

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ І СИСТЕМ

УДК 338.55+621.31

В.К. Добровольський, канд. екон. наук (Інститут загальної енергетики НАН України, Київ)

ЕКОНОМІКО-МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ФОРМАЛЬНО УТВОРЕНИХ ЦІН В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЦІ

Представлено економіко-математичну модель формально утворених цін в електроенергетиці. Математично модель є задачею лінійного програмування специфічної структури, доповненою алгоритмами обробки вихідних даних й оптимального розв'язку задачі. Розроблено числовий приклад з даними, наближеними до реальних. Обчислено ціни для різних класів споживачів за напругою та для різних добових зон. Формально утворені ціни можуть використовуватись при розробці тарифів на електроенергію.

Представлена економіко-математическая модель формально образованных цен в электроэнергетике. Математически модель представляет собой задачу линейного программирования специфической структуры, дополненную алгоритмами обработки исходных данных и оптимального решения задачи. Приведен численный пример с данными, приближенными к реальным. Вычислены цены для различных классов потребителей по напряжению и для разных суточных зон. Формально образованные цены могут использоваться при разработке тарифов на электроэнергию.

Формально утворена ціна - це продукт нормативного ціноутворення, як сукупності постулатів, принципів, методів обчислення деякої ціни затратного характеру, котра далі вже модифікується ринком, або, у випадку природних монополій, корегується та регулюється державою у законодавчому порядку. Формально утворені ціни кваліфікуються як ціни нормативні, затратні, ціни виробництва. В таку ціну закладається певний прибуток. Обчислення розміру цього прибутку, його статистики, тенденцій, і т. д. становить одну з основних задач нормативного ціноутворення.

Основний постулат нормативного ціноутворення: нормативний прибуток складається з двох частин - одна частина має бути пропорційною основним і обіговим фондам (інакше - наявному капіталові), друга - заробітній платі. Коефіцієнти нарахувань на заробітну плату, основні й обігові фонди визначаються шляхом макроекономічних розрахунків так, щоб виконувався баланс прибутку у народному господарстві в цілому. Встановлення співвідношення між прибутком за рахунок капіталу та за рахунок оплати праці становить деякі методологічні складнощі й може вирішуватись із залученням додаткових, переважно соціальних, міркувань. При розрахунку нормативних цін коефіцієнт нарахувань на фонди може становити 5-15 відсотків. При цьому значна частина "фондового" прибутку має спрямовуватись на реконструкцію енергетики та звільнятися від оподаткування за певними нормативами тривалої дії, встановленими законодавчим шляхом.

Реальні, ринкові ціни відхилятимуться від нормативних цін в той чи інший бік. Не для всіх товарів і продуктів ринок і його закони попиту та споживання, закони ринкової рівноваги адекватні соціальним цілям суспільства, наприклад, створенню раціональної структури споживання. Так, для населення та дрібного підприємництва має бути встановлено "соціальну" ціну на електроенергію, нижчу від нормативної.

Оптимізаційна модель, що запропонована, належить

до моделей виробничого типу, які математично є задачею лінійного програмування. Базові поняття цих моделей - це поняття модельних продуктів та ресурсів, а також технологічних способів, в яких продукти випускаються і споживаються, а ресурси тільки споживаються. Обсяг випуску основного продукту технологічного способу у розв'язку моделі називається інтенсивністю його використання. Особливість моделей виробничого типу - наявність різних технологічних способів для випуску одного й того ж продукту. Саме це забезпечує варіантність розв'язків моделі та можливість оптимізації. Вказані способи утворюють групу технологічних способів, в найпростішому випадку група містить один технологічний спосіб. Число груп технологічних способів дорівнює числу продуктів, що випускаються.

В запропонованій моделі продуктам відповідає електроенергія різних напруг для різних споживачів, технологічним способам відповідають способи генерації електроенергії (ТЕС, ГЕС, АЕС), трансформатори та лінії електропередачі. Модель узагальнено описує генерацію та передачу електроенергії споживачам. Мають бути обмеження знизу та зверху на величини генерованої й, можливо, переданої електроенергії.

Основу моделі виробничого типу складає система обмежень, в яку входять рівняння, що виражають баланси виробництва та передачі електроенергії і затрати необхідних ресурсів (паливо, заробітна плата та інші експлуатаційні затрати, а також основні та обігові фонди тощо). Модель розв'язується на мінімум поточних затрат, на максимум прибутку чи інші традиційні критерії оптимальності, що виражені відповідними цільовими функціями. В принципі, варіантність даної моделі незначна і різні критерії оптимальності суттєво не впливають на оптимальний розв'язок.

