



ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕКОНОМІЧНА БЕЗПЕКА

УДК 330.4:519.866

DOI: 10.37332/2309-1533.2021.1-2.23

JEL Classification: C 610, C 630, E 270

Григорків В.С.,
*д-р фіз.-мат. наук, професор,
 завідувач кафедри економіко-математичного моделювання,*
 Григорків М.В.,
*канд. екон. наук, доцент,
 доцент кафедри економіко-математичного моделювання,
 Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича*

ДИНАМІЧНІ МОДЕЛІ ОДНОСЕКТОРНОЇ ЕКОНОМІКИ З УРАХУВАННЯМ УТИЛІЗАЦІЇ ПРОДУКТІВ ЗАБРУДНЕННЯ

Hryhorkiv V.S.,
*dr.sc.(phys.-math.), professor, head of the economic
 modeling and business informatics department,
 Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University,*
 Hryhorkiv M.V.,
*cand.sc.(econ.), assoc. prof., associate professor of economic
 modeling and business informatics department,
 Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University*

DYNAMIC MODELS OF ONE-SECTOR ECONOMY TAKING INTO ACCOUNT THE UTILIZATION OF POLLUTION PRODUCTS

Постановка проблеми. Екологічна ситуація у світі та в Україні у тому числі сьогодні потребує кардинального покращення. Негативні явища, що все частіше відбуваються у навколишньому середовищі, нерідко є наслідком згубної для природного середовища людської діяльності, у результаті якої появилися такі джерела забруднення довкілля, яких раніше не існувало. Одним із цих джерел, без сумніву, є виробництво, яке у більшості випадків не є або й не може бути безвідходним. Викиди виробничих решток забруднюють навколишнє середовище і породжують екологічно небезпечні умови для існування людини, флори та фауни. Але антропогенний вплив не обмежується лише виробничою чи у більш загальному розумінні економічною діяльністю людського суспільства. Він проявляється також у зв'язку з неадекватною поведінкою людини щодо побутових відходів, організації та ведення бізнесу, екологічною неосвіченістю та культурою і багатьма іншими людськими діями. Це означає, що, крім виробничого забруднення (ВЗ), людина створює також забруднення невиробничого характеру, яке у сукупності з ВЗ надалі назвемо продуктами забруднення (ПЗ). Саме такі ПЗ, а не ті, що виникають внаслідок природних катаклізмів, людство може і зобов'язане утилізувати, максимально зменшуючи свою роль у негативних змінах довкілля. Утилізація ПЗ є одним із видів економічної діяльності, тому екологізація економіки та, власне кажучи, людського життя є актуальною проблемою у сучасному світі, розв'язання якої неможливе без ґрунтовних наукових досліджень у цьому напрямку, зокрема у галузі моделювання складних динамічних систем, до яких належить економіка.

Моделювання є одним із найбільш економічних і ефективних методів дослідження, а математичне моделювання – його універсальним інструментом, який у поєднанні з інформаційними технологіями утворює потужну дослідницьку платформу сучасної науки. Моделювання дозволяє імітувати поведінку у просторі та часі таких складних об'єктів, як економічні або еколого-економічні системи, динаміка яких залежить від впливу великої кількості об'єктивних і суб'єктивних факторів. Урахування цих факторів у моделях, хоча й призводить до значної кількості змінних і параметрів, але в режимі комп'ютерної імітації дозволяє перевіряти різні сценарії розвитку еколого-економічних систем, аналізувати можливі

