маємо:

$$E_{ТЕС} = E_{\Sigma}^{EBП MEA} - E_{Інші}^{EBП MEA} - E_{ТЕЦ}^{EB}. \quad (16)$$

Саме цей обсяг слід вважати таким, витрати на виробництво якого зазначено у секторі перетворення викопних вуглецевмісних палив (вугілля природного газу) і мазуту топкового.

Очевидно також, слід визнати рівність обсягів виробництва електричної енергії, вказаних в продуктовому балансі MEA за видами палива, відповідним обсягам виробництва атомних електростанцій, вітрових та сонячних, а також електричних станцій на біопаливі.

Таким чином, здійснено розподіл загального обсягу електричної енергії між використовуваними у цій моделі технологічними способами її виробництва. Це дозволяє розрахувати відповідні технологічні коефіцієнти витрат натуральних продуктів моделі. Тут слід зазначити, що використання згаданих статистичних документів енергетичної звітності має велике значення для збереження можливості таких розрахунків в майбутньому, із урахуванням, наприклад, того, що навіть інформація про обсяги виробництва електричної енергії за наявними в Україні технологіями зникла з офіційного сайту Міністерства енергетики України вже декілька років тому.

Важливим показником моделі є відношення обсягів випуску електричної і теплової енергії ТЕЦ, який також можна отримати з енергетичного балансу України – випуск e/e $E_{ТЕЦ}^{EB}$ і теплової енергії $Q_{ТЕЦ}^{EB}$ вміщено тут на перетині рядка «Теплоелектроцентралі (ТЕЦ)» і стовпчика «Електроенергія/Electricity», а також на перетині рядка «Теплоелектроцентралі (ТЕЦ)» і стовпчика «Теплоенергія/Heat». Тоді вказане співвідношення можна використати як додаткове обмеження на інтенсивності технологічних способів у вигляді:

$$E_{ТЕЦ}^{EB} - h_{ТЕЦ} \cdot Q_{ТЕЦ}^{EB} = 0. \quad (17)$$

Разом з тим набір даних продуктового енергетичного балансу містить певний рівень структурної невизначеності, який не вдається усунути, використовуючи лише відкриті джерела енергетичної статистики, без залучення достатньо деталізованої галузевої інформації. Зокрема, показники витрат на власні потреби енергетичного сектора вміщені у цьому документі лише із

достатньо приблизним вказанням їх походження. Тому вони можуть бути віднесені лише до загального обсягу виробництва електричної і теплової енергії. Для врахування цих витрат у моделі передбачено виробництво фіктивного продукту, обсяг якого співпадає з відповідним обсягом витрат на власні потреби. Для виробництва цього обсягу споживається відповідний натуральний продукт, а обсяг виробленого фіктивного продукту споживається з розрахованим технологічним коефіцієнтом у технологічному способі виробництва загального обсягу електричної енергії. Вказаний технологічний коефіцієнт обчислюється як відношення показника витрат на власні потреби, що міститься у відповідній секції витрат продуктового енергетичного балансу, до згаданого загального обсягу. Застосування такого способу врахування витрат продуктів у межах енергетичного сектора дає можливість обмежити їх розраховані обсяги у зв'язку з слабкозмінною залежністю цих витрат від випуску основного натурального продукту.

У системі рівнянь моделі ця форма подання витрат на власні потреби енергетичного сектора, а також технологічних витрат (втрат) деяких продуктів, наприклад вугілля, представлена співвідношеннями (4)–(6).

Рівняння (1)–(11) подають модель оптимізації балансу продуктів з критерієм сукупних витрат на енергозабезпечення економіки. Як оптимізаційна модель вона може бути використана для виконання розрахунків обсягів енергозабезпечення за технологічними способами за різних умов чи варіантів, які визначаються, наприклад, відмінними цінами окремих виробників, обмеженнями на інтенсивності техспособів – гранично досяжними обсягами генерування згідно з встановленою потужністю та коефіцієнтом використання такої потужності.

Разом з тим існує потреба виконання численних розрахунків валових обсягів випуску енергетичних продуктів, або інтенсивностей використання технологічних способів в межах одного з таких варіантів (умов), зокрема при прогнозуванні кінцевого використання, задання допустимих обсягів імпорту та експорту тощо, або використання отриманої в оптимізаційному розрахунку структури випусків за технологічними способами для вирішення задач в інших галузях моделювання, наприклад створення деталізованої структури енергетичного комплексу для досліджень в теорії витрати-випуск.

