

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ І СИСТЕМ

ISSN 2522-4344 (Online), ISSN 1562-8965 (Print). The problems of general energy, 2018, 2(53): 5–14
doi: <https://doi.org/10.15407/pge2018.02.005>

УДК 004.942:620.9

М. І. КАПЛІН, канд. техн. наук, **Т. Р. БІЛАН**, канд. техн. наук
Інститут загальної енергетики НАН України, вул. Антоновича, 172,
м. Київ, 03150, Україна

БАЛАНСОВО-ОПТИМІЗАЦІЙНА МОДЕЛЬ ПАЛИВОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ НА ОСНОВІ МЕРЕЖНОГО ПОДАННЯ ВАРІАНТІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ

Запропоновано мережне подання економіко-математичної моделі вибору варіантів паливозабезпечення теплової енергетики за обмежених обсягів постачання окремих видів вугільного палива. Розглянуто варіанти змін інтенсивностей використання встановленої потужності електричних станцій, можливості їх переобладнання на альтернативні види палива. Наведено потокову структуру ланцюгів постачання вугілля різних марочних груп та відповідних способів генерування електричної енергії. Для цієї структури пояснено властивості частково-цілочисельної задачі лінійного програмування, що забезпечують «перемикання» ланцюгів паливозабезпечення залежно від потреби на електричну енергію, наявності необхідних обсягів палива відповідного виду.

Ключові слова: тепла енергетика, паливозабезпечення електростанцій, мережна модель, антрацитне вугілля.

Ключовою відмінністю техніко-економічних моделей систем енергозабезпечення від моделей постачання паливних продуктів є необхідність врахування технологій перетворення видів енергії – виробництва вторинних енергоносіїв, які є суттєво багатопродуктовими, а також споживають певний асортимент первинних палив. Крім того, виробничі потужності цих технологій – атомні й теплові електростанції, теплоелектроцентралі, відновлювані джерела енергії розглядаються як окремі суб'єкти енергетичних ринків, що надають прогнози можливих граничних обсягів виробництва та відповідних цін на період моделювання. Це породжує необхідність створення багатопродуктових лінійних моделей із заданими граничними обсягами окремих виробників, що призводить до частково цілочисельних задач лінійного програмування з обмеженнями, що описують технології виробників та споживачів первинних і вторинних енергоносіїв.

Технологічний підхід в економіко-математичному моделюванні багатопродуктових виробни-

чо-транспортних систем спирається на поняття технологічного способу [1, 2]. Модель виробничого типу на мінімум витрат [3] в межах цього підходу має вигляд:

$$\begin{aligned} \|g_i^{js}\| \cdot \{x_{js}\} &= \{y_i^0\} \\ \|d_e^{js}\| \cdot \{x_{js}\} - \|\lambda_e^e\| \cdot \{y_e'\} &= \{0_e\} \quad (1) \\ \|r_z^{js}\| \cdot \{x_{js}\} + \|\lambda_r^r\| \cdot \{r_r''\} &= \{r_r^0\} \\ [c^{js}] \cdot \{x_{js}\} &\rightarrow \min, \end{aligned}$$

де c^{js} – цільовий вектор витрат (собівартостей або зведених витрат) за технологічними способами j , x_{js} – валові випуски продуктів, y_i^0 – фіксовані обсяги кінцевих продуктів, r_r^0 – обсяги наявних ресурсів, g_i^{js} , d_e^{js} – технологічні коефіцієнти випуску-витрат основних і додаткових продуктів, відповідно, r_z^{js} – технологічні коефіцієнти витрат екзогенних ресурсів, y_e' , r_r'' – надлишкові (недостатні) обсяги додаткових продуктів і екзогенних ресурсів, $\|\lambda_e^e\|$, $\|\lambda_r^r\|$ – одиничні матриці.

© М. І. КАПЛІН, Т. Р. БІЛАН, 2018

Технологічний спосіб надає узагальнену взаємоузгоджену форму опису різномірних виробництв досліджуваної системи. Структура рівнянь балансу моделі (1) визначається попередньо розробленим переліком її продуктів і технологічних способів.

Зокрема, нижче наведено економіко-математичну модель виробничого типу, розроблену для вирішення задачі вибору доцільних варіантів паливозабезпечення та функціонування теплових електростанцій й постачання відповідних видів вугільних продуктів, а також інших, необхідних у цій технології видів палива, з урахуванням обмежень на обсяги постачання вугільної продукції дефіцитних марочних груп.