допустимі траєкторії та наслідки як соціально-економічного, так і екологічного характеру, що відіграє надзвичайно важливу роль при розв'язанні проблем взаємодії економічної, екологічної та соціальної підсистем тієї складної системи, якою сьогодні є економіка. Зважаючи на те, що економіка може досліджуватися на різних рівнях агрегування, наприклад, на рівні регіону, країни чи навіть у масштабі усього світового простору, приходиться використовувати не тільки різні концептуальні та методологічні підходи до її описання та власне моделювання, але й будувати різні за розмірністю та типами моделі, які часто класифікують на локальні або глобальні моделі. Це все впливає із аналізу результатів багатьох наукових досліджень, абсолютну більшість яких навіть неможливо згадати у рамках даної праці, але принаймні короткий анонс деяких ключових моментів такого аналізу є зміст зробити нижче.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Фундаментальні основи наукових досліджень процесів еколого-економічної взаємодії та переходу економіки до моделі сталого (стійкого) розвитку були сформовані у науці у другій половині ХХ століття працями Дж. Форрестера [1], Д. Медоуза [2], В. Леонтьєва, Д. Форда [3], М. Месаревича, Е. Пестеля [4], М. Мойсєєва [5; 6] та багатьох інших всесвітньовідомих вчених. У цих працях розроблено концептуальні підходи до вивчення еколого-економічних систем різного рівня агрегування, побудовано глобальні та локальні моделі динаміки таких систем, на основі яких проаналізовано наслідки процесів екологічної деградації економіки у масштабах окремих регіонів та світу у цілому, розроблено прогнози щодо негативних процесів, які будуть відбуватися у майбутньому, якщо людство не зрозуміє необхідності розвитку екологічно та соціально збалансованої економіки. У радянській та російській науці, крім М. Мойсєєва, добре відомі науковій громадськості імена О. Петрова, І. Поспелова, О. Шананіна [7], які разом із своїми учнями займалися побудовою математичних моделей економіки як на макро-, так і на мікрорівні з урахуванням різних факторів, у тому числі й екологічних. Не зупиняючись на конкретизації багатьох інших прізвищ зарубіжних науковців, які ефективно працювали чи працюють у напрямку дослідження еколого-економічної проблематики, зазначимо, що українська наука тут також займає своє важливе місце. Достатньо згадати результати досліджень І. Ляшенка, М. Михалевича [8; 9], А. Онищенко [10], Л. Буяк [11] та інших, внесок яких у становлення та розвиток методології моделювання еколого-економічних процесів і систем є суттєвим для подальших досліджень наших науковців у цьому напрямку.

Однак, незважаючи на здобутки зазначених вище і багатьох інших дослідників у галузі моделювання еколого-економічних процесів і систем, невирішеною частиною окресленої проблеми є побудова деяких класів динамічних моделей економіки з урахуванням процесів її екологізації, чому власне і присвячена дана праця.

Постановка завдання. Як у теоретичному, так і в прикладному сенсі актуальним є дослідження динаміки еколого-економічних систем, оскільки результати такого дослідження дають можливість прогнозувати можливі сценарії розвитку економіки в умовах її екологізації. Як об'єкт дослідження, еколого-економічна динаміка є складним і багатогранним об'єктом пізнання, тому для його вивчення використовується комплексний методологічний та прикладний інструментарій, основою якого є математичні моделі еколого-економічних процесів і систем. У зв'язку з цим метою пропонованого дослідження є розробка динамічних моделей економіки з урахуванням утилізації продуктів забруднення виробничого та невиробничого характеру і контролю над забрудненням довкілля неутілізованими рештками продуктів забруднення. При цьому у цих моделях повинні бути враховані як екологічні, так і соціальні вимоги до економіки. Реалізація зазначених вимог можлива, якщо до показників стану досліджуваної економіки належать як соціально-економічні, так і екологічні показники, динаміка яких, власне кажучи, і формує траєкторію еколого-економічної динаміки у фазовому просторі показників чи змінних моделі. При цьому можна запропонувати різні підходи до конкретизації економіки як системи та формалізації процесів, що у ній відбуваються. У рамках сформульованого завдання розглядається односекторна економіка, яка для забезпечення суспільства виробляє єдиний агрегований продукт або основний продукт (ОП) і здійснює утилізацію ПЗ (повну чи часткову), тобто створює чи виробляє також продукт «чисте довкілля» (ПЧД). Методи дослідження такої економіки та її моделі складають предмет даного дослідження.

