

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНИХ СИСТЕМ

У даній статті представлено порівняльний аналіз найбільш відомих моделей еколого-економічних систем. Запропонований підхід до моделювання економічних систем з урахуванням екологічних факторів, що ґрунтується на модифікованій моделі Леонтьєва-Форда та принципі «витрати-випуск».

Ключові слова: міжгалузевий баланс, попередження катастроф, самовідновлювані ресурси, виробляючі галузі, споживаючі галузі, шкідливі викиди.

O. V. MANTALYUK
Khmelnytsky National University**MATHEMATICAL MODELLING OF ECOLOGICAL AND ECONOMIC SYSTEMS**

This article presents a comparative analysis of the most famous models of ecological and economic systems. The approach to modelling economic systems considering environmental factors, based on a modified model of Leontief-Ford and the principle of "input-output" is proposed. The economic system is considered as composed of three sectors: mining industries, processing industries and industries that transform harmful emissions. The model contains restrictions on the maximum amounts of natural resources which have a long recovery period. It also takes into account the limits on allowable emissions of harmful substances into the environment.

Keywords: intersectional balance, prevent disasters, self-renewable resources, producing industry, utilizing industry, harmful emissions.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Однією з найяскравіших рис інноваційного розвитку в сучасних умовах є екологізація економіки. Названа тенденція обов'язково повинна відображатись в математичних моделях економічних об'єктів та процесів. Спосіб такого відображення залежить від того, в якому аспекті проявляють себе екологічні складові виробничої технології:

1. Технології виробництва мають відповідати вимогам екологічності. Отже, математичні моделі опису економічних систем, у яких реалізуються ці технології, обов'язково мають включати: з одного боку, обмеження на максимальні обсяги використання природних ресурсів, з іншого – максимально допустимі обсяги викидів шкідливих речовин у довкілля. Крім того, моделі мають враховувати економічну вартість негативного впливу на зовнішнє середовище та соціальні ефекти.

2. Проблема вибору найкращої виробничої технології при наявності альтернатив є багатокритеріальною задачею, в якій одним із найвагоміших критеріїв оптимальності має стати саме екологічність технології. Останнє поняття включає в себе і норми витрат природних ресурсів, і питомі викиди шкідливих речовин, і очікувані величини можливих екологічних ризиків. У результаті розв'язання такої задачі відбудеться «відсіювання» екологічно неблагополучних технологій.

3. Технології з переробки або поховання відходів виробництва; очищення повітря, водних та земельних ресурсів.

4. Технології моніторингу, прогнозування та попередження катастроф, що мінімізують імовірність випадкових забруднень довкілля внаслідок аварій.

Таким чином, проблема врахування екологічних факторів у економіко-математичних моделях є актуальною.

Аналіз останніх досліджень чи публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і на які спирається автор. На сьогодні в області математичного моделювання економіко-екологічних моделей накопичено досить великий досвід, що відображено в роботах вітчизняних та зарубіжних вчених: А.Б. Горстко, М. Красса, І. М. Ляшенка, Д. Меддоуза, М. Месаровича, А.Т. Мизникової, А.М. Онищенко, Дж. Форрестера та інших.

Разом із тим, у представлених моделях певні види природних ресурсів (зокрема, нафта, природний газ) вважаються такими, що не відновлюються. Водночас, за останні п'ять-десять років з'явилися дані [6] про те, що всі природні скупчення нафти, газу та газоконденсату є системами, що самовідновлюються, а значить вони є практично невичерпними. Проблема полягає в тому, що швидкість споживання таких ресурсів перевищує швидкість їх відновлення. Отже, в еколого-математичних моделях мають бути враховані значення швидкості або періоду відновлення природних ресурсів

Формулювання цілей статті. Метою даної роботи є розробка й обґрунтування структури міжгалузевої балансової моделі економіки, яка в різних аспектах враховує вимоги до екологічності виробничих технологій, що реалізуються в описуваній економічній системі.

Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів. За основу візьмемо еколого-економічну модель, запропоновану Леонтьєвим та Фордом, увівши

низку нових припущень щодо її структури:

1. У структурі економіки виділимо три складові: добувні галузі, обробляючі галузі (всі галузі основного балансу крім добувних) та галузі, що переробляють (утилізують) шкідливі відходи.

2. До складу моделі додамо обмеження на максимальні обсяги використання природних ресурсів, що мають великий період відновлення.

3. Додамо також обмеження на максимально допустимі обсяги викидів шкідливих речовин у довкілля.