Вироблення електричної енергії здійснюється окремими групами технологічних способів, у яких споживається вугільна продукція антрацитової та газової марочних груп та інших видів палива. Модель подається системою рівнянь балансу обсягів продуктів – палива та електричної енергії. Це співвідношення

– формування загального обсягу марочних груп $A+П$ та $Г+ДГ+Д$ для вугілля власного видобутку й імпортованого:

$$g_m^{B,d} x_m^d - x_{m,l}^d = 0 \left| \begin{array}{l} m=1, M_l \\ l=A+П: m=A, П \\ l=Г+ДГ+Г: m=Г, ДГ, Г \\ d=вв, імн \end{array} \right. \quad (2)$$

$$\sum_{m=1}^{M_l} x_{m,l}^d - X_l^d = 0 \left| \begin{array}{l} l=A+П, Г+ДГ+Д \end{array} \right.$$

– розподілу сумарних обсягів вугілля марочних груп $A+П$, $Г+ДГ+Д$ власного видобутку та імпортованих, а також природного газу між електростанціями

$$X_i^d - \sum_{j=1}^{N_{TEC}+1} \left(\sum_{k_j \in V_j} a_{i,k_j} \cdot x_{i,k_j}^d \right) = 0 \left| \begin{array}{l} i \in \Omega_{нал} = A+П, Г+ДГ+Г, природний газ, \\ \text{коксівний газ, доменний газ, мазут,} \\ \text{нафтозаводський газ, інші нафтопродукти,} \\ d=вв, імн \end{array} \right. \quad (3)$$

– споживання вугілля марочних груп $A+П$ й $Г+ДГ+Д$ власного видобутку та імпортованого, а також природного газу для підсвічування при виробітку електричної енергії на TEC і та всіх $TEЦ$ ($i = N_{TEC} + 1$)

$$x_{i,k_j}^d - g_{i,k_j}^E \cdot e_{k_j}^d = 0 \left| \begin{array}{l} j=1, N_{TEC}+1 \\ k_j \in V_j \\ i \in \Omega_{нал} \\ d=вв, імн \end{array} \right. \quad (4)$$

$$g_{E,k_j}^E \cdot e_{k_j}^d - e_{k_j}^{d,\Sigma} = 0 \left| \begin{array}{l} j=1, N_{TEC}+1 \\ k_j \in V_j \\ d=вв, імн \end{array} \right. \quad (5)$$

– виробітку електричної енергії на TEC і із споживанням власного й імпортованого вугілля марочних груп $A+П$ й $Г+ДГ+Д$

$$\sum_{d=вв, імн} e_{k_j}^{d,\Sigma} - e_{k_j}^{\Sigma} = 0 \left| \begin{array}{l} j=1, N_{TEC}+1 \\ k_j \in V_j \end{array} \right. \quad (6)$$

– утворення фіксованого обсягу електричної енергії, що відповідає нормальному (фактичному) КВВП TEC і із споживанням вугілля марочної групи $A+П$, а також нормальному та максимальному КВВП TEC і із споживанням вугілля марочної групи $Г+ДГ+Г$

$$e_{k_j}^{\Sigma} - \theta_{k_j} \cdot E_{k_j} = 0 \left| \begin{array}{l} j=1, N_{TEC}+1 \\ k_j \in V_j \end{array} \right. \quad (7)$$

– вибору єдиного варіанту функціонування TEC із трьох можливих – на марочній групі $A+П$ з нормальним КВВП і марочній групі $Г+ДГ+Д$ з нормальним чи максимальним КВВП

$$\sum_{k_j \in V_j} \theta_{k_j} - \theta_{j,вз} = 0 \left| \begin{array}{l} j=1, N_{TEC} \end{array} \right. \quad (8)$$

$$\theta_{j,вз} = \begin{cases} 0, 1 - j \in \Theta_{штатне паливо} A+П \\ 1 - j \in \Theta_{штатне паливо} Г+ДГ+Г \end{cases}$$

– забезпечення потреби на електричну енергію, вироблену в теплоенергетичному секторі

$$\sum_{j=1}^{N_{TEC}+1} \sum_{k_j \in V_j} e_{k_j}^{\Sigma} - e_{вз}^{\Sigma} = E_{потр}^{\Sigma} \quad (9)$$

де $g_m^{B,d}$ – технологічний коефіцієнт витрат і втрат моделі виробничого типу в технологічному способі постачання вугілля марки m , $m = A, П, Г, ДГ, Г$ з джерела d ; x_m^d – сукупний обсяг постачання в сектор теплової енергетики вугілля марки m з джерела d ; $x_{m,l}^d$ – обсягова частка вугілля марки m з джерела d у сукупному обсязі постачання вугільного палива марочної групи l , $l = A+П, Г+ДГ+Г$; X_l^d – сукупний обсяг постачання вугілля марочної групи l з джерела d ; M_l – кількість марок вугілля у марочній групі l ; N_{TEC} – кількість TEC у секторі теплової енергетики; a_{i,k_j} – технологічний коефіцієнт постачання палива i на TEC j і всі $TEЦ$ ($j = N_{TEC} + 1$) у технологічному способі варіанту k_j виробітку електричної енергії; V_j – множина варіантів функціонування TEC j : ($A+П$, норм. КВВП), ($Г+ДГ+Д$, норм. КВВП),