З цією метою оптимізаційна модель енергозабезпечення (1)–(11) допускає різні варіанти агрегування. Зокрема, фіктивні продукти та відповідні технологічні способи витрат на власні потреби енергетичного сектора можуть бути агреговані у техспособі загального випуску відповідного основного продукту. Це призведе до перевизначення діагональних технологічних коефіцієнтів випуску і витрат на основі використання точних значень обсягів витрат на власні потреби і втрат. Інший вид агрегування полягає в підсумовуванні продуктів та техспособів різних видів генерування вторинних енергоносіїв. Така операція дає можливість точного визначення їх часток у сукупному обсязі виробітку як технологічних коефіцієнтів витрат техспособу виробництва цього сукупного обсягу.

Практична реалізація структури моделі енергозабезпечення, а також розрахунки енергетичного балансу виконувались у середовищі електронної таблиці Microsoft Excel пакета програм для офісу Microsoft Office 2016–2021. Крім того, з метою застосування симплекс-методу для розв'язування великих за обсягом (>200 невідомих) задач змішаної лінійної оптимізації з частково цілочисельними змінними, використано спеціалізоване зовнішнє програмне забезпечення, а саме

– додаток до електронної таблиці Microsoft Excel з відкритим програмним кодом OpenSolver 2.9.3 [22];

– бібліотека програм змішано-цілочисельної оптимізації Ipsolve 5.5.2.11 [23] та її інтерфейсний модуль до Microsoft Excel.

3. Результати

У відповідності до визначених цілей розробки моделі енергозабезпечення, вона була використана у серії розрахунків обсягів постачання основних енергетичних продуктів, що стосуються ретроспективного та прогнозного періодів аналізу енергетичних балансів. Зокрема, за допомогою

агрегованої моделі з квадратною технологічною матрицею, технологічні коефіцієнти якої обчислено за даними згаданих вище статистичних джерел для 2017 року, розраховано обсяги енергозабезпечення країни при «прогнозних» значеннях потреби 2020 року (табл. 2).

Таблиця 2. Розраховані обсяги енергозабезпечення у 2020 р.

ПОСТАЧАННЯ Й СПОЖИВАННЯ	Вугілля (млн т)	Природний газ (млрд м куб)	Мазути топкові (млн т)	Тверде біопаливо (ТДж)	Електро- енергія (ТВт·год)	Тепло (млн Гкал)
Виробництво з інших джерел	26,455	20,1204	0,028621	90686,57	153,8582	87,9733
Імпорт	5,861	10,177	0,057000	0,00	2,3000	0,00
Експорт	-4,264	0,00	0,00	0,00	-4,8000	0,00
Міжнародне бункерування	-	-	-	-	-	-
Зміна запасів	-	-	-	-	-	-
ВНУТРІШНЄ ПОСТАЧАННЯ	-	-	-	-	-	-
Міжпродуктові передачі	-	-	-	-	-	-
Статистичні розбіжності	-	-	-	-	-	-
ПЕРЕТВОРЕННЯ	-	-	-	-	-	-
Електростанції	-21,206	-0,578768	-0,020710	-24,57	-	-
ТЕЦ	-1,517	-4,903466	-0,034300	-5676,00	-	-
Теплоцентралі	-0,493	-6,124189	-0,016482	-	-	-
Доменні печі	-	-	-	-	-	-
Газові заводи	-	-	-	-	-	-
Виробництво коксу та брикетів	-	-	-	-	-	-
Нафтопереробні заводи	-	-	-	-	-	-
Інше перетворення	-	-	-	-	-	-
ВЛАСНЕ СПОЖИВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМ СЕКТОРОМ						
Підприємства з видобування вугілля	-0,017	-	-	-	-2,6367	-1,2091
Видобування нафти й газу	-	-0,748976	-	-	-0,4388	-1,0736
Електростанції, ТЕЦ, теплоцентралі	-0,174	-0,016633	-0,000129	-	-10,9747	-5,0214
Акумуляуючі установки	-	-	-	-	-1,5520	-
Інші енергетичні підприємства	-	-0,481948	-	-	-0,8717	-2,2396
Втрати	-0,0057	-0,653005	-	-	-16,5527	-6,6636
КІНЦЕВЕ СПОЖИВАННЯ	4,638	16,79012	0,014000	84986,00	118,3317	71,7660
ПРОМИСЛОВІСТЬ	3,484	3,5753	8	3164	45,888	35,912
Чорна металургія	2,129	1,8324	-	730	15,216	11,639
Хімічна і нафтохімічна	0,003	0,1770	-	76	3,964	7,595
Кольорова металургія	0,175	0,2018	-	2	1,489	2,952
Неметалеві мінеральні продукти	1,131	0,5902	4	583	2,435	0,658
Транспортне устаткування	-	0,1025	-	12	0,784	0,338
Машинобудування	0,003	0,1410	-	91	2,454	0,645
Гірничодобувна (за викл. палива)	0,001	0,2783	-	25	9,588	0,708
Харчова та тютюнова	0,042	0,2050	-	454	4,588	8,403
Целюлозно-паперова і поліграфічна	-	0,0262	-	1	0,920	1,437
Деревообробна та вироби з деревини	-	0,0019	-	1018	0,798	0,967
Будівництво	0,001	0,0100	4	72	0,957	0,122
Текстильна і шкіряна	-	0,0059	-	45	0,328	0,175
Інші види промисловості	0,000	0,0031	-	55	2,367	0,273
ТРАНСПОРТ	0,005	0,8396	-	-	5,713	-
Внутрішні авіаперевезення	-	-	-	-	-	-
Автомобільний	0,005	0,0230	-	-	-	-
Залізничний	-	-	-	-	4,607	-
Трубопровідний	-	0,8145	-	-	0,279	-
Внутрішнє судноплавство	-	-	-	-	-	-
Інші види транспорту	-	0,0021	-	-	0,827	-
ІНШІ	1,006	9,4927	5	81822	61,910	35,854
Побутовий сектор	0,203	8,2840	-	79250	36,554	18,961
Торгівля та послуги	0,795	1,0531	5	1414	21,559	15,156
Сільське господарство	0,008	0,1556	0	1158	3,777	1,736
Рибальство	-	0,0000	-	-	0,020	0,000
Інші споживачі	-	-	-	-	-	-

