

К.Л. АТОЄВ

Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, Київ, Україна,
e-mail: *konstantin_atoyev@yahoo.com*.

П.С. КНОПОВ

Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, Київ, Україна,
e-mail: *knopov1@yahoo.com*.

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ КЛІМАТИЧНИХ
ЗМІН НА ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКИ СЕКТОРІВ ЕКОНОМІКИ¹**

Анотація. Розроблено математичну модель для визначення умов, які забезпечують мінімізацію швидкості зростання концентрації парникових газів (ПГ) в атмосфері та підтримання заданого рівня якості життя населення. Модель об'єднує в єдиній структурі описані в однаковий спосіб сектори економіки, кожен з яких розглянуто в термінах рівнів продуктивності, кількості робочих місць і структурних порушень (шестисекторна модель Лоренца зі змінюваними коефіцієнтами, які залежать від рівня ПГ). Модель дає змогу дослідити, як зміни рівня ПГ та взаємозв'язки між різними секторами економіки впливають на ризики, що загрожують сталому розвитку, та рівень якості життя населення. Визначено умови виникнення турбулентних режимів функціонування, які призводять до зростання сумарної кількості структурних порушень та зниження сумарного рівня продуктивності. Запропоновано підхід до оцінювання рівня загроз сталому розвитку в умовах кліматичних змін.

Ключові слова: модель Лоренца, математичне моделювання, модель економічного розвитку, оптимальне керування, детермінований хаос, кліматичні зміни.

ВСТУП

Адаптація глобального суспільства до нових негативних кліматичних, соціально-економічних та епідемічних змін набуває пріоритетного значення на сучасному етапі світового розвитку. Зростаюча взаємозалежність різних вимірів безпеки та широкий спектр загроз створюють своєрідний синергетичний ефект, привносять додаткові ризики, які мають системний характер, зумовлений великою щільністю зв'язків у глобальній економіці, порушують збалансованість окремих її сегментів, деформують її структуру та провокують невизначеність. Це призводить до значного зниження якості прогнозів.

Виміри безпеки складних ієрархічних систем зазвичай ґрунтуються на оцінюванні наближеності їхніх параметрів до граничних значень, по досягненню яких ситуація, що склалася, вважається загрозовою. Проте не тільки рівні окремих показників характеризують сталість функціонування цих систем. Їхні резервні можливості, а також безпека та ефективність роботи багато в чому визначаються збалансованістю окремих системних ланцюгів. Є своєрідний «мобіль» безпеки (динамічний інваріант), коли негативна динаміка одних показників компенсується за рахунок інших. Тому для кількісного оцінювання ризиків, що виникають внаслідок глобальних змін, потрібно створити моделі, які дадуть змогу формалізувати залежність критичних параметрів від еколого-економічних, епідемічних та соціальних факторів. Ця формалізація потрібна для розв'язання важливих безпекових проблем інтегрованих моделей, які об'єднують різні контури регулювання складних систем та дають змогу: а) визначати ефективні сценарії досягнення оптимальних траєкторій сталого розвитку в умовах невизначеності, кліматичних змін та геополітичних турбулентностей;

¹ Роботу виконано за часткової підтримки Національного фонду досліджень України (грант № 2020.02/0121).

б) прогнозувати динаміку загроз для критичної інфраструктури і аграрно-промислового комплексу та оцінювати їхню залежність від екологічних та соціально-економічних факторів; в) розв'язувати задачі управління ризиками заради мінімізації негативних наслідків природних та антропогенних надзвичайних ситуацій та максимізації рівня якості життя населення. Актуальність цих розроблень зумовлена: а) різким зростанням антропогенного впливу на довкілля внаслідок зростання рівня ПГ та забруднення великих територій у результаті техногенних катастроф та воєнних дій; б) посиленням впливу кліматичних змін, скорочення посівних площ та порушення логістичних ланцюгів постачання продовольства на продовольчу безпеку; в) підвищенням рівня епідемічних загроз внаслідок появи нових пандемій, спричинених високовірулентними мікроорганізмами; г) потребою у визначенні ефективних заходів щодо захисту об'єктів критичної інфраструктури. Метою цієї роботи є розроблення математичних моделей для дослідження впливу зростання рівня ПГ на взаємопов'язані сектори економіки, визначення ефективних стратегій впровадження «зеленої» енергетики, управління ризиками незворотних змін простору безпеки та розроблення стратегії мінімізації їхніх руйнівних наслідків.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ДИНАМІКИ ВПРОВАДЖЕННЯ ЗЕЛеної ЕНЕРГЕТИКИ

Широке впровадження «зеленої» енергетики на основі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) визнано головним напрямом зосередження зусиль світової спільноти у боротьбі з глобальним потеплінням [1]. Однак, через складність мережевої структури сучасної глобальної економіки потрібно надати глибоке наукове обґрунтування заходів щодо такої трансформації енергетики та здійснити прогнозування довгострокових наслідків їхнього впровадження. За умов зростаючої невизначеності це зробити складно. Вагомими факторами, які доводиться враховувати під час вироблення ефективної стратегії переходу енергетики на ВДЕ, є зростання інфляції та сповільнення економічного зростання, зокрема через пандемію COVID-19 та політичну дестабілізацію у світі. На цьому тлі зростання ціни на паливо (а «зелена» енергетика є дорогою), призводить до зниження соціальних стандартів життя. Це гальмує перехід до нового типу енергетики з використанням ВДЕ. Отже, декарбонізація енергетичного сектору за рахунок збільшення частки ВДЕ з погляду математики є складною мінімаксною задачею оптимального керування. Її можна сформулювати так: потрібно визначити динаміку змінювання частки ВДЕ у загальному балансі виробництва електроенергії, за якої на заданому інтервалі часу забезпечується максимум рівня якості життя та мінімум рівня зростання ПГ для заданих обмежень на допустимі межі їхньої зміни.

У роботі [2] побудовано математичні моделі для визначення оптимальних співвідношень часток звичайної та зеленої енергетик, а також проведено їхнє числове дослідження. Під час побудови цих моделей зроблено такі припущення.

1. Ресурси, наявні в економіці, можуть забезпечити функціонування двох типів енергетик — звичайної та зеленої. Основою першої є видобуток корисних копалин, а другої — ВДЕ. Суспільство може змінювати співвідношення внесків двох цих типів енергетик у стаке зростання економіки.

2. Найбільший обсяг викидів ПГ утворюється в результаті антропогенної діяльності — спалювання викопного палива для вироблення електричної та теплової енергії, а також для потреб транспорту.

3. Зростання рівня ПГ в атмосфері гальмує відновлення звичайної енергетики, оскільки уряди накладають штрафні санкції на підприємства, діяльність яких пов'язана зі збільшенням обсягу викидів, та спрямовують значні ресурси на боротьбу з наслідками кліматичних змін.