($\Gamma+ДГ+Д$, підвищ. КВВП); g_{i,k_j}^E – технологічний коефіцієнт витрат палива i у технологічному способі варіанту k_j виробітку електричної енергії $ТЕС j$ і всіма $ТЕЦ (j = N_{ТЕС} + 1)$; x_{i,k_j}^d – обсяги палива i з джерела d , що споживаються $ТЕС j (j = 1, N_{ТЕС})$ та всіма $ТЕЦ (j = N_{ТЕС} + 1)$ за варіанту роботи k_j ; $e_{k_j}^d$ – обсяги електричної енергії, виробленої $ТЕС j (j = 1, N_{ТЕС})$ та всіма $ТЕЦ (j = N_{ТЕС} + 1)$, за варіанту роботи k_j при споживанні палива i з джерела d ; g_{E,k_j}^E – технологічні коефіцієнти витрат і втрат електричної енергії на власні потреби $ТЕС (ТЕЦ)$ за варіанту роботи k_j ; $e_{k_j}^{d,\Sigma}$ – обсягові частки електричної енергії, виробленої $ТЕС j (j = 1, N_{ТЕС})$ та всіма $ТЕЦ (j = N_{ТЕС} + 1)$, за варіанту роботи k_j при споживанні палива з джерела d ; $e_{k_j}^{\Sigma}$ – сукупні обсяги електричної енергії, виробленої $ТЕС j (j = 1, N_{ТЕС})$ та всіма $ТЕЦ (j = N_{ТЕС} + 1)$, за варіанту роботи k_j ; E_{k_j} – фіксовані річні обсяги електричної енергії, що виробляються $ТЕС j (j = 1, N_{ТЕС})$ та всіма $ТЕЦ (j = N_{ТЕС} + 1)$, за варіанту роботи k_j ; θ_{k_j} – бінарні інтенсивності технологічних способів моделі виробничого типу, що подають виробництво фіксованих річних обсягів електричної енергії $ТЕС j (j = 1, N_{ТЕС})$ та всіма $ТЕЦ (j = N_{ТЕС} + 1)$, за варіанту роботи k_j ; $\theta_{j,v3}$ – бінарна вирівнювальна змінна вибору варіанту роботи $ТЕС j (j = 1, N_{ТЕС})$ і $ТЕЦ (j = N_{ТЕС} + 1)$, що дорівнює 1 для $ТЕС$ зі штатним паливом з марочної групи $\Gamma+ДГ+Д$ й може набувати значень 0 і 1 для $ТЕС$ на групі марок $A+П$; e_{v3} – вирівнювальна змінна рівняння балансу електричної енергії теплоенергетичного сектора ПЕК; $E_{потр}^{\Sigma}$ – загальний потрібний (планований) виробіток електричної енергії в теплоенергетичному секторі ПЕК; $z_A^d, z_{II}^d, z_{\Gamma}^d, z_{ДГ}^d, z_D^d$ – питомі зведені витрати на постачання вугільного палива марок $A, II, \Gamma, ДГ, Д$, з джерела d , відповідно, d – власний видобуток, імпортування; z_{ng}^d, z_i^d – питомі зведені витрати на постачання природного газу й інших видів палива, відповідно, i – коксівний газ, доменний газ, мазут, нафтозаводський газ, інші нафтопродукти, тверде біопаливо.

Вибір доцільного варіанту функціонування $ТЕС$, включно з можливістю їх переобладнання на спалювання альтернативних видів палива здійснюється за критерієм загальних витрат на паливозабезпечення

$$\sum_{d=ob, imn} \left(z_A^d \cdot X_A^d + z_{II}^d \cdot X_{II}^d + z_{\Gamma}^d \cdot X_{\Gamma}^d + z_{ДГ}^d \cdot X_{ДГ}^d + z_D^d \cdot X_D^d + z_{ng}^d \cdot X_{ng}^d \right) + \sum_i z_i \cdot X_i \rightarrow \min. \quad (10)$$

Фрагмент структури технологічної матриці моделі виробничого типу, що відповідає рівнянням (2) – (9), для прикладу Зміївської $ТЕС$ наведено в табл. 1.

Разом з тим, існує низка потокових моделей енергетичного балансу – EFOM, MARKAL, MESSAGE, TIMES [4, 5], що первісно подають структуру системи у вигляді мережної схеми виробітку, перетворення й споживання енергоносіїв. Ці моделі характеризуються наочністю відображення енергетичних потоків. Проте технології виробництва й споживання енергоресурсів подаються в них великим переліком спеціалізованих підмоделей вузлів мережної системи, що значно ускладнює використання цього класу моделей в умовах недостатньої, укрупненої, агрегованої інформації. У роботах [6–8] здійснено спробу поєднати переваги згаданих напрямів енергетичного моделювання. Тут мережне подання використовується для узагальнення опису структури продуктових зв'язків системи енергозабезпечення при формуванні технологічної матриці моделі виробничого типу. Задачу визначення потоку мінімальної вартості сформульовано в наступному вигляді.