В загальному вигляді модель з мінімізуючим критерієм оптимальності можна записати наступним чином:

$$\begin{aligned} \|g_i^{jt}\| \cdot \{x_{jt}\} &= \{b_i^0\} \\ \|q_i^{jt}\| \cdot \{x_{jt}\} &\leq \{q_i^0\} \\ [c^{jt}] \cdot \{x_{jt}\} &\rightarrow \min \end{aligned}$$

$$\{x'_{jt}\} \leq \{x_{jt}\} \leq \{x''_{jt}\},$$

або в компактній формі:

$$GX = B^0$$

$$QX \leq Q^0$$

$$CX \rightarrow \min$$

$$X' \leq X \leq X'',$$

де G - матриця технологічних способів генерації, трансформації, передачі та споживання електроенергії різних напруг; i - індекс продукту, j - індекс групи технологічних способів з випуску i -го продукту ($i = j$ і $j = 1, \dots, m$); t - індекс технологічного способу в групі технологічних способів; B^0 - вектор заданих обсягів споживання продуктів, тобто електроенергії різних напруг; Q - ресурсна матриця, елементи якої показують затрати l -го ресурсу в jt -му технологічному способі. Вважається, що ресурси є обмеженими і тому ця матриця входить у систему обмежень оптимізаційної моделі; Q^0 - вектор заданих обсягів згаданих ресурсів; C - цільовий вектор, елементи якого виражають поточні затрати для кожного технологічного способу; X - вектор інтенсивностей використання технологічних способів, тобто обсягів генерованої, трансформованої та переданої електроенергії, а X' та X'' - вектори обмежень знизу та зверху на вектор інтенсивностей.

Для цінових розрахунків потрібна також додаткова ресурсна матриця D , елементи якої показують затрати k -го ресурсу в jt -му технологічному способі. Вважається, що потреба в таких ресурсах не обмежується, і тому цю матрицю не включено в систему обмежень оптимізаційної моделі.

На всі ресурси мають бути відомі деякі (екзогенні для модельованої системи) ціни й оцінки, а також певні нормативні коефіцієнти нарахувань, що встановлюють схеми ціноутворення та забезпечують прибутковість. Ці екзогенні оцінки та нормативні коефіцієнти визначають рівень нормативних цін.

Для цінових розрахунків використовується виділена з системи обмежень задачі квадратна матриця затрат і випуску продуктів, а також матриця затрат ресурсів шляхом оптимального агрегування стовпців вихідних матриць. Ваговими коефіцієнтами агрегування є інтенсивності використання технологічних способів в межах кожної групи технологічних способів, які увійшли в оптимальний план. Оптимальному плану відповідають базисні стовпці матриці системи обмежень, а також стовпці, для котрих відповідні інтенсивності досягли обмежень знизу або зверху. Зауважимо, що виділена матриця затрат і випуску продуктів - це повний аналог матриці затрат і випуску міжгалузевого (міжпродуктового) балансу. Таким чином, отримуємо агреговані матриці затрат і випуску продуктів G , а також затрат ресурсів Q і D . Останні дві матриці склеюємо по вертикалі в одну, позначивши її через R :

$$\left\| \begin{array}{c} \bar{q}_l^j \\ \bar{d}_k^j \end{array} \right\| = \left\| \bar{r}_s^j \right\|.$$

Розрахунок формально утворених цін проводиться за формулою:

$$[P^i] = [W^s] \left\| \bar{r}_s^i \right\| \left\| \bar{g}_i^j \right\|^{-1},$$

або у компактній формі $P = WRC^{-1}$, де P - вектор обчислюваних нормативних цін; W - вектор екзогенних цін і оцінок ресурсів; s - індекс ресурсу в об'єднаній номенклатурі ресурсів. Елементи вектора W дорівнюють:

- екзогенним цінам, якщо відповідний технологічний коефіцієнт затрат виражається у натуральному вимірі;
- одиниці, якщо коефіцієнт затрат - величина вартісна (за винятком заробітної плати, основних та обігових фондів);
- одиниці плюс коефіцієнт нарахувань на заробітну плату $(1 + w)$ для заробітної плати;
- коефіцієнту нарахувань на основні та обігові фонди f для цих фондів.

Вказана формула відома з п'ятидесятих років в рамках теорії міжгалузевого балансу та увійшла до підручників, але даних про її практичне використання мало. Моделі виробничого типу знайшли широке використання у практиці для знаходження оптимальних планів. Можливість використати ці моделі для цінових розрахунків шляхом виділення оптимально агрегованих матриць і застосування згаданої вище формули залишились невикористаними. Трактуювання двоїстих змінних (об'єктивно зумовлених оцінок) цих моделей як цін виявилось непродуктивним, але в літературі є спорадичні повідомлення про використання двоїстих оцінок як внутрішніх (трансферних) цін в великих корпораціях.

