

УДК 338.55+621.31

М.М. КУЛИК, академік НАН України, **В.К. ДОБРОВОЛЬСЬКИЙ**, канд. екон. наук,
І.М. ГОЛОВАНОВ, канд. техн. наук (Інститут загальної енергетики НАН України, Київ)

МОДЕЛЬ РІВНОВАЖНИХ ЦІН ЄВРОПЕЙСЬКОГО РИНКУ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ

Запропоновано модель рівноважних цін європейських енергетичних ринків, яка дозволяє знаходити такі ціни одночасно з обсягами споживання енергоресурсів. Модель побудовано на базі поняття технологічного способу Л.В. Канторовича. Формується матриця, аналогічна до матриці міжгалузевого балансу, з її використанням обчислено ціни витратного типу на енергоресурси як аргументи функції споживання за допомогою векторно-матричної формули. На контрольному прикладі з даними, наближеними до реальних, продемонстровано можливості моделі.

Вступ

Дев'яності роки ХХ сторіччя характеризувалися в усьому світі пошуками способів підвищення ефективності функціонування паливно-енергетичного комплексу. Було встановлено, що такої мети можна досягти за рахунок лібералізації ринків енергії, впровадження ринкових цін, створення конкурентного середовища, зменшення ступеня державного регулювання цих ринків, забезпечення права доступу всіх виробників та споживачів енергоресурсів до електромереж та трубопроводів, приватизації підприємств енергетичного сектору.

В рамках пошуку шляхів розв'язання цієї проблеми Університетом Осло (Норвегія) було розроблено модель LIBEMOD (Liberalization Model for the European Energy Markets) [1, 2], яка ставить за мету математичний опис енергетичних ринків західноєвропейських країн і знаходження рівноважних цін. Модель враховує витрати на виробництво і транспортування енергоресурсів, а також використовує залежності між попитом на енергоресурси від їх цін.

Коли йдеться про модель, що охоплює частину народного господарства (у даному випадку це паливно-енергетичний комплекс), виникає питання про зв'язки між частиною і цілим, взаємовпливом модельованої підсистеми на її оточення. Інший підхід – це укрупнена модель всього народного господарства з бажаною деталізацією паливно-енергетичного блоку. Цікавою спробою реалізувати такий підхід є модель МЕНЕК [3] – "модель енергетики в економіці". В цій моделі ціни визначаються разом із обсягами виробництва. Модель є динамічною на 7-10 років, містить 347 рівнянь та нерівностей, але не є диференційованою за регіонами. Подібно до моделі LIBEMOD модель є нелінійною. Її розробники стверджують, що змушені відмовитись від добре освоєних задач лінійного програмування й опинитися на "хиткому ґрунті" багатоекстремальних задач неопуклого програмування великої розмірності. Мабуть, великого розміру задача лінійного програ-

мування є більш привабливим інструментальним засобом аніж нелінійна модель.

Можливим результатом моделювання ринку енергоресурсів є розробка нових механізмів взаємодії енергетики та довілля з використанням нових методів і концентруванням на майбутньому розвитку європейських та азійських мереж транспортування енергоресурсів. Дослідження стосовно довгострокових енергетичних сценаріїв вказують на стійку тенденцію до споживання найбільш чистих, гнучких та зручних форм енергії, які можуть зробити істотний внесок у вирішення цієї проблеми. До таких форм належать природний газ, а також водень та електроенергія.

При оцінці перспектив розвитку такої інфраструктури необхідно також враховувати тенденції глобальних кліматичних змін, оскільки технологічні зміни в енергетичній структурі неминуче спричинять до таких наслідків.

Усі моделі, які було запропоновано, сконцентровані, головним чином, на формалізації зв'язку між ринками газу та електроенергії, враховуючи те, що при виробництві електроенергії можуть використовуватися всі види палива: газ, нафта і вугілля.