Необхідно надати мінімум сукупній вартості виробництва (перетворення) й транспортування потоків паливно-енергетичних ресурсів

$$\sum_{i=1}^{N_B} C_i^e \cdot X_{i,e} + \sum_{r \in \Omega_{i,oux}} C_r^l \cdot X_{ir,ex}^l \rightarrow \min \quad (11)$$

за умов балансу їх обсягів у вузлах і лініях мережної енергетичної системи

$$\begin{aligned} & \text{(I)} \quad g_{i,e} \cdot X_{i,e} + \sum_{r \in \Omega_{i,oux}} X_{ir,ex}^e - X_{i,\Sigma} = 0, \\ & \text{(II)} \quad g_i \cdot X_{i,\Sigma} - \sum_{r \in \Omega_{i,oux}} X_{kr,ex}^l = Y_{i,c} \quad (12) \\ & \text{(III)} \quad - X_{ir,oux}^l \Big|_{r \in \Omega_{i,oux}} + g_r \cdot X_{kr,ex}^l \Big|_{r \in \Omega_{i,oux}} = 0, \\ & \text{(IV)} \end{aligned}$$

Таблиця 1 — Фрагмент набору даних моделі виробничого типу паливазабезпечення Зміївської ТЕС

Технологічні способи	ЗМІЇВСЬКА ТЕС										У							
	А	Б	В	Г	Д	Е	И	І	К	Л		М	Н	О	П	Р	С	Т
Продукти й ресурси	Імпортоване А, млн т	А власного видобутку, млн т	Г імпорт, млн т	Г власного видобутку, млн т	Електроенергія на А, млрд кВт·год	Електроенергія на А, млрд кВт·год	Електроенергія на А, млрд кВт·год	Електроенергія на А, млрд кВт·год	Електроенергія на А, млрд кВт·год	Електроенергія на А, млрд кВт·год	Електроенергія на А, млрд кВт·год	Електроенергія на А, млрд кВт·год	Електроенергія на А, млрд кВт·год	Електроенергія на А, млрд кВт·год	Електроенергія на А, млрд кВт·год	Електроенергія на А, млрд кВт·год	Електроенергія на А, млрд кВт·год	Електроенергія на А, млрд кВт·год
А+П, власний видобуток, всього	-1																	
Д+ДГ+Г, власний видобуток, всього	-1																	
А+П, імпорт, всього	-1																	
Д+ДГ+Г, імпорт, всього	-1																	
Природний газ, млрд м ³	-0,030 -0,030 -0,030 -0,030																	
Маут, тис т	-0,299 -0,299 -0,299 -0,299																	
Імпортоване А, млн т	-0,458																	
А власного видобутку, млн т	1																	
Г імпортоване, млн т	1																	
Г власного видобутку, млн т	1																	
Електрична енергія на імпортованому А, млрд кВт·год	1																	
Електрична енергія на АШ власного видобутку, млрд кВт·год	1																	
Електрична енергія на імпортованому Г, млрд кВт·год	-1																	
Електрична енергія на Г власного видобутку, млрд кВт·год	1																	
Е/Е на А, підсумовування	1 1 -1																	
Е/Е на А, всього, млрд кВт·год	1																	
Е/Е на Г, підсумовування	1 1 1																	
Е/Е на Г, всього, млрд кВт·год	1																	
Електрична енергія, підсумовування	-4,874																	
Електрична енергія, всього, млрд кВт·год	-7,053 -11,747																	
	1 1 1 1 -1																	
	1 1 -1																	

паливна підсистема (рис. 1), а також підсистеми паливозабезпечення й виробітку електричної енергії *ТЕС* і *ТЕЦ* (рис. 2). Поточкова структура *ТЕС* відображає можливості паливозабезпечення вугіллям антрацитової (марки *А* і *П*), або газової (*Г*, *ДГ* і *Д*) групи марок, що відповідає повній заміні енергоблоків станції під час реконструкції. Передбачено також споживання суміші вугільного палива цих груп марок (рис. 2, б). Виробництво електроенергії може здійснюватися за нормального значення коефіцієнта використання встановленої потужності (КВВП), або максимально-досяжного його рівня при роботі на вугіллі газової групи марок. Варіант функціонування *ТЕС* з підвищеним КВВП розгля-

нуто для забезпечення необхідного загального виробітку електроенергії енергосистемою при зупинці енергоблоків на антрацитовому вугіллі через дефіцит цього виду палива. Кожному варіанту роботи *ТЕС* у структурі її поточкового подання відповідає вузол з фіксованим значенням річного обсягу виробітку, що визначається КВВП. Таким вузлом, згідно з (12), співставляється група простих технологічних способів моделі виробничого типу. Технологічний коефіцієнт техспособу виробітку вихідного потоку вузла у цій групі дорівнює згаданому обсягу річного виробництва електроенергії, а відповідна інтенсивність використання цього техспособу є бінарною змінною моделі, що визначає ви-