4. Швидкість накопичення ПГ пропорційна інтенсивності функціонування галузей енергетики, що працюють на сировинній базі. Водночас зелена енергетика сприяє зниженню їхнього рівня завдяки впровадженню різних екологічних технологій, що зв'язують ПГ та підвищують енергоефективність.

5. Діоксид вуглецю забезпечує основний внесок у парниковий ефект, пов'язаний з антропогенною діяльністю. Відмітною особливістю цього газу є довготривалий вплив на клімат. Він значною мірою зберігається протягом сотень років [3] після припинення емісії, яка його спричинила.

У цій статті досліджено такі моделі методами якісної теорії диференціальних рівнянь. Найпростіша модель, побудована у межах зроблених припущень, має такий вигляд:

$$\begin{aligned}\frac{dC}{dt} &= a_1 E - a_2 C G, \quad \frac{dG}{dt} = V_1 y (C_{\max} - C) - a_3 G, \\ \frac{dE}{dt} &= V_2 (1 - y) (C_{\max} - C) - a_4 E,\end{aligned}\quad (1)$$

де C — рівень ПГ; E та G — рівні функціонування звичайної та “зеленої” енергетик відповідно; y — частка “зеленої” енергетики у загальному енергетичному балансі; a_1 — швидкість генерації ПГ енергетикою E ; a_2 — швидкість розпаду ПГ; V_1 та V_2 — швидкості відтворення “зеленої” та звичайної енергетик відповідно; $C_{\max}$ — максимальний рівень ПГ, після досягнення якого робота енергосистеми стає неможливою; a_3 та a_4 — швидкості заміни технологій в енергетиках E та G відповідно. Заміною змінних систему (1) можна звести до такого вигляду:

$$\varepsilon_1 \frac{dc}{dt} = \alpha E - cG, \quad \varepsilon_2 \frac{dG}{dt} = v_1 y (1 - c) - G, \quad \varepsilon_3 \frac{dE}{dt} = v_2 (1 - y) (1 - c) - E, \quad (2)$$

де $c = C / C_{\max}$, $\varepsilon_1 = 1 / a_2$, $\varepsilon_2 = 1 / a_3$, $\varepsilon_3 = 1 / a_4$, $\alpha = 1 / (a_2 C_{\max})$, $v_1 = V_1 C_{\max} / a_3$, $v_2 = V_2 C_{\max} / a_4$.

Система (2) має дві стаціонарні точки:

$$P_1 (c=1, G=0, E=0),$$

$$P_2 (c = \alpha v_2 (1 - y) / (v_1 y), G = (v_1 + \alpha v_2) y - \alpha v_2, E = (1 - y) v_2 [(v_1 + \alpha v_2) y - \alpha v_2] / (v_1 y)).$$

Для дослідження стійкості стаціонарних точок розглянемо лінеаризовану систему (2). Для точки P_1 характеристичне рівняння має такий вигляд:

$$(1 + \lambda) \{\lambda^2 + \lambda + [\alpha v_2 - (v_1 + \alpha v_2) y]\} = 0.$$

Точка P_1 є стійкою, якщо $y < \alpha v_2 / (v_1 + \alpha v_2)$. Якщо виконуються умови $(4\alpha v_2 - 1) / (4v_1 + \alpha v_2) < y < \alpha v_2 / (v_1 + \alpha v_2)$, то P_1 — стійкий вузол. Якщо $y < (4\alpha v_2 - 1) / (4v_1 + \alpha v_2)$, то P_1 — стійкий фокус. Якщо $y > \alpha v_2 / (v_1 + \alpha v_2)$, то точка P_1 — сідло. Точка P_2 є стійким вузлом, якщо $y > \alpha v_2 / (v_1 + \alpha v_2)$, та сідлом, якщо $y < \alpha v_2 / (v_1 + \alpha v_2)$.

Ускладнимо модель, увівши функцію $f(G, E) = A_0 + A_e E + A_g G$. Припустимо, що швидкості відтворення енергії є лінійними функціями E і G . Параметри A_e та A_g характеризують ефективність роботи з відтворення енергії

у відповідних типах енергетик. Система (2) набуває такого вигляду:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{10} \frac{dc}{dt} &= \alpha_1 e - cg, \quad \varepsilon_2 \frac{dg}{dt} = v_{10} y (1 - c) (1 + e + g) - g, \\ \varepsilon_3 \frac{de}{dt} &= v_{20} (1 - y) (1 - c) (1 + e + g) - e,\end{aligned}\quad (3)$$

де $g = A_g G / A_0$, $e = A_e E / A_0$, $\alpha_1 = \alpha A_g / A_e$, $\varepsilon_{10} = \varepsilon_1 A_g / A_0$, $v_{10} = v_1 A_g$, $v_{20} = v_2 A_e$.

Система (3) має дві стаціонарні точки:

$$P_1 (c_1 = 1, g_1 = 0, e_1 = 0)$$

та

$$P_2 (c_2 = \alpha_1 v_{20} (1 - y) / (v_{10} y),$$

$$g_2 = v_{10} y [v_{10} y - \alpha_1 v_{20} (1 - y)] / \{v_{10} y - [v_{10} y - \alpha_1 v_{20} (1 - y)][v_{10} y + v_{20} (1 - y)]\},$$

$$e_2 = v_{20} (1 - y) [v_{10} y - \alpha_1 v_{20} (1 - y)] / \{v_{10} y - [v_{10} y - \alpha_1 v_{20} (1 - y)][v_{10} y + v_{20} (1 - y)]\}.$$

Якщо врахувати, що $\alpha \rightarrow \alpha_1$, $v_1 \rightarrow v_{10}$, $v_2 \rightarrow v_{20}$, то умови стійкості для точки P_1 у системах (2) та (3) збігаються. Умови стійкості для точки P_2 визначають шляхом аналізу коренів характеристичного рівняння $\lambda^3 + A\lambda^2 + B\lambda + C = 0$, де

$$A = g_2 + 2 - (1 - c_2) [v_{10} y + v_{20} (1 - y)],$$

$$\begin{aligned}B &= 1 - (1 - c_2) [v_{10} y + v_{20} (1 - y)] + g_2 \{2 - (1 - c_2) [v_{10} y + v_{20} (1 - y)] - \\ &\quad - (1 + g_2 + e_2) [c_2 v_{10} y - \alpha_1 v_{20} (1 - y)]\},\end{aligned}$$

$$C = g_2 \{1 - (1 - c_2) [v_{10} y + v_{20} (1 - y)]\} - (1 + g_2 + e_2) [c_2 v_{10} y - \alpha_1 v_{20} (1 - y)].$$

Відповідно до критерію Гурвіца точка P_2 стійка, якщо: $A > 0$, $AB > C$, $C > 0$. Ці умови виконуються, якщо $y > \alpha_1 v_{20} / (v_{10} + \alpha_1 v_{20})$. Врахуємо, що фізичний сенс мають лише додатні значення змінних. Умова $g_2 > 0$, $e_2 > 0$ виконується, якщо $v_{10} y - \alpha_1 v_{20} (1 - y) > 0$ та $v_{10} y - [v_{10} y - \alpha_1 v_{20} (1 - y)][v_{10} y + v_{20} (1 - y)] > 0$. Неважко переконатися у тому, що друга умова додатності g_2 та e_2 , коли $v_{10} y - [v_{10} y - \alpha_1 v_{20} (1 - y)][v_{10} y + v_{20} (1 - y)] < 0$ та $v_{10} y - \alpha_1 v_{20} (1 - y) < 0$, є не-здійсненною.