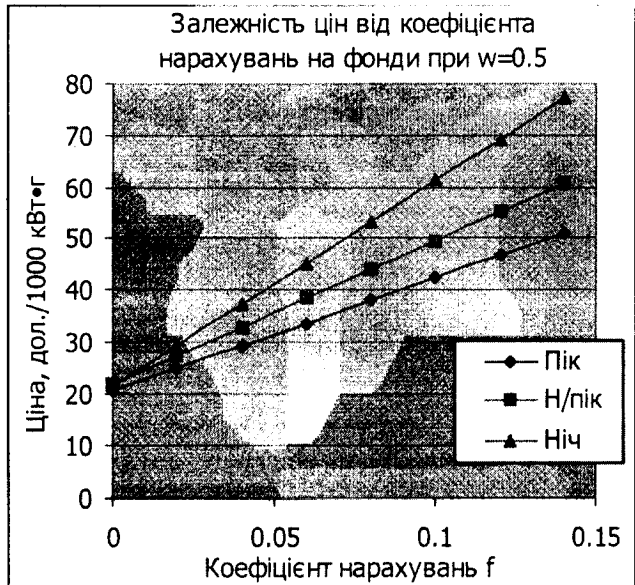
Деякі технологічні коефіцієнти додаткової ресурсної матриці (відповідні рядки цих матриць в табл. 1 помічено зірочкою) припадають на весь обсяг генерованої чи переданої електроенергії у даному технологічному способі. Тобто певний ресурс витрачається частково пропорційно інтенсивності використання технологічного способу, частково у фіксованому обсязі, незалежно від інтенсивності. Це дозволяє точніше обчислювати затрати. На жаль, практичне впровадження подібної диференціації утруднене за браком інформації.

Розроблено числовий приклад (табл. 1) із даними, наближеними до реальних; деякі дані досить приблизні за відсутністю інформації. В матриці системи обмежень мінус одиниці - це технологічні коефіцієнти затрат на вході у трансформатор або лінію. Технологічні коефіцієнти випуску. Вони менші від одиниці внаслідок втрат у трансформаторах і лініях (в процесі розрахунків коефіцієнти можна уточнювати, оскільки втрати залежать від навантаження). Вихідні дані мають три варіанти, відповідно до трьох добових зон: "пік", "напівпік" і "ніч", які наведено в табл. 2.

Для розрахунків цін за допомогою побудованої моделі, включно з розв'язуванням задачі лінійного програмування, достатніми виявилися засоби табличного процесора, оскільки розмір моделі невеликий. Розрахунки проводилися з різними комбінаціями значень коефіцієнтів нарахувань на заробітну плату w , основні та обігові фонди f для трьох добових зон. При $w = 0$ і $f = 0$ обраховується собівартість. Розрахунки показують, що нормативні ціни мало залежать від зміни коефіцієнта нарахувань на заробітну плату, але дуже відчутно залежать від коефіцієнта нарахувань на основні та обігові фонди. Та-

Таблиця 2. Варіанти вихідних даних

Задані обсяги споживання електроенергії різних напруг в розрахунку на рік, млрд. кВт•г			
Напруга, кВ	Пік	Напівпік	Ніч
110	10	10	15
35	25	30	20
10	20	15	15
0.4	70	45	85
Всього	125	100	75
Обмеження знизу і зверху на генерацію в розрахунку на рік, млрд. кВт•г			
Станції	Пік	Напівпік	Ніч
ТЕС	20	20	20
	85	85	85
ГЕС	0	0	0
	10	0	0
АЕС	45	45	45
	50	50	50
Затрати орг. Палива на ТЕС, кг/кВт•г	0.385	0.375	0.375



кож досить суттєвими є різниці в цінах для різних зон. В зоні "ніч" ціни найвищі, бо фіксована частка нарахувань на фонди припадає на менший обсяг вироблюваної електроенергії. Це випадок, коли встановлювана ціна має бути набагато нижчою від нормативної для стимулювання використання "нічної" електроенергії. Табл. 3

показує результати розрахунків при $w=0.5$ і зміні f від нуля до 0.14. Графік ілюструє залежність зонних нормативних цін від коефіцієнта нарахувань на фонди при $w=0.5$. Середню ціну можна знайти як лінійну комбінацію зонних з ваговими коефіцієнтами, що пропорційні до відносної тривалості кожної зони.