Витратні ціни на основі міжпродуктового балансу та їх використання для визначення рівноважних цін

Рівноважні ціни на енергоресурси можна визначити, як ціни, за яких встановлюється баланс між обсягами попиту споживача та пропозицією з боку виробника. При цьому припускається існування функції попиту на кожний енергоресурс, як спадної функції цін на цей та інші енергоресурси, а також виробничої функції споживача. У даній роботі зроблено спробу побудувати модель рівноважних цін на іншій, порівняно із згаданими, методологічній основі, на базі поняття технологічного способу Л.В. Канторовича. Аналогічне поняття (activity) було розроблено у повоєнний час Т. Купмансом. Мислення у термінах балансових рівнянь замінюється мисленням

у термінах технологічних способів, які математично представляються одним або кількома векторами-стовпцями. Запропонована модель є виробничо-транспортною. Тобто – виробництво та споживання енергоресурсів диференційовано за країнами, окрім того, має місце транспортування цих енергоресурсів між базовими країнами, а також надходження енергоресурсів від країн-експортерів енергоресурсів через країни-транзитери. Виробники енергоресурсів повинні забезпечити нормальну з огляду на усе народне господарство норму прибутку. Тому використання в моделі цін витратного типу є виправданим.

Країни, що моделюються, класифіковано на: 1) базові країни (країни Західної Європи), в яких моделюється весь енергетичний сектор і які є суттєвими імпортерами енергетичних ресурсів; 2) країни-експортери енергоресурсів; та 3) країни-транзитери енергоресурсів від країн-експортерів до базових країн.

Інгредієнтами моделі є енергоресурси (модельні продукти, такі як природний газ, нафта, мазут, вугілля, електроенергія), що видобуваються або виробляються, споживаються і транспортуються, а також модельні ресурси, такі як поточні витрати на виробництво і транспортування, основні та обігові фонди тощо. Крім того, до номенклатури ресурсів введено "коректуючі кошти", котрі можуть виконувати декілька функцій: врахування податку на одиницю енергоресурсу, що випускається; врахування вартості сировини нафти на виробництво інших нафтопродуктів окрім мазуту; врахування дотацій, зокрема на видобуток вугілля у базових країнах.

Особливістю запропонованої моделі є те, що кожен з модельних продуктів виступає в кількох формах: природний газ і нафта після видобутку (коди $gs1$ та $oi1$), після транспортування в межах країни-виробника або після транспортування на виході з країни-транзитера (коди $gs2$ та $oi2$); електроенергія після генерації (код $el1$), після передавання через системні електромережі (код $el2$) та у споживачів (код $el3$). Подібна диференціація дозволяє оцінювати тарифи на транспортування і розподіл енергоресурсів.

Модель враховує різні технологічні способи виробництва електроенергії: ТЕС на природному газі (код 01), ТЕС на мазуті (код 02), ТЕС на вугіллі (код 03), ядерна електроенергія АЕС (код 04) і електроенергія ГЕС (код 05).

Враховуються обмеження на обсяги видобування і виробництва енергоресурсів, а також на пропускну здатність трубопроводів та ліній електропередач.

Формалізація моделі рівноважних цін

Формалізована модель містить у собі такі підсистеми:

– підсистема технологічних рівнянь з виробництва і транспортування енергоресурсів

$$\|b_{li}^{kjs} - a_{li}^{kjs}\| \cdot \{x_{kjs}\} + \|\delta_{li}^{ki} - \mu_{li}^{ki}\| \cdot \{z_{kli}\} - y_{li}(part_{li}, p_i) = \{0_{li}\};$$