Тоді модель міжгалузевого балансу можна представити системою рівнянь та нерівностей (1)–(5), записаних у матричному вигляді:

$$X_1 = A_{11}X_1 + A_{12}X_2 + A_{13}X_3 + Y_1, \quad (1)$$

$$X_2 = A_{21}X_1 + A_{22}X_2 + A_{23}X_3 + Y_2, \quad (2)$$

$$X_3 = A_{31}X_1 + A_{32}X_2 + A_{33}X_3 - Y_3, \quad (3)$$

$$X_1 = \left(\sum_{j_1=1}^l a_{i_1 j_1} x_{j_1} + \sum_{j_2=1}^m a_{i_1 j_2} x_{j_2} + \sum_{j_3=1}^n a_{i_1 j_3} x_{j_3} \right) \leq V_{i_1}, i_1 = 1, \dots, l, \quad (4)$$

$$y_{j_3} \leq Z_{i_3}, i_3 = 1, \dots, n, \quad (5)$$

де $X_1 = (x_1^1, x_2^1, \dots, x_l^1)^T$ – вектор-стовпець валового випуску добуваючих галузей;

$X_2 = (x_1^2, x_2^2, \dots, x_m^2)^T$ – вектор-стовпець валового випуску обробляючих галузей;

$X_3 = (x_1^3, x_2^3, \dots, x_k^3)^T$ – вектор-стовпець обсягів знищених забруднювачів (результат діяльності галузей, що знищують шкідливі відходи);

Y_1 та Y_2 – вектори-стовпці обсягів кінцевого випуску галузей двох перших груп;

Y_3 – вектор стовпець обсягів не знищених забруднювачів;

V_{i_1} – максимально допустиме, екологічно обґрунтоване, значення обсягу добування ресурсу i_1 -го виду у даному регіоні протягом заданого періоду (року);

Z_{i_3} – максимально допустиме, екологічно обґрунтоване значення обсягу шкідливих відходів i_3 -го виду.

Підставивши (4) в (1) і ввівши до лівої частини виразу вектор $S = (s_1, s_2, \dots, s_l)^T$, що відіграє роль вектора балансових змінних, отримаємо таке рівняння:

$$X_1 = A_{11}X_1 + A_{12}X_2 + A_{13}X_3 + Y_1 + S = V_{i_1}. \quad (6)$$

Кожну координату вектора S можна трактувати як обсяг економії ресурсів i_1 -го виду. Далі будемо вважати, що економіка є зростаючою. Очевидно, що в цьому випадку $S=0$, і, отже, $X_1 = V_{i_1}$. Тоді (6) набуде такого вигляду:

$$V_{i_1} = A_{11}V_{i_1} + A_{12}X_2 + A_{13}X_3 + Y_1. \quad (7)$$

Очевидно, що при переході від (6) до (7) втрачається змінна X_1 , отже балансовий характер рівняння (7) буде визначатись змінними X_2 , X_3 та Y_1 .

Аналогічну підстановку виконаємо для рівнянь (2) та (3). У результаті отримаємо відповідно:

$$X_2 = A_{21}V_{i_1} + A_{22}X_2 + A_{23}X_3 + Y_2, \quad (8)$$

$$X_3 = A_{31}V_{i_1} + A_{32}X_2 + A_{33}X_3 - Y_3. \quad (9)$$

Тепер, приймаючи ту саму гіпотезу про зростання обсягів виробництва в усіх галузях, можна дійти висновку, що обсяг не знищених забруднювачів буде максимально можливим, тобто:

$$Y_3 = Z(z_1, z_2, \dots, z_{i_3}, \dots, z_n). \quad (10)$$

Враховуючи виконані вище перетворення, модель міжгалузевого балансу з урахуванням

екологічних факторів можна представити в такому вигляді:

$$Y_1 = V_1 - A_{12}X_2 - A_{13}X_3, \quad (11)$$

$$Y_2 = X_2 - V_2 - A_{22}X_2 - A_{23}X_3, \quad (12)$$

$$Z - V_3 = A_{32}X_2 + A_{33}X_3 - X_3, \quad (13)$$

де $V_1 = A_{11} \cdot V$ – вектор витрат ресурсів у добуваючі галузях;

$V_2 = A_{21} \cdot V$ – вектор витрат продукції переробних галузей, що використовується у добувних галузях;

$V_3 = A_{31} \cdot V$ – вектор витрат ресурсів, необхідних для знищення шкідливих відходів.

Далі вважатимемо, що обсяги кінцевого попиту на продукцію галузей першої та другої групи заданий екзогенно. Тоді остаточно отримаємо таку систему рівнянь:

$$\bar{Y}_1 = A_{12}X_2 + A_{13}X_3, \quad (14)$$

$$\bar{Y}_2 = (E - A_{22})X_2 - A_{23}X_3, \quad (15)$$

$$\bar{Y}_3 = A_{32}X_2 - (E - A_{33})X_3, \quad (16)$$

де $\bar{Y}_1 = V_1 + Y_1$, $\bar{Y}_2 = V_2 + Y_2$, $\bar{Y}_3 = Z - V_3$ – відомі вектори (їхні компоненти є константами).