ПОСТАЧАННЯ Й СПОЖИВАННЯ	Вугілля (млн т)	Природний газ (млрд м куб)	Мазути топкові (млн т)	Тверде біопаливо (ТДж)	Електро- енергія (ТВт·год)	Тепло (млн Гкал)
НЕЕНЕРГЕТИЧНЕ ВИКОРИСТАННЯ	0,144	2,8826	1	-	-	-
Промисловий та енергетичний сектори, сектор перетворення	0,144	2,8826	1	-	-	-
у тому числі: сировина для промисловості	-	2,7593	-	-	-	-
На транспорті	-	-	-	-	-	-
В інших секторах	-	-	-	-	-	-

Результати цього розрахунку показали ефективність моделі як інструмента розрахунку, зокрема для виявлення змін у структурі енергозабезпечення, викликаних різними чинниками в енергетичному секторі [24]. Встановлено, що існують значні невідповідності розрахованих та фактичних значень обсягів постачання. Зокрема, розбіжності цих обсягів становлять: -12,8%, 8,5%, -615,6%, 5,9% за вугіллям енергетичним, природним газом, мазутом і біомасою, відповідно. Відмінності розрахованих і фактичних обсягів виробництва вторинних енергоносіїв – електричної і теплової енергії є значно меншими й дорівнюють -1,5% і 5,1% відповідно. Найбільша розбіжність -615,6% спостерігається в обсязі топкового мазуту. Її можна пояснити значним скороченням його використання у секторі перетворення – на ТЕС, ТЕЦ і в котельнях – з 0,056 млн т, 0,469 млн т і 0,028 млн т у 2017 р. до 0,018 млн т, 0,034 млн т і 0,017 млн т у 2020 р., відповідно, за співставних обсягів виробництва електричної і теплової енергії. Тобто, значне відхилення розрахованого «прогнозного» значення обсягу та його фактичного відповідника має місце через різку зміну технологічних коефіцієнтів витрат протягом 3-річного періоду. Такі відхилення можуть бути суттєво скорочені (усунуті) шляхом належного прогнозування розвитку/змін у використанні технологій енергетичного сектора і жодним чином не пов'язані з особливостями структури моделі енергозабезпечення чи порушенням її балансувальних властивостей. Крім того, значне зростання обсягу виробництва електроенергії ВДЕ у 2020 р., порівняно з 2017 р., супроводжувалось скороченням її генерування АЕС. За цих умов загальний обсяг виробництва електричної і теплової енергії на ТЕС, ТЕЦ і в котельнях був співставним з обсягом 2017 року. Тому зменшення споживання енергетичного вугілля у секторі перетворення на 17,3% призвело до підвищення використання природного газу на 15,1%. Ці технологічні зміни викликали появу розбіжностей між розрахованими та фактичними значеннями виробництва енергетичного вугілля й природного газу – 12,8% і 8,5% відповідно.