– підсистема обмежень на екзогенні ресурси

$$\|r_{lr}^{kjs}\| \cdot \{x_{kjs}\} \leq \{r_{lr}^0\};$$

$$\|r_{lq}^{kli}\| \cdot \{z_{kli}\} \leq \{r_{lq}^0\};$$

– підсистема обмежень на виробничі потужності та пропускну здатність комунікацій для транспортування енергоресурсів

$$x_{kli}^- \leq x_{kli} \leq x_{kli}^+;$$

$$z_{kli}^- \leq z_{kli} \leq z_{kli}^+;$$

– цільова функція моделі (сумарний прибуток виробників та транспортувальників енергоресурсів)

$$[p^{kjs} - c^{kjs}] \cdot \{x_{kjs}\} + [\pi^{kli}] \cdot \{z_{kli}\} \rightarrow \max.$$

Позначення коефіцієнтів та змінних моделі:

b і a – технологічні коефіцієнти випуску і витрат енергоресурсів;

δ , μ – коефіцієнти, що забезпечують через структуру матриці інцидентів, яку вони утворюють, транспортування енергоресурсів від країни експортера або країни-транзитера до базової країни-імпортера;

r – технологічні коефіцієнти витрат екзогенних ресурсів на виробництво або транспортування, що включають поточні витрати, використання фондів тощо. До екзогенних ресурсів можна залучити плату за викиди оксидів сірки та азоту, "коректуючі кошти" тощо;

r^0 – обсяги обмежень на екзогенні ресурси;

π – коефіцієнти цільової функції, що виражають прибуток від транспортування одиниці обсягу енергоносія; ці коефіцієнти можуть залежати від обсягів транспортування;

c – коефіцієнти цільової функції, що виражають витрати на виробництво; ці коефіцієнти можуть залежати від обсягів виробництва;

$y(part, p)$ – нелінійні функції попиту, що дають обсяги кінцевого споживання залежно від цін p та емпіричних параметрів $part$;

x – невідомі обсяги енергоресурсів, що виробляються (валові випуски);

z – невідомі обсяги транспортування енергоресурсів;

x^- та x^+ , z^- та z^+ – нижня та верхня границі для невідомих обсягів енергоресурсів, що виробляються та транспортуються;

p – невідомі рівноважні ціни як аргументи функції обсягів кінцевого споживання від цін; також вони використовуються у цільовій функції.

Позначення індексів моделі:

k, l – індекси країн-виробників, країн-експортерів та країн-імпортерів енергоносіїв; пара індексів потрібна для відображення діагональної структури відповідних матриць;

i, j – індекси енергоресурсів;

s – індекс технологічного способу (технології) виробництва j -го енергоресурсу;

r – індекс видів ресурсів для виробництва енергоносіїв;

q – індекс видів ресурсів для транспортування енергоносіїв.

Витрати на транспортування в межах країни включено у витрати виробництва/розподілу. Матриця $\|\delta_{ii}^{ki} - \mu_{ii}^{ki}\|$ у системі рівнянь – це матриця інцидентів, що забезпечує відповідні маршрути транспортування енергоносіїв з однієї країни в іншу. Ця матриця містить усі потенційні маршрути транспортування, але більшість із них вилучається, як реально не існуючі. Величини δ дорівнюють одиницям, μ – також одиницям, але при транспортуванні електроенергії вони дещо менші за одиницю для врахування втрат в електричних мережах. Матриця містить стовпці, в кожному з яких пара елементів: -1 та +1, забезпечуючи тим самим передавання енергоресурсу із балансового

рівняння, що містить -1, у балансове рівняння, що містить +1. Але у випадку електроенергії замість +1 проставлено коефіцієнти, що менші за одиницю для врахування втрат при транспортуванні електроенергії.

Слід зауважити, що у зв'язку з жорсткими обмеженнями на обсяги виробництва енергоресурсів, за реальних умов оптимальний розв'язок мало залежить від критерію оптимальності, який використовується. Оскільки варіантність у маршрутах транспортування практично відсутня, то припускається використання як складової критерію оптимальності прибутку транспортувальників. Допустимо в одній моделі використовувати комбінований критерій оптимальності: максимум прибутку для виробників і мінімум транспортних витрат для транспортувальників. Відповідно, величина $+\{\pi^{kii}\} \cdot \{z_{kii}\}$ замінюється на $-\{t^{kii}\} \cdot \{z_{kii}\}$, де t – коефіцієнти цільової функції, що виражають витрати на транспортування; ці коефіцієнти можуть залежати від обсягів виробництва. Такий комбінований критерій застосовано у прикладі моделі, що наведено нижче.