Виклад основного матеріалу дослідження. Розглянемо односекторну економіку, яка створює ОП та ПЧД і в якій задіяні M власників виробництв (виробників) ОП та ПЧД та N працівників. Ці два кластери суспільства є безпосередніми творцями товарів і благ, необхідних для забезпечення суспільних потреб. Будемо припускати, що усі представники кожного із цих кластерів є рівнозначними у своїй групі, тобто ліквідний капітал чи ліквідні заощадження (надалі просто заощадження) власника чи працівника репрезентують рівень заощаджень усіх членів відповідного суспільного кластеру (таке припущення є виправданим при дослідженні основних трендів та закономірностей загальної еколого-економічної динаміки). Нижче через x_M та x_N позначимо відповідно заощадження власника виробництв та працівника. Крім того, через c позначимо ціну на ОП, \tilde{c} – тариф на утилізацію ПЗ, а через z – обсяг забруднення довкілля неутілізованими рештками ПЗ. Ці динамічні змінні (показники

стану еколого-економічної динаміки) визначають фазовий простір досліджуваної економіки як динамічної системи та відповідну траєкторію динаміки, яка повинна бути розв'язком побудованої тієї чи іншої моделі цього класу. Приступимо до формалізації однієї із них. Насамперед зазначимо, що

наявні заощадження x_M та x_N формують відповідні купівельні спроможності $s_\alpha = \frac{\alpha x_M}{c}$ та

$s_{\tilde{\alpha}} = \frac{\tilde{\alpha} x_N}{c}$, де α та $\tilde{\alpha}$ ($0 \leq \alpha, \tilde{\alpha} \leq 1$) – частки заощаджень власника та працівника, які

виділяються на придбання ОП. Реальний попит на ОП моделюється функцією попиту $q = q(s)$, де s – купівельна спроможність. Випуск ОП описується функцією $f = f(s)$, де s – виробнича спроможність щодо обсягу випуску ОП. Якщо β ($0 \leq \beta \leq 1$) – частка заощаджень виробника, яка

виділяється на випуск ОП, то $s_\beta = \frac{\beta x_M}{p}$ – його виробнича спроможність, а $f(s_\beta)$ – обсяг випуску

ОП. Аналогічно якщо γ ($0 \leq \gamma \leq 1$, $\alpha + \beta + \gamma \leq 1$) – частка заощаджень виробника, яка

витрачається на утилізацію ПЗ, то $s_\gamma = \frac{\gamma z_M}{\tilde{c}}$ – його утилізаційна спроможність. Реальний обсяг

утилізованого забруднення визначається величиною $\varphi(s_\gamma)$, де $\varphi = \varphi(s)$ – функція утилізації (або функція випуску ПЧД). Будемо вважати, що обсяг створеного ОП визначає обсяг ВЗ, а точніше, що обсяг ВЗ дорівнює $\lambda f(s_\beta)$ одиниць (од.) забруднення ($0 \leq \lambda \leq 1$). Попит виробника на утилізацію

ВЗ формалізуємо за допомогою коефіцієнта λ^* ($0 \leq \lambda^* \leq 1$), тобто обсяг попиту у даному випадку

оцінимо величиною $\lambda^* \lambda f(s_\beta)$ (коефіцієнт λ^* залежить не лише від утилізаційних можливостей винуватця забруднення, але й від його відношення до проблеми утилізації ВЗ). Далі, нехай пропозиція забруднення невиробничого характеру (його випуск), тобто забруднення, створеного суспільством за межами економічного сектора, становить Z од., а попит на його утилізацію (частина ПЗ, яку суспільство та держава може профінансувати) – Z^* од. ($Z^* \leq Z$). Ввівши у розгляд зазначені вище

величини, можна розпочати формалізацію рівнянь динаміки змінних $x_M, x_N, c, \tilde{c}, z$.

Якщо через μ_β та μ_γ ($0 \leq \mu_\beta, \mu_\gamma \leq 1$) позначити відповідно частку доданої вартості під час випуску ОП та ПЧД, яка витрачається на зарплату робітникам (ці величини складають $\mu_\beta c f(s_\beta)$ та $\mu_\gamma \tilde{c} \varphi(s_\gamma)$ грошових од.), через π_0 – ставку податку на дохід, а через

$$\Phi = M \left[c \mu_\beta f(s_\beta) + \tilde{c} \mu_\gamma \varphi(s_\gamma) \right],$$

то рівняння динаміки заощаджень працівника матиме вигляд:

$$\frac{dx_N}{dt} = \frac{\Phi}{N} (1 - \pi_0) - c q(s_{\tilde{\alpha}}). \quad (1)$$