З цих умов отримуємо додаткові обмеження на діапазон змінювання частки y , необхідні для стійкості точки P_2 :

$$\frac{\alpha_1 v_{20}}{v_{10} + \alpha_1 v_{20}} < y < \frac{1 + (\alpha_1 - 1) v_{20} + \sqrt{[1 + (\alpha_1 - 1) v_{20}]^2 + 4 \alpha_1 v_{20}^2}}{2 v_{10} + 1 + (\alpha_1 - 1) v_{20} + \sqrt{[1 + (\alpha_1 - 1) v_{20}]^2 + 4 \alpha_1 v_{20}^2}}.$$

Ця умова виконується за додаткового обмеження $v_{20} > 1 / (1 + \alpha_1)$. Результати модельних досліджень (3) для $\varepsilon_{10} = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 1$ наведено на рис. 1, 2.

На рис. 1 представлено результати дослідження динаміки змінних моделі (3) для різних значень y . Збільшення y спочатку призводить до зростання рівня e та g , однак по досягненню значення $y = 0.62$ подальше збільшення y зумовлює зниження їхніх рівнів. Розраховано площі під кривими $e(t)$ та $g(t)$, що дало змогу визначити обсяги $e + g$, вироблені на інтервалі $[0, T]$.

На рис. 2 наведено результати дослідження залежності стаціонарного рівня $e + g$ від величини y для різних значень v_1 , v_2 .

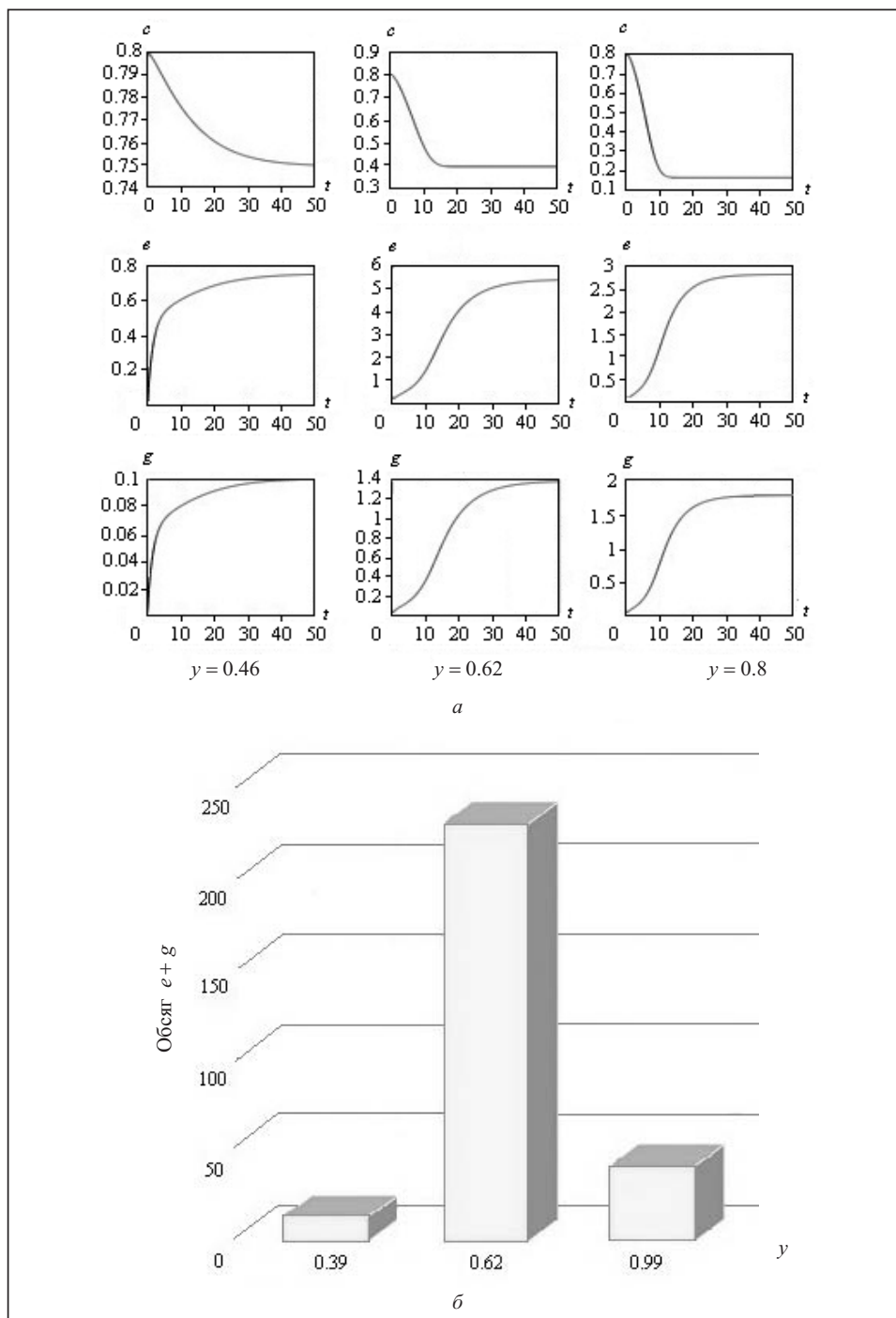


Рис. 1. Результати дослідження моделі (3) для різних значень y : динаміка змінних (а), обсяг $e + g$, вироблений на інтервалі $[0, T]$ (б)

Результати моделювання свідчать про те, що є значення y , за якого стаціонарний рівень $e + g$ досягає максимуму. Отже, існує оптимальний рівень, починаючи з якого подальше зниження рівня парникових газів за рахунок упровадження «зеленої» енергетики зумовить скорочення сумарних обсягів продукції, яка створюється традиційною та «зеленою» енергетиками. Це матиме негативні наслідки для економіки.