Математично модель є задачею математичного програмування з нелінійними правими частинами та нелінійними коефіцієнтами цільової функції. Загальну схему моделі зображено на рис. 1.

Невід'ємною складовою моделі є підмодель знаходження витратних цін виробника і тран-

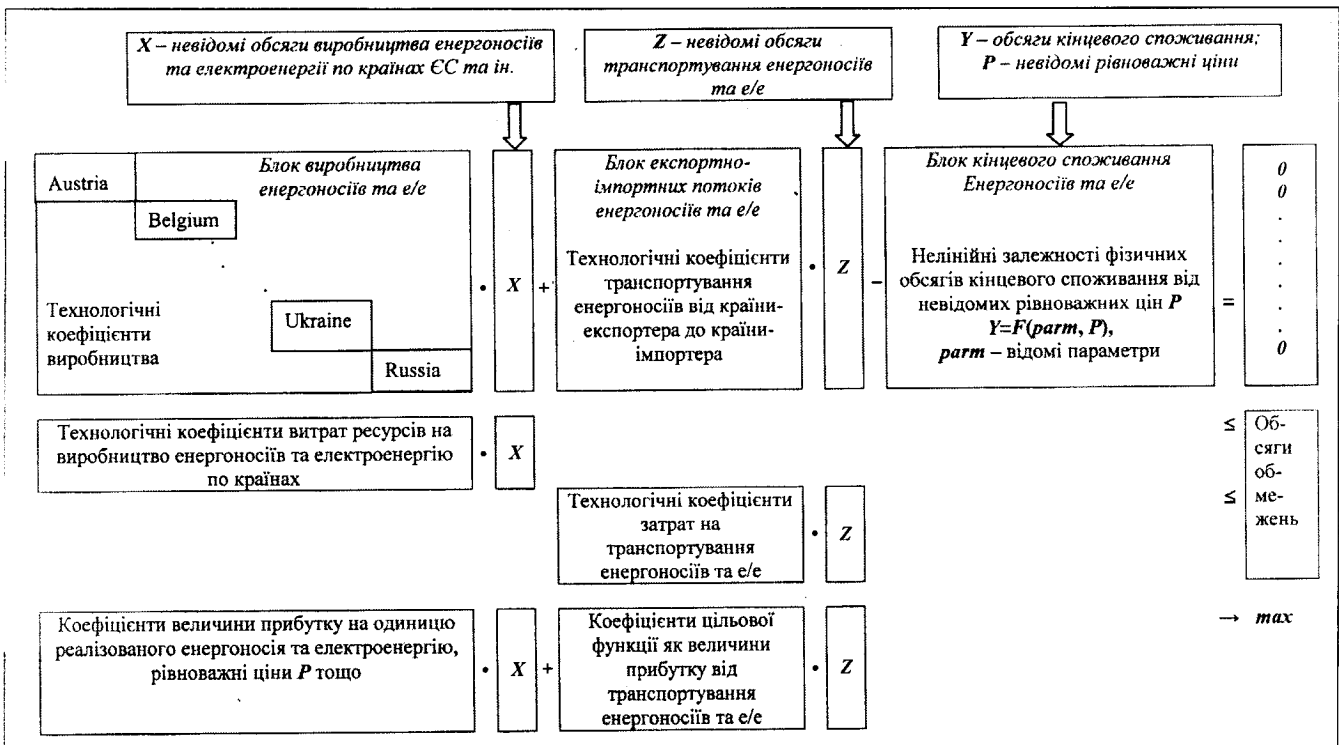


Рис. 1. Структурна схема моделі європейського ринку енергоресурсів

спортувальника для використання у вищезгаданих функціях попиту, після чого їх змінені значення вважаються рівноважними цінами. Таким чином знаходяться рівноважні ціни та відповідні кінцеві обсяги споживання енергоресурсів. Для знаходження витратних цін з матриці моделі виділяється квадратна матриця $\|g_i^j\|$ оптимального базисного розв'язку моделі шляхом агрегування. Це аналог матриці міжгалузевого балансу. Різні технологічні способи виробництва електроенергії агрегуються в один. Також агрегуються різні маршрути транспортування певного енергоресурсу. Валові випуски використовуються, як вагові коефіцієнти агрегації. Валові випуски, що зумовлені обмеженнями на виробництво і транспортування енергоресурсів, теж беруть участь в агрегації. Формула знаходження витратних цін має вигляд

$$[p^i] = [w^s] \cdot [r_s^j] \cdot \|g_i^j\|^{-1},$$