Дохід виробника залежить від його частки забезпечення попиту на ОП усіх виробників і працівників $P^* = \frac{1}{M} [M q(s_\alpha) + N q(s_{\tilde{\alpha}})]$, частки забезпечення попиту на ОП іншої (не задіяної у виробництві) частини суспільства, яку можна оцінити величиною $k_p^* P^*$, де k_p^* – коефіцієнт попиту, а також від забезпечення попиту суспільства на ПЧД (на утилізацію), тобто від величини $P^{**} = Z^* / M$. Витрати виробника розподіляються на особисте споживання ОП, фонд заробітної плати та податок на нього (через π_1 позначимо ставку податку), організаційні потреби на створення додаткової вартості у процесі виробництва ОП та утилізації ПЗ і податки на ці види доданої вартості (нехай λ_β та λ_γ (

$0 \leq \lambda_\beta, \lambda_\gamma \leq 1$) – відповідні частки доданої вартості, які виділяються на організаційні потреби виробництва ОП і ПЧД, а π_2 і π_3 – ставки податків на додану вартість під час виробництва ОП і ПЧД). Враховуючи, що дохід оподатковується, рівняння динаміки x_M буде таким:

$$\frac{dx_M}{dt} = c(1 + k_P^*)P^* + \tilde{c}P^{**} - cq(s_\alpha) - \frac{\Phi(1 + \pi_1)}{M} - c(\lambda_\beta + \pi_2)f(s_\beta) - \tilde{c}(\lambda_\gamma + \pi_3)\varphi(s_\gamma). \quad (2)$$

Як відомо, ринкова ціна на ОП залежить від різниці попиту на цю продукцію та її пропозиції, тому рівняння зміни у часі ціни c має вигляд:

$$\frac{dc}{dt} = \theta_\beta \cdot M \left[(1 + k_P^*)P^* - f(s_\beta) \right], \quad (3)$$

де θ_β – так званий коефіцієнт регулювання ціни або інерційності ринку ОП.

Тариф на утилізацію також змінюється під впливом надлишкового попиту на утилізацію (чи на ПЧД). Отже, рівняння динаміки \tilde{c} формалізується у вигляді:

$$\frac{d\tilde{c}}{dt} = \theta_\gamma \left[Z^* + M \lambda^* \lambda f(s_\beta) - M \varphi(s_\gamma) \right], \quad (4)$$

де θ_γ – коефіцієнт регулювання тарифу.

Неутилізовані рештки виробничої та невиробничої діяльності попадають у навколишнє середовище, яке має певну здатність до самоочищення. Ця здатність може бути відображена коефіцієнтом самоочищення або природного зменшення забруднення μ ($0 \leq \mu \leq 1$). Тому приріст забруднення навколишнього середовища неутилізованими рештками фактично дорівнює різниці між обсягами створеного забруднення та обсягами утилізованого (у процесі економічної діяльності та природою) забруднення, тобто:

$$\frac{dz}{dt} = M \lambda f(s_\beta) + Z - M \varphi(s_\gamma) - \mu z. \quad (5)$$

Логічно також припускати, що у початковий момент часу t_0 значення змінних моделі відомі, тобто що:

$$\begin{cases} x_N(t_0) = x_N^{(0)}, & x_M(t_0) = x_M^{(0)}, \\ c(t_0) = c^{(0)}, & \tilde{c}(t_0) = \tilde{c}^{(0)}, \\ z(t_0) = z^{(0)}, \end{cases} \quad (6)$$

де $x_N^{(0)}$, $x_M^{(0)}$, $c^{(0)}$, $\tilde{c}^{(0)}$, $z^{(0)}$ – задані значення.

Співвідношення (1)-(6) формалізують одну із динамічних моделей односекторної економіки з урахуванням утилізації ПЗ. Інші варіанти моделей цього класу формалізуються залежно від ряду інших припущень, які можуть бути базовими для побудови моделей. Наприклад, можна припускати також, що обсяг загального попиту на ОП елементів суспільства, які не беруть участь у реальному економічному секторі, дорівнює $k_M^* Mq(s_\alpha)$ од. або $k_N^* Nq(s_\alpha)$ од., де k_M^* і k_N^* – відповідні коефіцієнти пропорційності. Тоді рівняння динаміки заощаджень власника виробництв набуде вигляду:

$$\frac{dx_M}{dt} = c(P^* + k_M^* q(s_\alpha)) + \tilde{c}P^{**} - cq(s_\alpha) - \frac{\Phi(1 + \pi_1)}{M} - c(\lambda_\beta + \pi_2)f(s_\beta) - \tilde{c}(\lambda_\gamma + \pi_3)\varphi(s_\gamma). \quad (7)$$