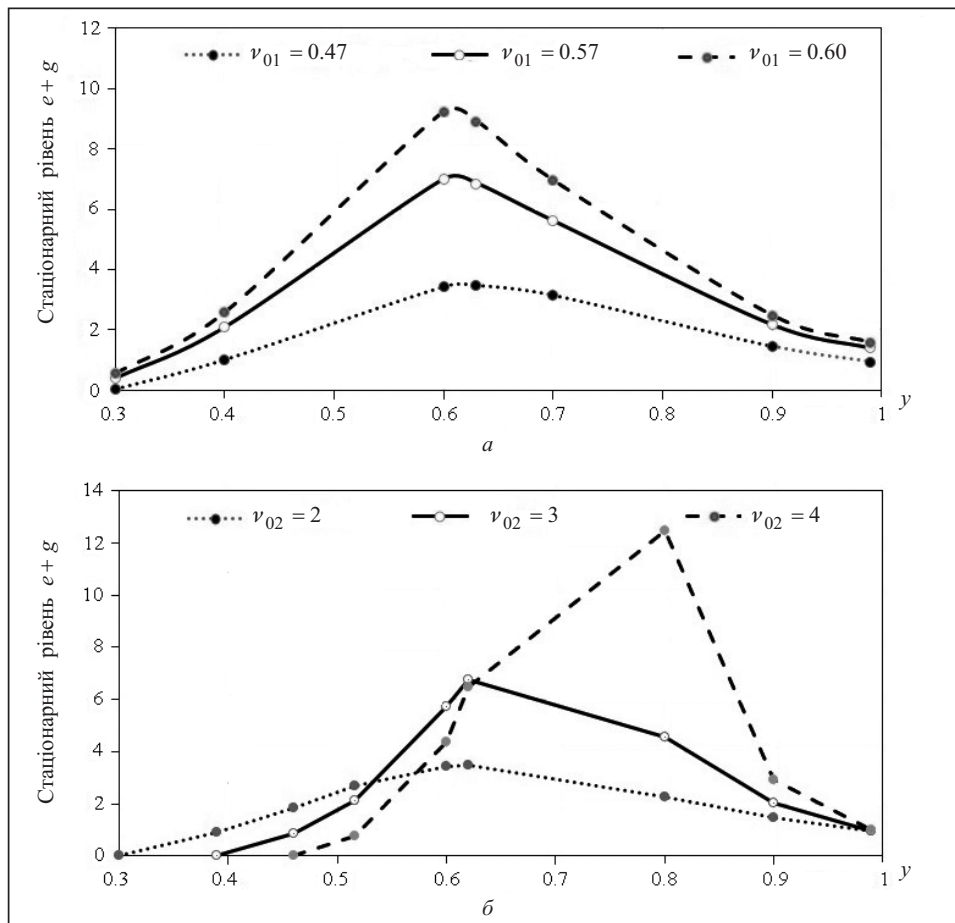


Рис. 2. Залежність стаціонарного рівня $e + g$ від величини y

ВРАХУВАННЯ ВПЛИВУ ПГ НА АДАПТАЦІЙНІ МОЖЛИВОСТІ СИСТЕМИ ВЗАЄМОПОВ'ЯЗАНИХ СЕКТОРІВ ЕКОНОМІКИ

Для дослідження складних взаємозв'язків між різними секторами економіки у [3–6] використано три- та шестисекторну моделі Лоренца. Вони об'єднали в єдину структуру сектори економіки, описані в однаковий спосіб. Кожен сектор розглянуто в термінах рівня продуктивності, кількості робочих місць і рівня структурних порушень. Застосуємо цей підхід до дослідження впливу ПГ на адаптаційні можливості системи взаємопов'язаних секторів економіки. Вважатимемо, що рівень ПГ впливає на параметри шестисекторної моделі Лоренца, що описує взаємозв'язок галузей, які: а) виробляють найбільший обсяг викидів CO_2 в атмосферу, як-от: добувна та переробна промисловості, аграрно-промисловий комплекс, інфраструктурні системи постачання електроенергії, газу, пари та кондиціонованого повітря, транспорт та ЖКХ [7]; б) відповідають за зв'язування ПГ та підвищення енергоефективності, як-от: лісове господарство та сектор екологічних технологій. Візьмемо до уваги, що: 1) є викиди ПГ, не зумовлені антропогенною діяльністю, а розпад CO_2 пов'язаний не лише з сектором “зелених” технологій; 2) використання енергії є пропорційним рівням продуктивності відповідних секторів економіки; 3) є втрата енергії, не пов'язана з виробничою діяльністю. Також будемо вважати, що лінійна функція $f(G, E)$, яка в моделі (3) відображала за-

лежність швидкості відтворення енергії від рівнів E і G , є нелінійною. Для спрощення обмежимося квадратним тричленом. У межах зроблених припущень модель (3) набуває такого вигляду:

$$\begin{aligned}\frac{dC}{dt} &= a_0 + \left(a_1 + \sum_{i=1}^5 k_i X_i \right) E - a_2 C (b_0 + G), \quad \frac{dG}{dt} = F_1(X_6) - a_3 G \left(c_0 + \sum_{i=1}^6 c_i X_i \right), \\ \frac{dE}{dt} &= F_2(X_1) - a_4 E \left(d_0 + \sum_{i=1}^6 d_i X_i \right), \quad \varepsilon_{ix} \frac{dX_i}{dt} = \sigma_i(C)(Y_i - X_i), \\ \varepsilon_{iy} \frac{dY_i}{dt} &= \left[r_i \left(1 - \sum_{\substack{i=1, \\ i \neq j}}^6 a_{ij} X_i \right) - Z_i \right] X_i - Y_i, \quad \varepsilon_{iz} \frac{dZ_i}{dt} = X_i Y_i - b_i(C) Z_i,\end{aligned}\quad (4)$$