де $[p^i]$ – вектор обчислюваних витратних цін; $[r_s^j]$ – агрегована матриця витрат екзогенних ресурсів; $[w^s]$ – вектор-рядок цін та коефіцієнтів, які оцінюють екзогенні ресурси (ціни для ресурсів у фізичному виміру, значення одиниці для поточних витрат у грошовому виміру, коефіцієнтів ефективнос-

ті виробничих фондів); $\|g_i^j\|^{-1}$ – обернена агрегована технологічна матриця випуску і витрат енергоресурсів. Прототип цієї формули знаходимо у І. Ямаду [4] для випадку одного екзогенного ресурсу.

Приклад моделі рівноважних цін

Для виконання контрольних розрахунків з метою перевірки коректності загальної математичної постановки задачі та можливостей моделі було розроблено приклад для трьох базових країн-споживачів (умовні коди країн *De, Fr, Gb*), двох країн-експортерів енергоресурсів (коди *Al, Ru*) і двох країн-транзитерів (коди *Tr, Ua*). Усі ці країни становлять деякий модельний блок (підматрицю). Екзогенні ресурси представлено зведено, трьома рядками ресурсної матриці: поточні витрати, виробничі фонди (основний та обіговий капітал) з коефіцієнтом ефективності 0.1, а також "коректуючі кошти".

Рядки та стовпці матриць і векторів моделі позначено за позиційною системою кодування. Позначення рядка або стовпця складається з кодів, з'єднаних крапкою (кількість літер відповідає довжині коду): **cc.ppp** – для рядків матриці, а також тих стовпців, що відповідають вільним змінним; **cc.ppp.ss** – для стовпців матриці, що відповідають технологічним способам; **cc.ppp.dd**