Прогнозні розрахунки обсягів енергозабезпечення у 2040 р. виконувались за умов розвитку паливних галузей, а також електро- і теплоенергетичного секторів, які передбачались до початку збройної агресії РФ в Україні. Результати розрахунків обсягів збалансованого енергозабезпечення країни основними видами енергетичних ресурсів уміщено до табл. 3 і 4.

Таблиця 3. Розраховані обсяги енергозабезпечення у 2040 р.

ПОСТАЧАННЯ Й СПОЖИВАННЯ	Вугілля (млн т)	Природний газ (млрд м куб)	Мазути топкові (млн т)	Тверде біопаливо (ТДж)	Електро- енергія (ТВт·год)	Тепло (млн Гкал)
Виробництво	26,009	31,990	0,00023	214896,9	181,558	76,259
- в тому числі:						
ТЕС					29,25850	
АЕС					97,70000	
ГЕС, ГАЕС					10,10000	
ТЕЦ					13,80000	42,6779
ВЕС					16,80000	
СЕС					10,80000	
БіоЕС					3,10000	
Теплоцентралі						31,3013
Теплоцентралі на біопаливі						2,2800
Імпорт	1,243	3,574	0,0661	-	3,000	-
Експорт	-	-	-	-	-6,000	-
ВНУТРІШНЄ ПОСТАЧАННЯ	-	-	-	-	-	-

ПОСТАЧАННЯ Й СПОЖИВАННЯ	Вугілля (млн т)	Природний газ (млрд м куб)	Мазути топкові (млн т)	Тверде біопаливо (ТДж)	Електроенергія (ТВт·год)	Тепло (млн Гкал)
ПЕРЕТВОРЕННЯ	-	-	-	-	-	-
Електростанції	-13,956	-0,381	-0,0140	-95,2	-	-
ТЕЦ	-1,434	-4,635	-0,0324	-5365,0	-	-
Теплоцентралі	-0,248	-3,078	-0,0083	-1181,7	-	-
ВЛАСНЕ СПОЖИВАННЯ ЕНЕРГОСЕКТОРОМ	-	-	-	-	-	-
Підприємства з видобування вугілля	-0,017	-	-	-	-2,020	-1,048
Видобування нафти й газу	-	-1,441	-	-	-0,518	-0,931
Електростанції, ТЕЦ, теплоцентралі	-0,172	-0,032	-0,000002	-	-10,736	-4,353
Акумуляуючі установки	-	-	-	-	-2,267	-
Інші енергетичні підприємства	-	-0,927	-	-	-1,029	-1,941
Втрати	-0,0060	-1,256	-	-	-18,389	-5,776
КІНЦЕВЕ СПОЖИВАННЯ	-11,420	-23,814	-0,0120	-208255,0	-143,600	-62,210

Таблиця 4. Розраховані обсяги енергозабезпечення у 2040 р. за базового сценарію розвитку вугільної промисловості

ПОСТАЧАННЯ Й СПОЖИВАННЯ	Вугілля (млн т)	Природний газ (млрд м куб)	Мазути топкові (млн т)	Тверде біопаливо (ТДж)	Електроенергія (ТВт·год)	Тепло (млн Гкал)
Виробництво	33,570	32,000	0,00760	214896,9	181,558	76,259
- в тому числі:						
ТЕС					44,99256	
АЕС					81,96594	
ГЕС, ГАЕС					10,10000	
ТЕЦ					13,80000	42,6779
ВЕС					16,80000	
СЕС					10,80000	
БіоЕС					3,10000	
Теплоцентралі						31,3013
Теплоцентралі на біопаливі						2,2800
Імпорт	1,243	3,789	0,0661	-	3,000	-
Експорт	-	-	-	-	-6,000	-
ВНУТРІШНЄ ПОСТАЧАННЯ	-	-	-	-	-	-
ПЕРЕТВОРЕННЯ	-	-	-	-	-	-
Електростанції	-21,461	-0,586	-0,0210	-95,2	-	-
ТЕЦ	-1,434	-4,635	-0,0324	-5365,0	-	-
Теплоцентралі	-0,248	-3,078	-0,0083	-1181,7	-	-
ВЛАСНЕ СПОЖИВАННЯ ЕНЕРГОСЕКТОРОМ	-	-	-	-	-	-
Підприємства з видобування вугілля	-0,022	-	-	-	-2,020	-1,048
Видобування нафти й газу	-	-1,449	-	-	-0,518	-0,931
Електростанції, ТЕЦ, теплоцентралі	-0,221	-0,032	-0,000034	-	-10,736	-4,353
Акумуляуючі установки	-	-	-	-	-2,267	-
Інші енергетичні підприємства	-	-0,932	-	-	-1,029	-1,941
Втрати	-0,0073	-1,263	-	-	-18,389	-5,776
КІНЦЕВЕ СПОЖИВАННЯ	-11,420	-23,814	-0,0120	-208255,0	-143,600	-62,210