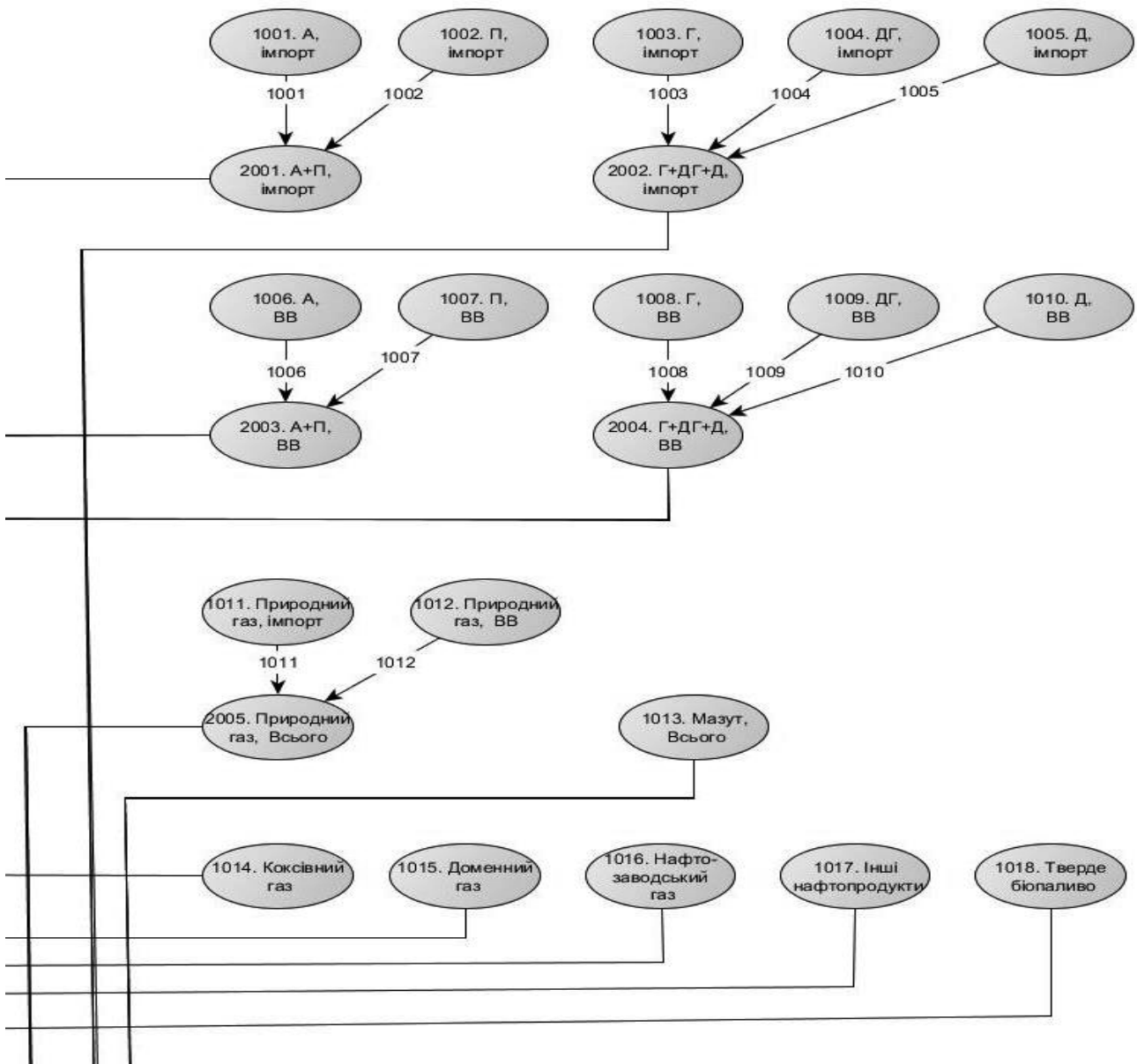


Рисунок 1. Структура паливної підсистеми енергетичної системи в потоковому поданні