Імена стовпців і рядків	De.gs1.01	De.gs2.01	De.oil.01	De.oil2.01	De.maz.01	De.oil.01	De.oil2.01	De.oil.02	De.oil.03	De.oil.04	De.oil.05	De.oil.01	De.oil.01	Al.gs1.01	Al.gs2.01	Al.oil.01	Al.oil2.01	Tr.gs1.01	Tr.oil.01	Ru.gs1.01	Ru.gs2.01	Ru.oil.01	Ru.oil2.01	Ua.oil.01	Ua.oil2.01	Tr.De.gs2	Tr.De.oil2	Ua.De.gs2	Ua.De.oil2	De.maz	De.oil	Пр. ч.	Р.цін				
De.gs1	1	-1																														0	36				
De.gs2		1				-0.21																											48.94	50.51			
De.oil			1	-1																													0	47			
De.oil2				1	-1																												0	51.72			
De.maz					0.16			-0.22																									8	16.98			
									-0.23																								42.21	38			
										0.91	0.9	0.92	1	-1																			0	31.25			
													0.98	-1																			0	34.44			
														0.95																			536.6	43.62			
															1	-1																	0	37			
															0.99																			0	54.04		
																1	-1																	0	34.5		
																	0.99																	0	45.23		
Tr.gs2																		1	-1															0	66.2		
Tr.oil2																			0.99															0	49.52		
Ru.gs1																				1	-1													0	40		
Ru.gs2																					0.99													0	57.07		
Ru.oil																						1	-1											0	39		
Ru.oil2																							0.99											0	53.77		
Ua.gs2																								1										0	67.65		
Ua.oil2																									0.99									0	59.06		
П.Витр.	10	4	25	3	10	90	4.2	5.5	8	12	3.5	1	3	12	7	13	5	10	3	15	8	15	7	8	4	0	0	0	0	0	0	0	0	СЦ-газ>	64.28		
Фонди	260	100	220	12	250	210	105	125	120	165	450	15	40	250	95	215	55	15	8	250	85	240	75	19	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	СЦ-е/e>	34.44	
Корект.						-84	-73																														
Ц.Вект.	8	1	5	1	0	1	4.2	5.5	8	12	3.5	1	3	12	7	13	5	10			15	8	15	7	8	4	0	0	0	0	0	0	0	0			
В.Гран.	14	-	8	-	165	112	136	45	300	160	19	-	-	20	-	60	-	-	-	50	-	40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Невід.	14	14	8	8	106	112	136	39.3	279	160	19	577	565	15	15	60	60	15	60	50	50	40	40	50	39.8	15	59	49	39	0	0.2			ОЗ ЦФ>	11840		
Н.Гран.	14	0	8	0	0	0	0	0	0	135	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		

Рис. 2. Блок моделі європейського ринку енергоресурсів. Позначення: П.Витр - поточні витрати; Фонди - основні та обігові фонди; Корект. - "коректуючі кошти"; Ц.Вект. - вектор цільової функції; В.Гран. та Н.Гран. - верхні та нижні границі для невідомих; Невід. - невідомі; ОЗ ЦФ - оптимальне значення цільової функції; Пр. ч. - праві частини системи рівнянь (обсяги кінцевих продуктів); Р.ціни - рівноважні ціни; СЦ-газ та СЦ-е/e - середньозважені ціни на природний газ та електроенергію.

– для стовпців транспортної матриці. Інтерпретація кодів така: **ppp** – код енергоресурсу, що випускається технологічним способом; **ss** – уточнюючий код технологічного способу для розрізнення різних технологій виробництва одного й того ж енергоресурсу; **cc** – код країни-виробника енергоресурсів або країни-експортера; **dd** – код країни-імпортера енергоресурсів. Дана система позначень використовується, зокрема, при знаходженні квадратної агрегованої матриці міжгалузевого балансу.

Структура та вміст частини моделі, що охоплює одну базову країну, дві країни-експортери та дві країни-транзитери зображено на рис. 2. Повномасштабна модель охоплюватиме всі країни Західної Європи.

Моделювання виконується в два етапи:

– знаходяться валові та кінцеві обсяги енергоресурсів при заданих початкових цінах через розв'язок оптимізаційної моделі;

– при знайдених обсягах знаходяться витратні ціни виробника через розв'язок цінової підмоделі.

Наступної ітерації на основі знайдених витратних цін знаходяться нові значення валових та кінцевих обсягів. Такий ітеративний процес повторюється кілька разів.

Одиниці виміру прийнято такими: Mtoe – мільйон тонн нафтового еквівалента палива; TWh – ТераВатт-година. Цінові показники: MUSD/Mtoe – мільйон доларів США за Mtoe (доларів за тону нафтового еквівалента); Mtoe/TWh – мільйон доларів США за ТераВатт-годину.

Кінцеві обсяги споживання газу і електроенергії є змінними величинами, що залежать від цін на них. Мають місце прямі й перехресні залежності між кінцевими обсягами енергоресурсів і цінами на них. Відповідні функції мають забезпечити на певному відрізку значень цін адекватні кінцеві обсяги споживання при заданій еластичності, яка є або постійною, або спадною зі збільшенням цін, відповідає закономірностям споживання.