Отже, система матричних балансових рівнянь (14)–(16) являє собою модифіковану статичну модель Леонтьєва-Форда, що враховує обмеження на максимальні обсяги добування природних ресурсів та обмеження на максимальні обсяги не знищених шкідливих відходів різних видів.

Дослідимо побудовану модель на продуктивність, тобто вивчимо, за виконання яких умов система (14)–(16) буде мати допустимі розв'язки. Для спрощення такого аналізу, просумуємо ліві й праві частини всіх рівнянь. У результаті отримаємо:

$$\bar{Y}_1 + \bar{Y}_2 + \bar{Y}_3 = (E + A_{12} - A_{22} + A_{32})X_2 - (E - A_{23} - A_{33})X_3.$$

Очевидно, що множина розв'язків останнього рівняння є незліченною. Проте, можна стверджувати, що при цьому обсяги X_2 виробництва продукції в галузях другого сектору та обсяги X_3 переробки шкідливих відходів у галузях третього сектору мають знаходитись у певній пропорції:

$$X_3 = (E - A_{33} - A_{23})^{-1} (E + A_{12} - A_{22} + A_{32})X_2 - (E - A_{33} - A_{23})^{-1} (\bar{Y}_1 + \bar{Y}_2 + \bar{Y}_3)^T \quad (17)$$

Останній вираз можна подати в більш компактній формі таким чином:

$$X_3 = \tilde{A}X_2 - \tilde{A}_3\tilde{Y}, \quad (18)$$

де

$$\tilde{A} = (E - A_{33} - A_{23})^{-1} (E + A_{12} - A_{22} + A_{32}),$$

$$\tilde{A}_3 = (E - A_{33} - A_{23})^{-1},$$

$$\tilde{Y} = (\bar{Y}_1 + \bar{Y}_2 + \bar{Y}_3)^T.$$

Враховуючи, що всі складові матриці \tilde{A}_3 та вектора-стовпця \tilde{Y} є відомими константами, можна представити їх добуток вектором-стовпцем $\tilde{Y}_3 = \tilde{A}_3\tilde{Y}$:

$$\tilde{X}_3 = \tilde{A}X_2 - \tilde{Y}_3, \quad (19)$$

Таким чином, представлена модель (14)–(16) буде продуктивною, якщо виконана умова (19). Лінійний характер залежності між обсягами валових випусків галузей другого та третього секторів економіки пояснюється гіпотезою про лінійність виробничих функцій, що покладена в основу моделі.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Включення до економічної моделі обмежень на обсяги використання природних ресурсів, що мають тривалий період відновлення, а також обмежень на

максимальні обсяги шкідливих викидів – це лише один із способів урахування екологічних факторів. Розвиток подальших досліджень у цій області може відбуватись по таких напрямках:

1. Введення до складу еколого-економічних моделей вартостей відновлення різних видів ресурсів та оцінок негативних ефектів (екологічних, соціальних) від забруднення навколишнього середовища шкідливими викидами.

2. Ступінь екологічності технологій, що використовуються у виробництві, має стати вагомим фактором в оцінюванні їх ефективності й сприяти відмові від ресурсномістких та забруднюючих технологій на користь ресурсозберігаючих та маловідходних альтернатив. Багатокритеріальна задача вибору найбільш ефективних технологій може вирішуватись, наприклад, із застосуванням методів експертних оцінок у поєднанні з методом аналізу ієрархій.

Література

1. Горстко А.Б. Введение в моделирование эколого-экономических систем / А.Б. Горстко, Г.А. Угольницкий. – Ростов-на-Дону : Изд-во Ростовского университета, 1990. – 112 с.
2. Красс М.С. Моделирование эколого-экономических систем : учеб. пособие / Красс М.С. – М. : ИНФРА-М, 2010. – 272 с.
3. Ляшенко І.М. Основи математичного моделювання економічних, екологічних та соціальних процесів : навч. пос. / Ляшенко І.М., Коробова М.В., Столяр А.М. – Тернопіль : Навчальна книга – Богдан, 2006. – 304 с.
4. Мызникова Т.А. Модели социально-эколого-экономических систем : учебно-метод. пособие / Мызникова Т.А. – Омск : Изд-во СибАДИ, 2008. – 62 с.
5. Онищенко А. М. Моделювання еколого-економічної взаємодії в процесі виконання рішень Кіотського протоколу : монографія / А. М. Онищенко. – Полтава : Полтавський літератор, 2011. – 398 с.
6. Тадеєв Ю. П. Економіко-математичне моделювання еколого-економічних систем в умовах сталого розвитку : дис. ... канд. екон. наук : 08.03.02 / Київський національний ун-т ім. Тараса Шевченка. — К., 2006. — 182 арк.
7. <http://www.atp.mil.gov.ua/number/15/114.htm>.

Надійшла 10.09.2015; рецензент: д. е. н. Лук'янова В. В.