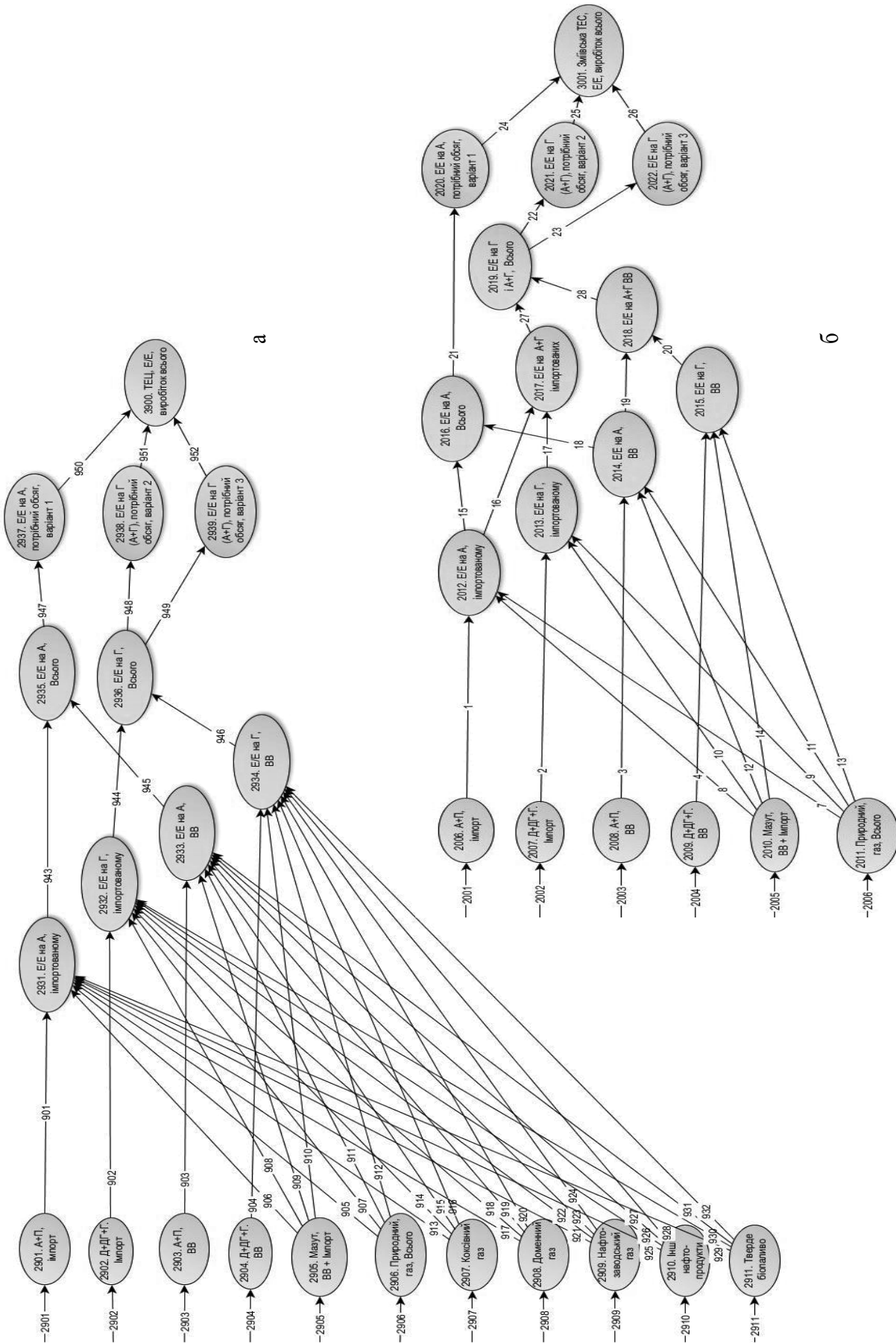


Рисунок 2. Поточкова структура варіантів паливозабезпечення всіх ТЕЦ на різних видах палива за даними енергетичного балансу України 2011 р. (а) і ТЕС, що працює на вугіллі марочної групи А (А+П), або Г (Г+ДГ+Д), або паливній суміші цих марочних груп (б)

користання або невикористання даного варіанту роботи *ТЕС*. Таким чином, описана структура подання теплоелектростанції забезпечує формування підсистеми обмежень частково-цілочисельної задачі лінійного програмування, що здійснює вибір, або «перемикання» варіантів роботи *ТЕС* з різними значеннями КВВП і видами палива.

Мережна структура *ТЕЦ* (рис. 2, а) описує сукупність всіх теплоелектроцентралей України за даними статистичного енергетичного балансу 2011 р. Ця підсистема демонструє можливість агрегованого подання об'єктів енергосистеми за відсутності деталізованої інформації щодо її технологічних складових, між тим забезпечуючи визначення загальних обсягів паливозабезпечення.

З метою оцінки можливостей моделі щодо вибору доцільних варіантів паливозабезпечення *ТЕС* і *ТЕЦ*, включно з варіантами зміни штатного палива, виконано серію розрахунків паливних балансів сектора теплової генерації, який було подано у вигляді деталізованих технологічних способів для окремих теплових електростанцій, а також групою технологічних способів всіх теплоелектроцентралей на різних видах палива, загальну інформацію щодо яких взято з енергетичного та продуктового балансів України. Використано статистичні дані обсягів виробітку електричної енергії на *ТЕС* і *ТЕЦ* в 2011 і 2015 рр., що розглядалися, відповідно, як періоди стійкого економічного розвитку й суттєвих обмежень у постачанні вугілля та одночасного загального економічного спаду.

У першому базовому розрахунку обсяг виробітку електроенергії встановлено на рівні 2011 р., обсяги власного видобутку вугілля не обмежені. У цьому випадку електростанції працюють на штатному паливі з фактичним КВВП, а необхідні обсяги вугілля забезпечуються власним видобутком вугілля марок *A* та *G*.

Наступний розрахунок виконано з обмеженнями на обсяги видобутку рядового вугілля у відповідності до фактичних даних 2013 р. За цієї умови необхідні обсяги вугілля газової групи розподіляються за підмарками – *G*, *ДГ*, *Д*, а всі електростанції працюють за нормальним варіантом свого вуглезабезпечення.