Еластичності споживання енергоресурсів вважаються відомими. Визначення еластичності $e = (dq/q)/(dp/p)$ розглядаємо як диференціальне рівняння, розв'язком якого є степенева функція $q = c \cdot p^e$, де c – масштабний коефіцієнт, який знаходиться за умови, що при заданій еластичності e та відомій ціні p^0 має місце базовий обсяг споживання q_0 . У даному прикладі прийнято кубічні функції для залежностей без урахування перехресного впливу: $q_{i(k)} = a_{ik} - b_{ik}p_i + c_{ik}p_i^2 + d_{ik}p_i^3$, де $q_{i(k)}$ – обсяг i -го кінцевого енергоресурсу (газ, електроенергія) для k -ї країни; p_i – ціна i -го енергоресурсу; a_{ik} , b_{ik} , c_{ik} і d_{ik} – коефіцієнти-параметри. Вказані функції для природного газу й електроенергії прийнято такими:

$$\begin{aligned} q_g(De) &= 63 - 0.267 \cdot p_g + 0.00061 \cdot p_g^2 + 0.0000022 \cdot p_g^3, \\ q_e(De) &= 820 - 10.9 \cdot p_e + 0.06 \cdot p_e^2 + 0.00051 \cdot p_e^3, \\ q_g(Fr) &= 52 - 0.224 \cdot p_g + 0.00052 \cdot p_g^2 + 0.0000019 \cdot p_g^3, \\ q_e(Fr) &= 760 - 9.75 \cdot p_e + 0.052 \cdot p_e^2 + 0.00042 \cdot p_e^3, \\ q_g(Gb) &= 84 - 0.37 \cdot p_g + 0.00089 \cdot p_g^2 + 0.0000029 \cdot p_g^3, \\ q_e(Gb) &= 525 - 6.4 \cdot p_e + 0.026 \cdot p_e^2 + 0.00039 \cdot p_e^3. \end{aligned}$$

У діапазоні цін на газ 60-90 MUSD/Mtoe та на електроенергію 30-40 USD/(GWh), ці функції забезпечують належні кінцеві обсяги споживання природного газу та електричної енергії за середніх значень еластичностей відповідно -0.22 та -0.32 зі зниженням у кінці діапазону. Такі еластичності є типовими для умов Західної Європи.

Висновки

Запропонована модель, що складається із власне оптимізаційної моделі та векторно-матричної формули розрахунку цін витратного типу на енергоресурси для використання у функціях споживання, задовільно описує функціонування енергетичного ринку Західної Європи з урахуванням імпорту енергоносіїв і дає можливість обчислювати рівноважні ціни і відповідні їм обсяги виробництва й транспортування енергоресурсів.

1. Finn Roar Aune, Rolf Golombek, Sverre A.C. Kittelsen, Knut Einar Rosendahl, Ove Wolfgang. LIBEMOD – LIBeralisation MODel for the European Energy Markets: A Technical Description // Working paper 1/2001, Ragnar Frisch Centre for Economic Research and Department of Economics, University of Oslo, <http://www.frisch.uio.no>.

2. Finn Roar Aune, Rolf Golombek, Sverre A.C. Kittelsen, Knut Einar Rosendahl. Liberalising the Energy Markets of Western Europe – A Computable Equilibrium Model Approach // Ragnar Frisch Centre for Economic Research and Department of Economics, University of Oslo, <http://www.frisch.uio.no>.

3. Макаров А.А., Шанот Д.В., Лукацкий А.М., Малахов В.А. Инструментальные средства для количественного исследования взаимосвязей энергетики и экономики // Экономика и математические методы. – 2002. – № 1. – С. 45-56.

4. Ямаду, Исама. Теория и применение межотраслевого метода. – М.: Из-во иностранной литературы. – 1963 (переклад з видання 1961 року). – 256 с.