Результати цих розрахунків показують, зокрема табл. 3, що за збереження темпів впровадження потужностей ВЕС і СЕС, передбачених у «Звіті з оцінки відповідності (достатності) генеруючих потужностей для покриття прогнозованого попиту на електричну енергію та забезпечення необхідного резерву у 2020 році» [25], та скорочення виробництва електричної енергії тепловими електростанціями до 29,259 ТВт·год у 2040 р., необхідні обсяги виробництва електроенергії атомними електростанціями мають бути 97,70 ТВт·год, відповідно. Очевидно, що отримані таким чином обсяги виробництва АЕС для 2040 р. є досяжними з точки зору КВВП – 80,8% у 2040 р., проте технологічно неприпустимими для ОЕС України через значний надлишок базової потужності і

дефіцит маневрової за характерних значень коефіцієнта форми графіка електричних навантажень. Тому в розрахунках прогнозних енергетичних балансів країни у 2040 р. (табл. 4) обмеження на обсяги генерування ТЕС було зліквідовано і, натомість, встановлено обмеження на граничний обсяг виробництва енергетичного вугілля. Як видно з табл. 4, у випадку наявності обмежень на виробництво електричної енергії атомними електростанціями, пов'язаних з надлишком базової потужності, потенціал видобутку енергетичного вугілля в країні дозволить виробити 44,993 ТВт·год електроенергії на ТЕС у базовому сценарії розвитку вугільної галузі. Обсяг виробництва атомними електростанціями, відповідно, становитиме 81,966 ТВт·год. Очевидно, що імплементація базового вугільного сценарію дозволить забезпечити паливом необхідну для електроенергетичного сектора структуру потужностей генерування електричної енергії.

4. Обговорення

Українські дослідження енергетичного сектора ускладнюються низькою якістю таблиць витрати-випуск та обмеженим доступом до обсягів та вартісних показників виробничої діяльності паливних галузей, зокрема нафто- та газовидобувних. Проте продуктивний енергетичний та енергетичний баланси, що складаються в стандартизованому форматі Міжнародної енергетичної агенції (МЕА), є єдиним джерелом інформації про обіг енергетичних ресурсів в країні. Ці баланси, разом з міжнародними енергетичними базами даних, які також належать до відкритих джерел, можуть стати інформаційною основою математичної моделі виробничого типу. Така модель може бути використана для побудови матриць прямих витрат теорії витрати-випуск В.В. Леонтьєва в натуральних одиницях виміру, з яких, у свою чергу, можна розрахувати блоки таблиці витрати-випуск для енергетичного сектора. Цей підхід є альтернативою дезагрегуванню енергетичного сектора в стандартних таблицях міжпродуктового балансу.

5. Висновки

Побудовано економіко-математичну модель виробничого типу, призначену для прогнозування структури та обсягів енергозабезпечення країни шляхом розрахунку збалансованих обсягів постачання основних видів вуглецевмісних палив, електричної і теплової енергії із врахуванням обсягів виробітку відновлюваних джерел енергії. Модель будується за специфічною структурою технологічних способів Л.В. Канторовича, яка на відміну від відомих використовує спеціальну процедуру їх нормування та містить підсистеми додаткових техспособів виробітку абстрактних продуктів, асортимент яких відповідає множині статей витрат продуктового енергетичного балансу. Це дозволило запропонувати матрицю умов моделі виробничого типу, що відповідає структурі секторів, статей випуску і витрат продуктового енергетичного балансу у форматі МЕА, і надало можливості прозорого коригування технологічних коефіцієнтів випуску і витрат при вирішенні задач прогнозування, а також дозволило запропонувати процедуру аналізу ретроспективних наборів даних продуктового енергетичного балансу щодо виявлення можливих неврахованих, необлікованих обсягів паливно-енергетичних продуктів, значних змін структури генерувальних потужностей та обсягів споживання і перетворення паливно-енергетичних ресурсів в енергетичному секторі країни.

Запропоновано метод розрахунку технологічних коефіцієнтів випуску й витрат матриці умов і обмежень моделі виробничого типу, що вперше використовує множину статистичних показників обсягів виробництва електричної і теплової енергії, диференційованих за видами палива, для визначення обсягів розподілу цих енергоносіїв між основними технологіями їх генерування, що дозволило значно скоротити структурну невизначеність технологічних способів моделі й підвищити точність розрахунку прогнозних обсягів енергозабезпечення, особливо при врахуванні структурних змін генерувальних потужностей ПЕК.