або

$$\frac{dx_M}{dt} = c \left(P^* + \frac{k_N^* Nq(s_{\tilde{\alpha}})}{M} \right) + \tilde{c}P^{**} - cq(s_{\alpha}) - \frac{\Phi(1 + \pi_1)}{M} - c(\lambda_{\beta} + \pi_2)f(s_{\beta}) - \tilde{c}(\lambda_{\gamma} + \pi_3)\varphi(s_{\gamma}), \quad (8)$$

а рівняння динаміки ціни – вигляду:

$$\frac{dc}{dt} = \theta_{\beta} \cdot M \left[(P^* + k_M^* q(s_{\alpha})) - f(s_{\beta}) \right] \quad (9)$$

або

$$\frac{dc}{dt} = \theta_{\beta} \cdot M \left[\left(P^* + \frac{k_N^* Nq(s_{\tilde{\alpha}})}{M} \right) - f(s_{\beta}) \right]. \quad (10)$$

Аналогічно можна вважати, що обсяг випуску забруднення Z та обсяг попиту на ПЧД Z^* у цієї частини суспільства також зв'язані певними коефіцієнтами пропорційності з відповідним обсягу випуску V_3 та попиту на утилізацію V_3 . Інакше кажучи, якщо $Z = k_Z^* M \lambda f(s_{\beta})$, $Z^* = k_Z^* M \lambda^* \lambda f(s_{\beta})$, то у рівняннях (2), (7), (8) замість P^{**} потрібно підставити величину $\tilde{P}^{**} = k_Z^* \lambda^* \lambda f(s_{\beta})$, а від рівнянь (4), (5) прийдемо відповідно до наступних рівнянь:

$$\frac{d\tilde{c}}{dt} = \theta_{\gamma} M \left[(1 + k_Z^*) \lambda^* \lambda f(s_{\beta}) - \varphi(s_{\gamma}) \right], \quad (11)$$

$$\frac{dz}{dt} = M \left[(1 + k_Z^*) \lambda f(s_{\beta}) - \varphi(s_{\gamma}) \right] - \mu z. \quad (12)$$

У результаті зазначених вище припущень отримаємо варіанти моделей еколого-економічної динаміки (1), (7), (9), (4)-(6); (1), (8), (10), (4)-(6); (1), (7), (9), (11), (12), (6); (1), (8), (10), (11), (12), (6). Варіювання співвідношень (7)-(12) дозволяє отримати також інші варіанти модифікацій базової моделі (1)-(6).

Деталізовані вище та інші припущення дуже важливі для практики у плані формування інформаційного забезпечення моделей, яке повинно бути достатньо адекватно обґрунтованим для ідентифікації моделей. Не зупиняючись на припущеннях іншого змісту, зазначимо, що будь-які розширення моделі (1)-(6) чи її модифікації є актуальними, якщо вони пов'язані із практичними явищами та процесами еколого-економічної взаємодії.

Висновки з проведеного дослідження. Запропонована модель та її можливі модифікації у математичному плані належать до нелінійних диференціальних моделей, тому їх ідентифікація та практичне застосування потребує від дослідників достатньо високого рівня знань, умінь та прикладного досвіду. Моделі цього класу, особливо деякі найпростіші із них, є ефективним інструментарієм для якісного дослідження еколого-економічних процесів, зокрема для вивчення стійкості чи нестійкості станів еколого-економічних систем, обґрунтування екологічних стандартів досліджуваної економіки та її впливу на навколишнє середовище. Крім того, результати експериментальних досліджень з моделями цього класу служать для встановлення основних закономірностей та тенденцій еколого-економічної динаміки реальних економічних систем. Отримані на основі моделей знання можуть бути ефективно використані у аналітичному та експертному обґрунтуванні алгоритмів прийняття рішень в екологічній економіці, що є важливим для економічної практики.