де C — рівень ПГ, джерелом яких є антропогенна діяльність; E та G — рівні функціонування звичайної та «зеленої» енергетик відповідно; X_i — нормований рівень продуктивності; Y_i — нормована кількість робочих місць, Z_i — нормований рівень структурних порушень для добувної ($i=1$) та переробної ($i=2$) промисловостей, агропромислового комплексу ($i=3$), систем постачання електроенергії, газу, пари та кондиційованого повітря ($i=4$), транспорту та системи ЖКХ ($i=5$), сектору відтворення «зеленої» енергетики ($i=6$); a_{ij} — параметри, що характеризують конкуренцію між різними галузями економіки на ринках праці ($i \neq j$); σ_i , r_i , b_i ($i=1, 6$) — параметри моделі Лоренца, які є функціями питомих попитів та пропозицій на продукцію відповідних виробничих систем та на кількість робочих місць, у них зайнятих; ε_{ij} — параметри, які дають змогу врахувати часову ієрархію; a_0 — параметр, що характеризує викиди ПГ, не пов'язані з антропогенною діяльністю; a_i ($i=1, 4$) — константи, що характеризують швидкості генерації ПГ підприємствами енергетики, не пов'язаними з вказаними галузями, розпаду ПГ, а також використання енергії звичайною та «зеленою» енергетиками відповідно; $F_1(X_6)$ та $F_2(X_1)$ — функції, які характеризують швидкості відтворення зеленої та звичайної енергетик відповідно; c_i , d_i ($i=0, 6$) — параметри, що характеризують інтенсивність використання енергії у відповідних секторах економіки; m_{i1} та m_{i2} — параметри, що характеризують вплив ПГ на адаптаційні можливості системи взаємопов'язаних секторів економіки; b_0 — параметр, що характеризує розпад CO_2 , не пов'язаний з сектором зелених технологій; k_i ($i=1, 5$) — параметри, що характеризують інтенсивність викидів ПГ у відповідних секторах економіки. Їх оцінюють за допомогою даних [7] щодо інтенсивності кінцевого енергоспоживання за різними видами економічної діяльності в Україні протягом 2019–2021 рр. (табл. 1).

Параметри шестисекторної моделі Лоренца визначають за допомогою більш детальних моделей, які досліджують виникнення нестабільностей у складних системах, прийняття еколого-економічних рішень, керування продовольчою безпекою, ризики втрат урожаю під час планування структури посівних площ та оптимізації надійності у рослинництві [8–13].

Відповідно до результатів, отриманих у [4], параметри σ_i , r_i , b_i пов'язані з характеристиками, що визначають функціонування секторів економіки, у такий спосіб:

$$\sigma_i = (\alpha_{1i} \beta_{2i}) / (\alpha_{2i} \gamma_{2i}), \quad r_i = (\beta_{1i} \gamma_{1i}) / (\beta_{2i} \gamma_{2i}), \quad b_i = (\xi_i) / (\alpha_{2i} \gamma_{2i}), \quad (5)$$

Таблиця 1

Види економічної діяльності	Кінцеве енергоспоживання					
	2018 р.		2019 р.		2020 р.	
	тис. т н.е.	%	тис. т н.е.	%	тис. т н.е.	%
Загальне кінцеве енергоспоживання	51408	100	49665	100	47821	100
Із нього						
Промисловість	16487	32.1	16122	32.5	15961	33.4
Сільське, лісове та рибне господарства	1880	3.3	1882	3.9	1671	4.1
Домашні господарства	16201	31.5	14007	28.2	13601	28.4
Сектор послуг	4742	9.2	4831	9.7	4864	10.2
Транспорт	9453	18.4	10026	20.2	8045	16.8

де α_{1i} та α_{2i} — параметри, що характеризують адаптаційні можливості; β_{1i} — попит на діяльність i -ї виробничої системи, нормований на одиницю вимірювання системи матеріального виробництва, тобто на робоче місце у відповідній галузі виробництва Y_i ; β_{2i} — рівень пропозиції, нормований на одиницю функції i -ї виробничої системи X_i ; γ_{1i} — попит на збільшення кількості робочих місць, нормований на одиницю X_i ; γ_{2i} — рівень пропозиції збільшення кількості робочих місць, нормований на одиницю Y_i ; ξ_i — питома швидкість усунення порушень. Перехід параметрів r_i до області значень, які відповідають режиму метастабільного хаосу, здійснюється за рахунок зростання питомих попитів на продукцію виробничої системи та кількості зайнятих у ній робочих місць (параметри β_{1i} та γ_{1i} , або за рахунок зниження їхніх питомих пропозицій (параметри β_{2i} та γ_{2i}).

Параметри α_{2i} характеризують адаптаційні можливості системи, які зменшуються зі зростанням ПГ. Як впливає з (5), зменшення α_{2i} призводить до зростання σ_i та b_i . Тому їхню залежність від C можна описати так: $\sigma_i(C) = \sigma_i(1 + m_{1i}C)$ та $b_i(C) = b_i(1 + m_{2i}C)$. Вважатимемо, що $F_1(X_6)$ та $F_2(X_1)$ можна апроксимувати квадратичними функціями:

$$F_1 = f_1(1 + f_2X_6 + f_3X_6^2), \quad F_2 = f_4(1 + f_5X_1 + f_6X_1^2),$$

де f_i ($i=1,6$) — параметри моделювання.

На рис. 3 наведено результати дослідження виникнення хаотичного режиму в моделі (4) у разі варіації параметра r . Як впливає з результатів дослідження, з переходом від детермінованого режиму ($r=15$) до хаотичного ($r=28$) зростає сумарний рівень структурних порушень $\sum Z_i$.

На рис. 4 наведено результати дослідження системи (4) у разі варіації параметрів m_{i1} та m_{i2} . Для простоти вважатимемо, що вони однакові. Зменшення цих параметрів призводить до виникнення режиму детермінованих стохастичних коливань та зростання рівня сумарних порушень $\int \sum Z_i(t)dt$, який є максимальним для $m_{i1} = m_{i2} = 0$.