Таблиця 3. Розраховані нормативні ціни на електроенергію (при $w = 0.5$), дол./1000 кВт•г

Коеф. f	Генерація			Лінії 110 кВ			Лінії 35 кВ			Лінії 10 кВ			Лінії 0.4 кВ		
	Пік	Н/пік	Ніч	Пік	Н/пік	Ніч	Пік	Н/пік	Ніч	Пік	Н/пік	Ніч	Пік	Н/пік	Ніч
0	16.30	17.26	17.66	17.47	18.28	17.87	18.90	19.76	19.34	19.15	20.01	19.62	20.66	21.59	21.17
0.02	19.05	20.78	22.80	20.56	22.17	23.13	22.34	24.10	25.26	22.95	24.88	26.46	24.97	27.17	29.18
0.04	21.81	24.30	27.95	23.64	26.06	28.39	25.77	28.45	31.18	26.75	29.75	33.31	29.27	32.75	37.18
0.06	24.56	27.82	33.09	26.72	29.94	33.66	29.20	32.79	37.10	30.55	34.62	40.16	33.57	38.34	45.19
0.08	27.31	31.34	38.23	29.80	33.83	38.92	32.63	37.14	43.02	34.36	39.49	47.00	37.88	43.92	53.20
0.10	30.07	34.86	43.37	32.88	37.72	44.18	36.06	41.48	48.94	38.16	44.36	53.85	42.18	49.50	61.21
0.12	32.82	38.38	48.51	35.96	41.61	49.44	39.49	45.83	54.86	41.96	49.23	60.70	46.48	55.09	69.22
0.14	35.57	41.90	53.65	39.04	45.49	54.70	42.92	50.17	60.79	45.76	54.10	67.54	50.79	60.67	77.23

Позначення типів е/станцій, трансформаторів і ліній	ТЕС	ГЕС	АЕС	Т110	Т035	Т010а	Т010b	Т004а	Т004b	L110	L035	L010	L004	Вільні змінні	Тип обм	Обмеження
Матриця системи обмежень оптимізаційної моделі (заграти ресурсів на 1млрд. кВт*г)																
E/е від генераторів, млрд. кВт*г	1	1	1	-1												0
E/е від трансф. 110 кВ, млрд. кВт*г				0.99						-1						0
E/е від ліній 110 кВ, млрд. кВт*г					-1					0.97						10
E/е від трансф. 35 кВ, млрд. кВт*г				0.99							-1					0
E/е від ліній 35 кВ, млрд. кВт*г					-1					0.96						25
E/е від трансф. 10 кВ, млрд. кВт*г				0.99	0.99							-1				0
E/е від ліній 10 кВ, млрд. кВт*г						0.99						0.95				20
E/е від трансф. 0.4 кВ, млрд. кВт*г							0.99						-1			0
E/е від ліній 0.4 кВ, млрд. кВт*г								0.99					0.94			70
Q Паливо органічне, млн. т.п.	0.385															
Паливо ядерне, млн. дол.	1.85															
C Коефіцієнти цільового вектора	16.6	0.18	3.55	0.022	0.013	0.024	0.013	0.022	0.475	0.285	0.345	0.49	0.29		?	min
Результати розв'язку моделі для різних зон, млрд. кВт*г																
Пік	20	0	45													
Значення невідомих	83.12	10	50	143.12	37.13	0	90.31	64.94	10.28	141.69	36.75	89.41	74.47	0	0.5	1688.62
Обмеження зверху	85	10	50													
Напівпік	20	0	45													
Значення невідомих	63.43	0	50	113.43	31.57	0	67.36	48.36	0	112.3	31.25	66.69	47.87	8.21	0.5	1324.68
Обмеження зверху	85	0	50													
Ніч	20	0	45													
Значення невідомих	33.89	0	50	83.89	21.04	0	44.51	26.86	0	83.05	20.83	44.07	26.60	19.29	0.5	803.48
Обмеження зверху	85	0	50													
Додаткові дані для розрахунку формально утворених цін (заграти ресурсів на 1млрд. кВт*г)																
Зар. плата, млн. дол.	0.25	0.03	0.2	0.002	0.003	0.004	0.003	0.002	0.055	0.035	0.045	0.04	0.04			
Інші експл. затрати, млн. дол.	1.2	0.15	1.5	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.42	0.25	0.3	0.45	0.25			
Обігові фонди, млн. дол.	0.24	0.35	0.24	0.001	0.002	0.001	0.002	0.002	0.02	0.04	0.03	0.02	0.03			
*Зар. плата, млн. дол.	25.5	1.7	23.8	0.045	0.045	0.055	0.085	0.055	0.25	0.15	0.175	0.225	0.0575			
*Експл. затрати, млн. дол.	204	5.1	374	0.225	0.225	0.275	0.425	0.275	1.25	0.75	0.875	1.125	0.2875			
*Обігові фонди, млн. дол.	425	13.6	1292	0.09	0.09	0.11	0.17	0.11	0.5	0.3	0.35	0.45	0.115			
*Основні фонди, млн. дол.	5525	5950	6460	70	85	80	70	100	1050	950	700	800	905			

**Таблиця 1. Приклад
моделі для обчислення
формально утворених цін**