Третій розрахунок відрізняється врахуванням низької якості вугілля власного видобутку та необхідністю його збагачення. Із врахуванням середньостатистичної частки рядового вугілля, що підлягає переробці, коефіцієнт збагачення взято на рівні 0,7. У цьому випадку спостерігається дефіцит вугілля газової групи й потреба імпортування цього виду палива у обсязі 0,263 млн т.

У четвертому розрахунку враховано зниження обсягів власного видобутку вугілля газової групи в результаті тимчасової втрати контролю над частиною території країни, а також втрату всіх підприємств з видобутку антрациту. У таких умовах, імпорту вугілля антрацитової групи становить 17,792 млн т., імпорту вугілля газової групи – 2,013 млн т.

П'ятий варіант розрахунку виконано за умов попереднього варіанту з додатковими обмеженнями на обсяги імпортування через морські торговельні порти (МТП) країни. Враховано також можливість надходження вугілля з тимчасово окупованих територій. У цьому розрахунку сукупний імпорту антрацитової групи становить 11,716 млн т, з яких 4 млн т марки *A* та 0,092 млн т марки *П* надходить з неконтованих територій країни. Сукупний імпорту газової групи становить 8,349 млн т. Старобешівська та Луганська *ТЕС* змінюють марки споживаного палива й переходять на спалювання вугілля газової групи.

У шостому розрахунку за наведених у попередньому варіанті обмежень сукупний обсяг виробітку електроенергії встановлено на рівні виробітку тепловою генерацією у 2015 р. При цьому, обсяги імпортування антрацитової групи скоротилися та становили 6,945 млн т, з яких 4 млн т надходило з окупованих територій, а 2,945 млн т – з країн далекого зарубіжжя через МТП. В той же час імпорту газової групи повністю відсутній. Змінилися варіанти функціонування електростанцій: Старобешівська, Трипільська та Луганська *ТЕС* повністю припинили свою роботу, а Вуглегірська *ТЕС* збільшила КВВП.

У сьомому розрахунку вугілля власного видобутку підлягає збагаченню з коефіцієнтом 0,7, а обсяги імпорту антрациту обмежено пропускну здатністю портів. Крім того, можливість імпортування з тимчасово окупованих територій відсутня. У цьому випадку сукупні обсяги імпорту та варіанти функціонування *ТЕС* збігаються з попереднім розрахунком, з тією відмінністю, що обсяг імпорту антрацитової групи, що надходить в країну через МТП збільшується і становить 6,945 млн т.

Останній розрахунок виконано за умови повного припинення імпортування антрациту. Внаслідок цього Придніпровська, Криворізька, Трипільська, Зміївська та Луганська *ТЕС* взагалі не працюють. Слов'янська та Старобешівська *ТЕС* змінюють марки споживаного вугілля – з антрацитової групи на газову, тобто потребують реконструкції енергоблоків. Бурштинська та Курахівська *ТЕС* підвищують КВВП до максимального можливого значення. Обсяг імпортування вугілля газової групи становить 7,237 млн т.

**Таблиця 2 – Результати розрахунку варіантів паливозабезпечення
теплової енергетики на період до 2025 р.**

Паливо	2015 р.	2020 р.	2025 р.
Електроенергія ТЕС і ТЕЦ, виробництво, млрд. кВт·г	63,8 факт	60,2 прогноз	71,3 прогноз
Власний видобуток вугілля, млн т			
А	0,0	0,0	0,0
П	0,0917	0,0917	0,0917
Д	0,198	0,198	0,198
ДГ	11,466	11,466	11,466
Г	3,612	4,043	7,284
Імпорт вугілля, млн т			
Антрацитова група	8,0 + 2,591*	8,0 + 1,992*	8,0 + 1,718*
Газова група	0,0	0,0	0,714
Всього вугілля, млн т			
Антрацитова група	10,682	10,084	9,810
Газова група	15,276	15,707	19,662
Інші види палива			
Природний газ, млрд м ³	7,231	6,598	8,054
Коксівний газ, млрд м ³	1,301	1,162	1,421
Доменний газ, млрд м ³	1,612	1,440	1,760
Мазути, тис. т	68,962	65,757	77,745
Нафтозаводський газ, тис. т	12,296	10,988	13,430
Інші нафтопродукти, тис. т	29,510	26,371	32,231
Тверде біопаливо, млн т	1,078	0,788	0,860

* Додатково з тимчасово невідконтрольованих територій.

Попри достатню умовність обмежень описаного вище випробувального дослідження представленої моделі паливозабезпечення теплової енергетики, зокрема використаних рівнів інтенсивностей функціонування електростанцій, розрахунки довели можливість в межах запропонованих модельних конструкцій відобразити передбачувані варіанти роботи цього сектора паливно-енергетичного комплексу й забезпечити визначення їх обсягових показників.

Розроблену модель використано для розрахунку прогнозних обсягів постачання вугілля в теплову енергетику на 2020 та 2025 рр. за впровадження запропонованих проектів переобладнання частини генеруючих потужностей на споживання вугілля газової групи.