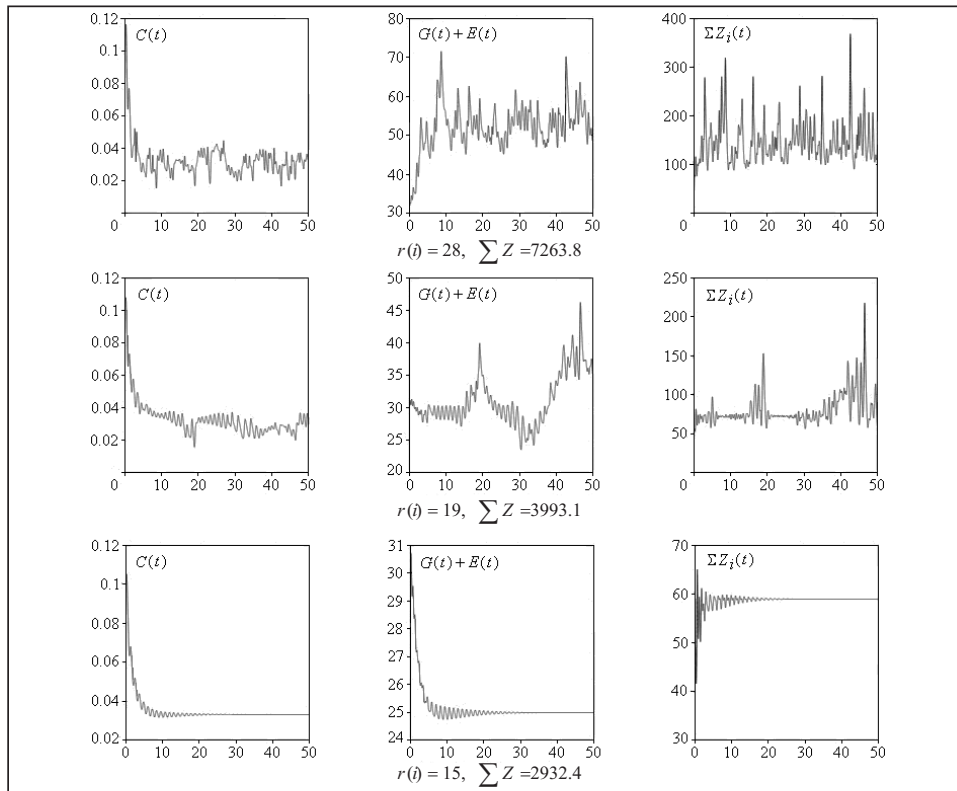


Рис. 3. Виникнення хаотичного режиму в моделі (4) у разі варіації параметра r

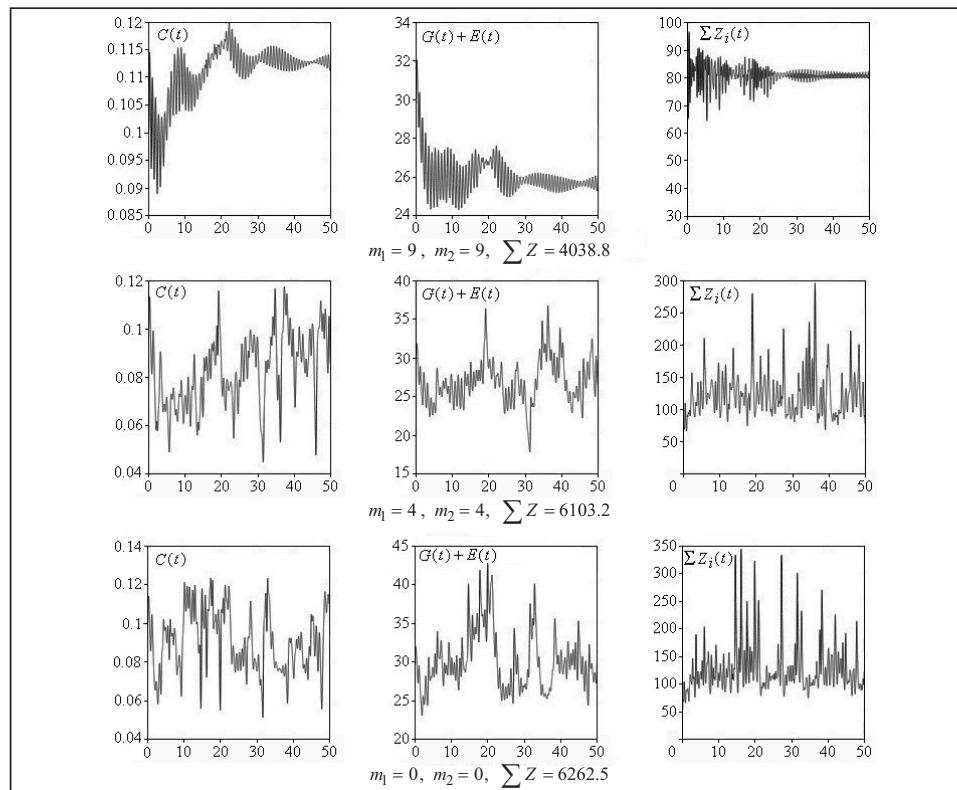


Рис. 4. Виникнення детермінованих стохастичних коливань ($r_i = 25$, $\sigma_i = 7$, $b_i = 5/3$)

Розглянемо задачу визначення ефективних керувань для мінімізації сумарних структурних порушень Z_i та рівня ПГ C , а також максимізації рівня якості життя населення за вибраний інтервал часу. Будемо вважати, що ризики залежать від рівня структурних порушень, а рівень якості життя — від рівня енергетичного постачання та рівнів виробничих функцій різних галузей економіки. Задача керування має таке формулювання: є математична модель (4) та система обмежень, яка визначає допустимий діапазон значень змінних моделі та параметрів керування; потрібно знайти параметри керування $\sigma_i(t)$, $r_i(t)$, $b_i(t)$, які мінімізують функціонал

$$F(\sigma_i, r_i, b_i) = \sum_{i=1}^6 \frac{k_{xi} l_{xi}}{I_{xi}} + \sum_{i=1}^6 k_{zi} l_{zi} I_{zi} + \frac{k_{eg} l_{eg}}{I_{eg}} + k_c l_c I_c,$$

де $I_{xi} = \int_0^T x_i dt$, $I_{zi} = \int_0^T z_i dt$, $I_c = \int_0^T C dt$, $I_{eg} = \int_0^T e dt + \int_0^T g dt$, k_{xi} , k_{zi} , k_{eg} , k_c — вагові коефіцієнти; l_{xi} , l_{zi} , l_e , l_c — множники, що дають змогу зрівняти внески усіх доданків до цільової функції [14].

ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКІВ НЕЗВОРОТНИХ ЗМІН ПРОСТОРУ БЕЗПЕКИ

Через наявність синергетичного впливу різних джерел безпеки потрібно розробити нові методи оцінювання ризику та вдосконалити методи моделювання режимів функціонування складних систем з різкими раптовими змінами. Ці зміни порушують безперервність сталого розвитку і спричиняють нестабільність. Як наслідок, ціна прийняття рішень щодо керування безпекою значно зростає. Тоді, коли системні закони, що керують поведінкою еколого-економічних систем, можуть різко змінитися, а поведінка системи стає сильно залежною від малих змін параметрів керування та початкових умов, зростає роль малих флуктуацій в околах точок біфуркації. Через підвищену чутливість до них зменшується горизонт прогнозування та знижується ефективність керування.

Ефективність оцінювання ризиків та прогнозування поведінки складних систем у цих умовах можна підвищити, скориставшись підходом, що ґрунтується на застосуванні теорії особливостей гладких відображень [14–17]. Його використовували для комплексного оцінювання екологічних, техногенних та соціальних ризиків під час дослідження ефективності ліквідації наслідків катастрофи на Чорнобильській АЕС [14], оцінювання комплексних ризиків природно-техногенних та соціально-економічних загроз для потенційно небезпечних об'єктів у житлово-комунальному комплексі України та побудови профілів інтегрального ризику та окремих його компонентів для різних регіонів України [15], оцінювання ефективності природокористування при збільшенні викидів у атмосферу ПГ [16]. Мірою ризику є ступінь наближеності параметрів системи до їхніх біфуркаційних значень, досягнення яких викликає стрибкоподібну зміну траєкторії розвитку. Коли стаціонарний стан, що характеризує норму, втрачає стійкість, система стрибкоподібно переходить в інший стаціонарний стан (кризовий). Головна перевага запропонованого підходу є такою: він дає змогу ввести поняття динамічного ризику як функції змінних, що описують процес. Проаналізуємо результати дослідження моделі (4), беручи до уваги зазначені міркування.