Література

1. Форрестер Дж. Мировая динамика. Москва : Наука, 1978. 168 с.
2. Медоуз Д. Х., Медоуз Д. Л., Рандерс Й. За пределами роста : уч. пос. Москва : Прогресс, Пангея, 1994. 304 с.
3. Леонтьев В. В., Форд Д. Межотраслевой анализ влияния структуры экономики на окружающую среду. *Экономика и математические методы*. Москва, 1972. Т. 8. № 3. С. 370-400.
4. Mesarovich M., Pestel E. Mankind at the Turning Point. New York, 1974. 230 p.
5. Моисеев Н. И. Универсум. Информация. Общество. Москва : Устойчивый мир, 2001. 200 с.
6. Моисеев Н. Н. Экология человечества глазами математика: (Человек, природа и будущее цивилизации). Москва : Мол. гвардия, 1988. 254 с.

7. Петров А. А., Поспелов И. Г., Шананин А. А. Опыт математического моделирования экономики. Москва : Энергоатомиздат, 1996. 544 с.
8. Ляшенко І. М. Економіко-математичні методи та моделі сталого розвитку. Київ : Вища школа, 1999. 236 с.
9. Ляшенко И. Н., Михалевич М. В., Утеулиев Н. У. Методы эколого-экономического моделирования. Нукус : Билим, 1994. 236 с.
10. Онищенко А. М. Моделивання еколого-економічної взаємодії в процесі виконання рішень Кіотського протоколу : монографія. Полтава : Полтавський літератор, 2011. 398 с.
11. Буяк Л. М. Математичні моделі загальної економічної динаміки з урахуванням соціально-економічної кластеризації : монографія. Чернівці : Чернівецький нац. ун-т, 2016. 392 с.

References

1. Forrester, J. (1978), *Mirovaia dinamika* [World dynamics], Nauka, Moscow, Russia, 168 p.
2. Meadows, D.H., Meadows, D.L. and Randers, J. (1994), *Za predelami rosta* [Beyond growth], tutorial, Progress, Pangeia, Moscow, Russia, 304 p.
3. Leontev, V.V. and Ford, D. (1972), "Interdisciplinary analysis of the influence of economic structure on the environment", *Ekonomika i matematicheskiye metody*, Vol. 8, no. 3, pp. 370-400.
4. Mesarovich, M. and Pestel, E. (1974), *Mankind at the Turning Point*, N. Y., 230 p.
5. Moiseyev, N.I. (2001), *Universum. Informatsiya. Obshchestvo*. [Universum. Information. Society.], Ustoychivyy mir, Moscow, Russia, 200 p.
6. Moiseev, N.N. (1988), *Ekologiya chelovechestva glazami matematika: (Chelovek, priroda i budushheye tsivilizatsii)* [The ecology of humanity through the eyes of a mathematician: (Human, nature and the future of civilization)], Mol. gvardiya, Moscow, Russia, 254 p.
7. Petrov, A.A., Pospelov, I.G. and Shaninin, A.A. (1996), *Opyt matematicheskogo modelirovaniya ekonomiki* [Experience of the economy of mathematical modeling], Energoatomizdat, Moscow, Russia, 544 p.
8. Liashenko, I.M. (1999), *Ekonomiko-matematychni metody ta modeli staloho rozvytku* [Economic and mathematical methods and models of sustainable development], Vyshha shkola, Kyiv, Ukraine, 236 p.
9. Lyashenko, I.N., Mikhalevich, M.V. and Uteulyev, N.U. (1994), *Metody ekologo-ekonomicheskogo modelirovaniya* [Methods of the eco-economic modeling], Bilim, Nukus, Uzbekistan, 236 p.
10. Onyschenko, A.M. (2011), *Modeliuvannia ekoloho-ekonomichnoi vzaiemodii v protsesi vykonannia rishen Kiotskoho protokolu* [Modelling of ecologic-economic interaction in the process of implementation decisions of Kiotskogo protocol], monograph, Poltavskiy literator, Poltava, Ukraine, 398 p.
11. Buiak, L.M. (2016), *Matematychni modeli zahalnoi ekonomichnoi dynamiky z urakhuvanniam sotsialno-ekonomichnoi klasteryzatsii* [Mathematical models of general economic dynamics taking into account socio-economic clustering], monograph, Chernivetskiy nats. un-t, Chernivtsi, Ukraine, 392 p.