Виконано розрахунковий аналіз обсягових показників енергозабезпечення економіки України основними паливно-енергетичними ресурсами у 2020 році за допомогою агрегованої економіко-математичної моделі виробничого типу (за Л.В. Канторовичем), побудованої з використанням відкритих джерел даних щодо структури та обсягів енергетичного балансу 2017 року та прогнозних

показників постачання основних видів енергетичних ресурсів в економіку країни у 2040 р. за допомогою розробленої моделі енергозабезпечення.

Прогнозні обсяги постачання природного газу, не дивлячись на суттєве скорочення його споживання, зокрема в енергетичному секторі на виробництво теплової енергії, потребуватимуть імпортування цього виду палива з поступовим зниженням обсягів імпорту до 2040 року. За прогнозованого видобутку 32,3 млрд м³ у 2040 р., відповідно, необхідний імпорт становитиме 3,574 млрд м³. Потенціал видобутку енергетичного вугілля в країні дозволить виробити 44,993 ТВт·год електроенергії на ТЕС у базовому сценарії розвитку вугільної галузі. Обсяги виробництва атомних електростанцій, відповідно, становитимуть 81,966 ТВт·год.

Посилання

1. Каплін М.І., Білан Т.Р., Новицький І.Ю. Моделювання енергозабезпечення країни за структурою даних продуктового енергетичного балансу в форматі міжнародної енергетичної агенції. *Проблеми загальної енергетики*. 2022. Вип. 1-2 (68-69). С. 58—69. <https://doi.org/10.15407/pge2022.01-02.058>
2. Bilan T., Kaplin M., Makarov V., Perov M., Novitskii I., Zaporozhets A., Havrysh V., Nitsenko V. The Balance and Optimization Model of Coal Supply in the Flow Representation of Domestic Production and Imports: The Ukrainian Case Study. *Energies*. 2022. 15(21): 8103. <https://doi.org/10.3390/en15218103>
3. Леонтьев В.В. Межотраслевая экономика. М.: Экономика, 1997. 479 с.
4. Koopmans Tj.C. Optimum utilization of the transportation system. In: D.H. Leavens (Ed.), *The Econometric Society Meeting*. Washington, D.C., 1947. Proc. of the International Statistical Conf. 1948. Vol. V. P. 136—146.
5. Koopmans Tj.C., Reiter S. A model of transportation. In: Tj.C. Koopmans (Ed.), *Activity Analysis of Production and Allocation*. Wiley, New York, 1951. Proceedings of a Conference. P. 222—259.
6. Koopmans T.C. Analysis of production as an efficient combination of activities. *Activity analysis of production and allocation*. Cowles Commission Monograph No. 13. New York, Wiley, 1951. P. 33—97.
7. Канторович Л.В. Математические методы организации и планирования производства. Л.: Изд-во ЛГУ, 1939. *Применение математики в экономических исследованиях*. М.: Соцэкгиз, 1959. С. 235—275.
8. Канторович Л.В. Экономический расчет наилучшего использования ресурсов. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 347 с.
9. Кулик М.Н. Методы системного анализа в энергетических исследованиях. К.: Наукова думка, 1987. 198 с.
10. Добровольский В.К. Экономико-математическое моделирование (Вопросы методологии). К.: Наукова думка, 1975. 184 с.
11. Ahuja R.K., Magnati T.L., Orlin J.B. *Network Flows: Theory, Algorithms and Applications*. New Jersey: Prentice Hall, 1993. 864 p.
12. Bazaraa M.S., Jarvis J.J. *Linear Programming and Network Flows*. New York: Wiley, 1977. 574 p.
13. Bertsekas D.P., Nedić A., Ozdaglar A.E. *Convex Analysis and Optimization*. Belmont, Massachusetts: Athena Scientific, 2003. 560 p.
14. Bertsekas D.P. *Network Optimization: Continuous and Discrete Models*. Belmont, Massachusetts: Athena Scientific, 1998. 608 p.
15. Suwala W. Modelling adaptation of the coal industry to sustainability conditions. *Energy*. 2008. 33. P. 1015—1026.
16. Продуктовый энергетичний баланс України за 2017 рік. URL: http://ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2014/energ/en_bal_prod/Bal_prod_2017_u.xls (дата звернення: 02.03.2023).
17. Продуктовый энергетичний баланс України за 2020 рік. URL: http://ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2021/energ/En_bal_prod/Bal_prod_2020_ue.xls (дата звернення: 02.03.2023).
18. Енергетичний баланс МЕА для України за 2017 рік. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tables?country=UKRAINE&energy=Balances&year=2017> (дата звернення: 02.03.2023).
19. Продуктовый энергетичний баланс МЕА для України за 2017 рік, електрична і тепла енергія. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tables?country=UKRAINE&energy=Electricity&year=2017> (дата звернення: 02.03.2023).
20. Стогній О.В., Каплін М.І. Структурні особливості балансово-оптимізаційної моделі паливозабезпечення країни. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2011. Спец. вип. Ч. 1. С. 138—145.
21. Каплін М.І. Оптимізація системи паливозабезпечення на основі мережного подання модифікованої моделі виробничого типу: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Київ, 2015. 20 с.
22. OpenSolver, the Open Source linear, integer and non-linear optimizer for Microsoft Excel. URL: <https://opensolver.org/> (дата звернення: 02.03.2023).
23. Lpsolve, Mixed Integer Linear Programming (MILP) solver. URL: <https://sourceforge.net/projects/lpsolve/> (дата звернення: 02.03.2023).