У першому розрахунку враховано зниження обсягів власного видобутку вугілля газової групи в результаті тимчасової втрати контролю над частиною території країни та повну втрату активів з видобутку вугілля антрацитової групи. Обсяг виробітку електроенергії взято за фактом 2015 р. Встановлено обмеження на обсяги імпорту через морські торговельні порти країни – 8,0 млн т.

У подальших розрахунках використано прогнозні обсяги виробництва електричної енергії та питомі витрати палива на 2020 і 2025 рр. В розрахунку на 2020 р. розглянуто варіант переобладнання двох блоків Зміївської ТЕС потужністю 200 МВт на спалювання вугілля марок Г, ДГ, Д разом з використанням 30% вугілля цих марок у паливній суміші решти чотирьох блоків станції у 2020 р. Крім того, враховано можливість переобладнання всіх ТЕЦ антрацитової групи на газову групу марок вугілля.

У розрахунку на 2025 р. додатково до попереднього запроваджено можливість повного переобладнання Трипільської ТЕС з встановленою потужністю 1200 МВт на спалювання вугілля газової групи марок. Результати розрахунків наведено в табл. 2.

ВИСНОВКИ

1. З метою інтеграції економіко-математичної моделі взаємодії теплової енергетики з паливними галузями ПЕК України в модель загального енергетичного балансу запропоновано мережне подання структури технологій поста-

чання палива і виробництва електричної енергії, що забезпечує:

- відображення технологічних зв'язків електростанцій з джерелами їх паливозабезпечення в межах паливних галузей ПЕК та постачання за імпортом;

- вибір варіантів генерування електричної енергії ТЕС і ТЕЦ, включно з ланцюгами їх паливозабезпечення – на штатному чи альтернативних видах палива, за різних рівнів використання встановленої потужності.

2. У мережному поданні структури паливозабезпечення та функціонування ТЕС і ТЕЦ показано можливості формування паливного балансу теплової енергетики в умовах структурних змін у видобувних галузях, викликаних тимчасовою окупацією частини територій країни. Можливі напрями забезпечення балансу полягають у збільшенні обсягів постачання антрацитів, зокрема з джерел імпортування, підвищенні КВВП електростанцій на газовому вугіллі, переобладнанні антрацитових ТЕС на спалювання газового вугілля, а також використанні сумішей вугільного палива різних марочних груп.

3. З метою оцінки можливостей моделі щодо вибору доцільних варіантів паливозабезпечення ТЕС і ТЕЦ виконано розрахунки паливних балансів сектора теплової генерації. Використано статистичні дані щодо виробітку електричної енергії на ТЕС і ТЕЦ 2011 р., як економічно стабільного, а також 2015 р. – як періоду кризових обмежень у постачанні вугілля та одночасного загального економічного спаду. Описано особливості паливних балансів за поступового обмеження напрямів та обсягів постачання вугільного палива.

4. Розраховано прогнозні обсяги постачання вугілля в теплову енергетику, включно з обсягами його імпортування, у 2020 та 2025 рр. при здійсненні запланованих на цей період заходів з переобладнання частини генеруючих потужностей на споживання газового вугілля, а також вугільних сумішей різних марочних груп.

1. Канторович Л.В. Математические методы организации и планирования производства. Л.: Изд-во ЛГУ, 1939. (Роботу опубліковано у зб. «Применение математики в экономических исследованиях». М.: Соцэкгиз, 1959. С. 235—275.

2. 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.

3. Добровольський В.К., Стогній О.В., Костюк В.О., Каплін М.І. Економіко-математичне моделювання енергетичних систем. К.: Наук. думка. 2013. 256 с.

4. Ruud Weijermars, Peter Taylor, Olivier Bahn, Subir Ranjan Das, Yi-Ming Wei. Review of models and actors in energy mix optimization e can leader visions and decisions align with optimum model strategies for our future energy systems? URL: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:5fd0ed2d-6f44-4e64-9988-a15b612e9997/datastream/OBJ/view>.

5. Подолець Р.З., Дячук О.А. Стратегічне планування у паливно-енергетичному комплексі на базі моделі «Times-Україна»: наук. доп. НАН України; Ін-т екон. та прогнозування. К., 2011. 150 с.

6. Каплін М.І. Оптимізація системи паливозабезпечення на основі мережного подання модифікованої моделі виробничого типу: автореф. дис. ... канд. техн. наук. К., 2015. 20 с.

7. Білан Т.Р., Каплін М.І. Моделювання постачання енергетичного вугілля за марками в економіку країни в умовах світового ринку та скорочення обсягів власного видобутку *Проблеми загальної енергетики*. 2016. Вип. 2(45). С. 16—25. <https://doi.org/10.15407/pge2016.02.016>.

8. Білан Т.Р., Каплін М.І. Економіко-математична модель постачання енергетичного вугілля за марками в країну з урахуванням вимог енергетичної безпеки. *International Scientific-Practical Conference Innovative potential of socio-economic systems: the challenges of the global world: Conference Proceedings, Part II, June 30, 2016*. Lisbon: Baltija Publishing, 2016. P. 161—164.

Надійшла до редколегії 14.05.2018