Результати моделювання свідчать про наявність детермінованого та стохастичного режимів функціонування системи (4). По досягненню параметрами r_i біфуркаційних значень відбувається стрибкоподібна зміна поведінки системи та зростає рівень структурних порушень. Модель (4) дає змогу визначити динаміку цих порушень і залежність їхньої сумарної кількості у різних галузях економіки $\int Z_i(t) dt$ від параметрів моделі.

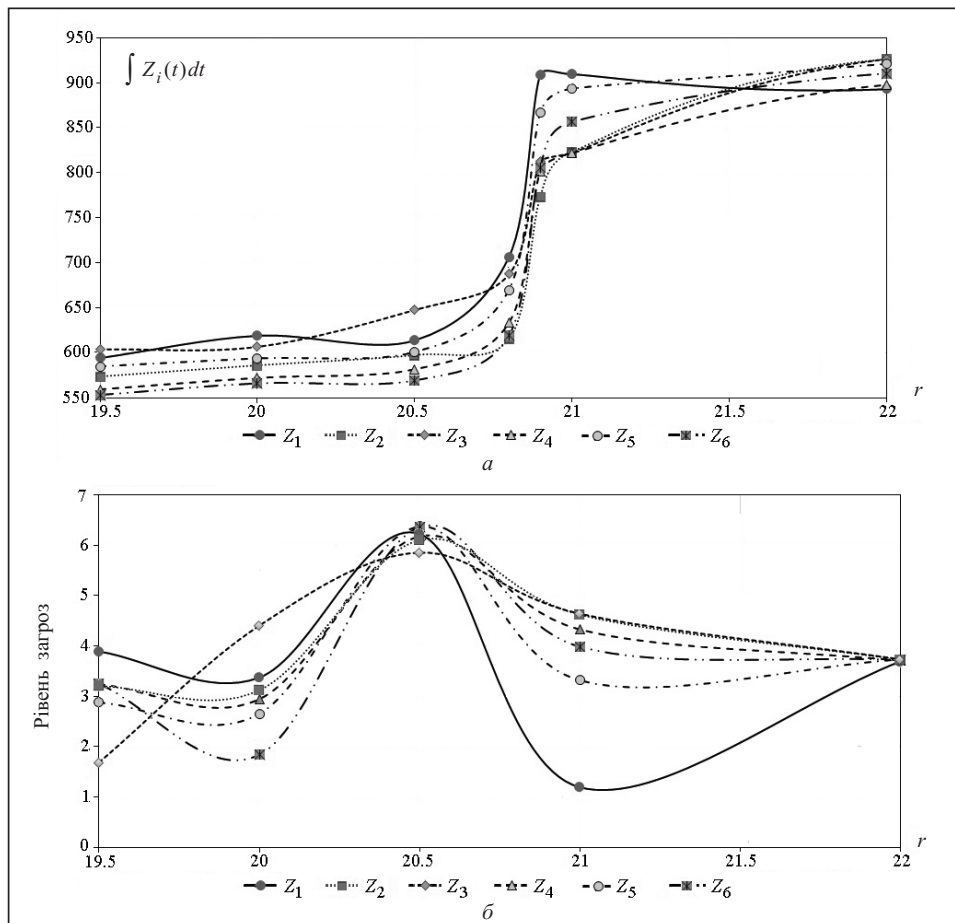


Рис 5. Рівні сумарних порушень та загроз у секторах економіки у разі варіацій параметрів r_i

Як випливає з рис. 5, а, для параметрів r_i ця залежність має стрибко-подібний характер, коли $r_i \in [20.5, 21.0]$. На цьому інтервалі швидкість виникнення порушень максимальна, що значно підвищує ризики незворотних змін простору безпеки еколого-економічної системи.

Безпека складних систем залежить від рівня структурних порушень, що виникають під час їхнього функціонування. Якщо припустити, що залежність між рівнем загроз та швидкістю появи порушень є лінійною, то можна побудувати функції залежності рівнів загроз від r_i , наведені на рис. 5, б. Тут рівні загроз розраховано як $\ln(\partial Z_i / \partial r_i)$. Оскільки r_i залежать від рівнів питомих попитів та пропозицій на продукцію виробничих систем та кількості зайнятих у них робочих місць, можна оцінити рівні ризиків незворотних змін еколого-економічної системи залежно від цих показників та рівня ПГ.

ВИСНОВКИ

Запропоновано модель для визначення динаміки змінювання частки ВДЕ у загальному енергетичному балансі, за якої мінімізується швидкість зростання концентрації парникових газів (ПГ) в атмосфері та підтримується заданий рівень якості життя населення. Модель дає змогу дослідити, як зміни рівня ПГ та взаємозв'язків між різними секторами економіки (добувної та переробної промисловості, системи постачання електроенергії, газу, пари та кондиціюва-