24. Макаров В.М., Перов М.О. Сценарії розвитку вугільної галузі при прогнозованих змінах структури використання вугільної продукції в економіці країни. *Проблеми загальної енергетики*. 2022. Вип. 1-2(68-69). С. 70—81. <https://doi.org/10.15407/pge2022.01-02.070>
25. Звіт з оцінки відповідності (достатності) генеруючих потужностей для покриття прогнозованого попиту на електричну енергію та забезпечення необхідного резерву у 2020 році. URL: <https://ua.energy/wp-content/uploads/2021/06/Zvit-z-otsinky-vidpovidnosti-dostatnosti-generuyuchykh-potuzhnostej-dlya-pokryttya-prognozovanogo-popytu-na-elektrychnu-energiyu-ta-zabezpechennya-neobhidnogo-rezervu-u-2020.pdf>. (дата звернення: 22.12.2021).

AGGREGATED ENERGY SUPPLY MODEL ACCORDING TO PRODUCT ENERGY BALANCE DATA STRUCTURE

Mykola Kaplin, PhD (Engin.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-9328-4257>

Tetiana Bilan, PhD (Engin.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-0280-6716>

General Energy Institute of NAS of Ukraine, 172, Antonovycha St., Kyiv, 03150, Ukraine

*Corresponding author: bilan.ize@gmail.com

Abstract. *An economic-mathematical model of the production type was developed, intended for forecasting the country's energy supply by calculating the balanced supply of carbon-containing fuels, electricity and heat from fossil fuel and renewable energy sources. The model was built on the basis of open data sources according to the specific structure of technological methods by L.V. Kantorovich, which, unlike the known ones, uses subsystems for the production of abstract products that correspond to the range of outputs and inputs of the product energy balance, and also uses procedures for their selective aggregation to build various forms of inter-product balance matrices. This allowed us to obtain a tool for forecasting and assessing energy balances that is resistant to the growing limitations of information support, which is distinguished by a new system of conditions for a production-type model for the expanded range of the International Energy Agency's product energy balance, as well as a set of technological methods proposed for the first time by L.V. Kantorovich, which together determined the structure of output, costs and product links of individual producers of the energy supply system within the framework of a mutually agreed multi-product balance. The proposed model provides opportunities for using statistical and technological approaches to determining output and cost coefficients in solving forecasting problems, applying inherent means of analyzing retrospective balances to identify unaccounted volumes of FER, as well as volumes of their consumption and transformation in the country's energy sector with significant changes in the structure of electricity and heat generation capacities. The forecasted volumes of supply of the main types of energy resources obtained in the calculations using the developed energy supply model allowed us to assert that, given the indicators of energy efficiency achieved in 2020, the country's energy supply system is able to meet the country's needs mainly through the development of domestic fuel bases.*

Keywords: energy supply, product energy balance, production type model.