ного повітря, системи житлово-комунального господарства, транспорту, лісового господарства) впливають на ризики, що загрожують сталому розвитку, та загальний рівень якості життя населення. Слід зазначити, що для дослідження синергетичного ефекту різних загроз потрібно використовувати інтегровані моделі. Це створює певні складнощі, оскільки що більш деталізованою стає модель, то більше зростає її розмірність, ускладнюється задача ідентифікації параметрів моделі та звужується горизонт прогнозування. Тому в цій роботі використано шестисекторну модель Лоренца зі змінюваними коефіцієнтами, яка об'єднує в єдиній структурі описані в однаковий спосіб сектори економіки. Кожний сектор розглянуто в термінах рівнів продуктивності, кількості робочих місць і структурних порушень. Це дає змогу суттєво зменшити кількість параметрів моделі, дослідити взаємозалежність різних вимірів безпеки, ранжувати ризики у різних галузях економіки. Отримані результати свідчать про наявність критичного рівня, починаючи з якого подальше зростання частки “зеленої” енергетики у загальному енергетичному балансі призводить до скорочення сумарних обсягів продукції, створеної галузями енергетики. Своєю чергою, це негативно впливає на рівень якості життя населення. Визначено умови виникнення турбулентних режимів функціонування, які призводять до зростання сумарної кількості структурних порушень та зменшення сумарного рівня виробництва енергії. Запропоновано підхід до оцінювання рівня загроз взаємопов'язаним секторам економіки, який дає змогу визначити критичні для безпеки рівні питомих попитів та пропозицій на продукцію виробничих систем, а також кількості зайнятих у них робочих місць. Подальші дослідження у цьому напрямі дадуть змогу визначити ефективні стратегії трансформації енергетичного сектору для мінімізації викидів ПР і структурних порушень та максимізації рівнів виробничих функцій галузей економіки.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. The Global Risks Report 2021. 16th Ed. Cologny; Geneva: World Economic Forum, 2021. 97 p. URL: https://www3.weforum.org/docs/WEF_The_Global_Risks_Report_2021.pdf.
2. Атоєв К.Л. Комплексне моделювання впливу глобальних змін на взаємозв'язок між водними, продовольчими та енергетичними ресурсами. *Теорія оптимальних рішень*. 2017. № 2017. С. 3–8.
3. Archer D., Eby M., Brovkin V., Ridgwell A., Cao L., Mikolajewicz U., Caldeira K., Matsumoto K., Munhoven G., Montenegro A., Tokos K. Atmospheric lifetime of fossil fuel carbon dioxide. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 2009. Vol. 37. P. 117–134.
4. Атоєв К.Л., Вовк Л.Б., Шпиґа С.П. Исследование взаимосвязи продовольственных, энергетических и водных ресурсов с помощью трехсекторальной модели Лоренца. *Проблемы управления и информатики*. 2021. № 3. С. 141–152. <https://doi.org/10.34229/1028-0979-2021-3-12>.
5. Atoev K.L., Knopov P.S. Application of robust methods for estimation of distribution parameters with aprioriary constraints on parameters in economics and engineering. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2022. Vol. 58, N 5. P. 713–720. <https://doi.org/10.1007/s10559-022-00504-8>.
6. Atoev K., Knopov P. Modeling of complex systems instability under risks and uncertainty. *Proc. 2022 IEEE 3rd International Conference on System Analysis & Intelligent Computing (SAIC-2022)* (4–7 October 2022, Kyiv, Ukraine). Kyiv, 2022. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/SAIC57818.2022.9922972>.
7. Statistical Yearbook of Ukraine 2020. Kyiv: State Statistics Service of Ukraine, 2021. 453 p. URL: https://ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/2021/zb/11/Yearbook_2020_e.pdf.
8. Atoev K., Knopov P., Pepeliaev V., Kisała P., Romaniuk R., Kalimoldayev M. The mathematical problems of complex systems investigation under uncertainties. In: *Recent Advances in Information Technology*. Wójcik W., Sikora J. (Eds.) London: CRC Press Taylor Francis Group, 2018. P. 135–171. <https://doi.org/10.1201/9781351243179-6>.

9. Atoev K.L., Golodnikov A.N., Gorbachuk V.M., Ermolieva T.Yu., Ermoliev Yu.M., Kiriljuk V.S., Knopov P.S., Pepelyaeva T.V. Food, energy and water nexus: methodology of modeling and risk management. In: FEW Nexus for Sustainable Development: Integrated Modeling & Robust Management. Zagorodny A.G., Ermoliev Yu.M., Bogdanov V.L., Ermolieva T.Yu. et al. (Eds.). Kyiv: Akadempriodkya, 2020. P. 250–302.
10. Golodnikov A.N., Ermol'ev Yu.M., Ermol'eva T.Yu., Knopov P.S., Pepelyaev V.A. Integrated modeling of food security management in Ukraine. I. Model for management of the economic availability of food. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2013. Vol. 49, N 1. P. 26–35. <https://doi.org/10.1007/s10559-013-9481-8>.
11. Golodnikov A.N., Ermol'ev Yu.M., Ermol'eva T.Yu., Knopov P.S., Pepelyaev V.A. Integrated modeling of food security management in Ukraine. II. Models for structural optimization of agricultural production under risk. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2013. Vol. 49, N 2. P. 217–228. <https://doi.org/10.1007/s10559-013-9503-6>.
12. Pepelyaev V.A., Golodnikova N.A. Mathematical methods for crop losses risk evaluation and account for sown areas planning. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2014. Vol. 50, N 1. P. 60–67. <https://doi.org/10.1007/s10559-014-9592-x>.
13. Pepelyaev V.A., Golodnikov A.N., Golodnikova N.A. Reliability optimization in plant production. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2022. Vol. 58, N 1. P. 191–196. <https://doi.org/10.1007/s10559-022-00450-5>.
14. Sergienko I.V., Yanenko V.M., Atoev K.L. A conceptual framework for managing the risk of ecological, technogenic, and sociogenic disasters. *Cybernetics and Systems Analysis*. 1997. Vol. 33, N 2. P. 203–219. <https://doi.org/10.1007/BF02665894>.
15. Пепеляєв В.А., Кнопов П.С., Атоєв К.Л., Бігдан В.Б., Чорний Ю.М. Інформаційно-аналітична система для аналізу комплексних ризиків природно-техногенних та соціально-економічних загроз в галузі житлово-комунального господарства України. *Наука та інновації*. 2010. Т. 6, № 3. С. 39–46. <https://doi.org/10.15407/scin6.03.039>.
16. Атоєв К.Л., Кнопов П.С., Пепеляєва Т.В. Розробка нових моделей оцінювання ефективності природокористування за умов змін клімату та зростання невизначеності. *Теорія оптимальних рішень*. 2017. № 2017. С. 72–77.
17. Атоєв К.Л., Кнопов П.С. Оцінка екологічної, соціальної, управлінської та техногенної складових ризиків інвестування. *Кібернетика та комп'ютерні технології*. 2022. № 3. С. 37–45. <https://doi.org/10.34229/2707-451X.22.3.4>.

K.L. Atoev, P.S. Knopov

MATHEMATICAL MODELING OF THE INFLUENCE OF CLIMATE CHANGES ON RELATIONSHIPS OF SECTORS OF THE ECONOMY

Abstract. A mathematical model has been developed to determine the conditions whereby the growth rate of the concentration of greenhouse gases (GHG) in the atmosphere is minimized and the given standard of living of the population is maintained. The model combines in a single structure identically described sectors of the economy, each being considered in terms of productivity levels, number of jobs and structural violations (six-sector Lorenz model with variable coefficients that depend on the GHG level). The model makes it possible to investigate how changes in the level of GHG and the interrelationships between different sectors of the economy affect the risks of sustainable development and the general level of the quality of life of the population. The conditions for the emergence of turbulent modes of operation, which lead to an increase in the total number of structural violations and a decrease in the total level of productivity, have been determined. An approach to assessing the level of threats to sustainable development under climate change is proposed.

Keywords: Lorentz model, mathematical modeling, model of economic development, optimal control, deterministic chaos, climate changes.

Надійшла до редакції 02.03.2023