References

1. Kaplin, M.I., Bilan, T.R., & Novytskyi, I.Yu. (2022). Modeling the country's energy supply based on the data structure of the product energy balance in the format of the international energy agency. *The Problems of General Energy*, 1-2 (68-69), 58–69 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/pge2022.01-02.058>
2. Bilan, T., Kaplin, M., Makarov, V., Perov, M., Novitskii, I., Zaporozhets, A., Havrysh, V., & Nitsenko, V. (2022). The Balance and Optimization Model of Coal Supply in the Flow Representation of Domestic Production and Imports: The Ukrainian Case Study. *Energies*, 15, 8103. <https://doi.org/10.3390/en15218103>
3. Leontiev, V.V. (1997). *Interindustry economy*. M.: Ekonomika, 479 p. [in Russian].
4. Koopmans, Tj. C. (1948). Optimum utilization of the transportation system. In: D.H. Leavens (Ed.). *The Econometric Society Meeting*. Washington, D.C., 1947. Proc. of the International Statistical Conf., V, 136–146.
5. Koopmans, Tj. C., & Reiter, S. (1951). A model of transportation. In: Tj.C. Koopmans (Ed.). *Activity Analysis of Production and Allocation*. Wiley, New York, 1951. Proceedings of a Conference, 222–259.
6. Koopmans, T.C. (1951). Analysis of production as an efficient combination of activities. In: *Activity analysis of production and allocation*. Cowles Commission Monograph, 13, New York, Wiley, 33–97.
7. Kantorovich, L.V. (1959). Mathematical methods of organization and production planning. In: *Application of mathematics in economic research. L.: Publishing House of LGU, 1939*. M.: Socekgiz, 235–275 [in Russian].
8. Kantorovich, L.V. (1959). Economic calculation of the best use of resources. M.: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 347 p. [in Russian].

9. Kulik, M.N. (1987). *Methods of system analysis in energy research*. K.: Naukova Dumka, 198 p. [in Russian].
10. Dobrovolsky, V.K. (1975). *Economic and mathematical modeling (Issues of methodology)*. K.: Naukova Dumka, 184 p. [in Russian].
11. Ahuja, R.K., Magnati, T.L., & Orlin, J.B. (1993). *Network Flows: Theory, Algorithms and Applications*. New Jersey, Prentice Hall, 864 p.
12. Bazaraa, M.S., & Jarvis, J.J. (1977). *Linear Programming and Network Flows*. New York, Wiley, 574 p.
13. Bertsekas, D.P., Nedić, A., & Ozdaglar, A.E. (2003). *Convex Analysis and Optimization*. Belmont, Massachusetts, Athena Scientific, 560 p.
14. Bertsekas, D.P. (1998). *Network Optimization: Continuous and Discrete Models*. Belmont, Massachusetts, Athena Scientific, 608 p.
15. Suwala W. (2008). Modelling adaptation of the coal industry to sustainability conditions. *Energy*, 33, 1015–1026.
16. Product energy balance of Ukraine for 2017. URL: http://ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2014/energ/en_bal_prod/Bal_prod_2017_u.xls (Last accessed: 02.03.2023).
17. Product energy balance of Ukraine for 2020. URL: http://ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2021/energ/En_bal_prod/Bal_prod_2020_ue.xls (Last accessed: 02.03.2023).
18. IEA energy balance for Ukraine for 2017. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tables?country=UKRAINE&energy=Balances&year=2017> (Last accessed: 02.03.2023).
19. IEA product energy balance for Ukraine for 2017, electric and thermal energy. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tables?country=UKRAINE&energy=Electricity&year=2017> (Last accessed: 02.03.2023).
20. Stognii, O.V., & Kaplin, M.I. (2011). Structural features of the balance-optimization model of the country's fuel supply. *Proceedings of the Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine*, Special issue, Part 1, 138–145 [in Ukrainian].
21. Kaplin, M.I. (2015). Optimization of the fuel supply system based on the network representation of the modified model of the production type [Unpublished PhD dissertation abstract]. General Energy Institute of NAS of Ukraine. Kyiv, 20 p. [in Ukrainian].
22. OpenSolver, the Open Source linear, integer and non-linear optimizer for Microsoft Excel. URL: <https://opensolver.org/> (Last accessed: 02.03.2023).
23. Lpsolve, Mixed Integer Linear Programming (MILP) solver URL: <https://sourceforge.net/projects/lpsolve/> (Last accessed: 02.03.2023).
24. Makarov, V.M., & Perov, M.O. (2022). Scenarios for the development of the coal industry with projected changes in the structure of the use of coal products in the country's economy. *The Problems of General Energy*, 1-2(68-69), 70–81 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/pge2022.01-02.070>
25. Zvit z otsinky vidpovidnosti (dostatnosti) heneruyuchykh potuzhnostey dlya pokryttya prohnovovanoho popytu na elektrychnu enerhiyu ta zabezpechennya neobkhidnoho rezervu u 2020 rotsi. URL: <https://ua.energy/wp-content/uploads/2021/06/Zvit-z-otsinky-vidpovidnosti-dostatnosti-generuyuchykh-potuzhnostej-dlya-pokryttya-prognovovanogo-popytu-na-elektrychnu-energiyu-ta-zabezpechennya-neobhidnogo-rezervu-u-2020.pdf>. (Last accessed: 22.12.2021) [in Ukrainian].

Надійшла до редколегії: 03.05.2023