

# КІБЕРНЕТИКА та КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 519.711.3

DOI:10.34229/2707-451X.22.3.8

К.Л. АТОЄВ

## ОПТИМІЗАЦІЙНІ ПРОБЛЕМИ ЗЕЛЕНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

**Вступ.** Широке впровадження «зеленої енергетики», в основі якої лежать відновлювані джерела енергії (ВДЕ), визнається головним напрямом, на якому повинні бути сконцентровані зусилля світової спільноти в боротьбі з глобальним потеплінням. Так як викопні енергетичні ресурси є основним джерелом викиду парникових газів (ПГ) в атмосферу, обсяг цього виду палива послідовно обмежувався різними міжнародними угодами (Париж, 2015, Глазго, 2021) [1]. Планується, що завдяки поширенню зеленої енергетики кількість викидів ПГ у країнах ЄС до 2030 р. має зменшитися як мінімум на 55%. На стимуляцію четвертого енергетичного переходу, як називають перехід до ВДЕ, виділяються величезні кошти, пропонуються різні механізми підвищення інвестиційної привабливості проектів на основі ВДЕ: зелені сертифікати; відшкодування вартості технологічного приєднання, фіксовані тарифи на підключення (гарантія підключення до мережі, довгостроковий контракт на купівлю виробленої електроенергії, гарантія її купівлі за фіксованою ціною); система чистого вимірювання поданої у мережу електрики та подальше використання цієї величини у взаєморозрахунках з організаціями, що забезпечують електричною енергією. Розглядається можливість введення санкційних механізмів у відношенні приватного бізнесу, щоб забезпечити скорочення викиду ПГ. Однак складна мережева структура сучасної глобальної економіки вимагає глибокого наукового обґрунтування заходів щодо такої трансформації енергетики і прогнозування їх довгострокових наслідків, що за умов зростаючої невизначеності, пов'язаної з появою великої кількості нових системних ризиків є непростим завданням. Наприклад, переорієнтування транспорту на електромобілі, з одного боку скорочує викид ПГ, пов'язаний з використанням двигунів внутрішнього згоряння, але, з іншого боку, призводить до різкого зростання видобутку копалин, необхідних для акумуляторних блоків електромобілів. Це у свою чергу погіршує екологічну обстановку. Так само і з сучасною електронікою – мікросхеми вимагають все більшого видобутку рідкоземельних металів.

*Розроблено математичну модель для визначення динаміки зміни частки зеленої енергетики у загальному енергетичному балансі, за якої мінімізується швидкість зростання концентрації парникових газів у атмосфері та підтримується заданий рівень життя населення.*

**Ключові слова:** математичне моделювання, зелена енергетика, управління ризиками.

© К.Л. Атоєв, 2022

Ще одним фактором, який доводиться враховувати при виробленні ефективної стратегії переходу енергетики на ВДЕ є зростання інфляції та уповільнення економічного зростання, у тому числі через COVID-19 та політичну дестабілізацію у світі. На цьому фоні зростання ціни на паливо, а «зелена енергетика» – дорога енергетика, підживлює у суспільстві популістські сили, що гальмують енергетичний перехід. Таким чином, декарбонізація енергетичного сектора за рахунок більшого використання ВДЕ з точки зору математики – складна мінімаксна задача оптимального управління, яка може бути сформульована наступним чином. Необхідно визначити динаміку зміни частки ВДЕ у загальному балансі енергетики, при якій на заданому інтервалі часу, максимізується рівень життя і мінімізується рівень зростання ПГ при заданих обмеженнях на допустимі межі їх зміни. Мета даної роботи – розробка математичної моделі для вирішення цієї задачі управління.

**Математична модель.** При побудові моделі виходитимемо з наступних припущень.

1. Ресурси, що є в економіці, дозволяють функціонувати двом типам енергетик – звичайній та зеленій. В основі першої лежить видобуток корисних копалин, в основі другої – ВДЕ. Суспільство може змінити співвідношення вкладу двох цих видів енергетик у стале зростання економіки.

2. Найбільше джерело викидів ПГ у результаті антропогенної діяльності – спалювання викопного палива для вироблення електроенергії, тепла та транспорту.

3. Зростання рівня ПГ у атмосфері гальмує відтворення звичайної енергії, оскільки уряди вводять штрафні санкції на підприємства, діяльність яких пов'язана із збільшенням викидів, а значні ресурси економіки відволікаються на боротьбу з наслідками кліматичних змін.

4. Швидкість накопичення ПГ пропорційна інтенсивності роботи сировинної енергетики, тоді як зелена енергетика знижує їх рівень завдяки впровадженню різних екотехнологій, що зв'язують ПГ та підвищують енергоефективність.

5. Діоксид вуглецю дає основний внесок у парниковий ефект, пов'язаний з антропогенною діяльністю. Відмінна особливість цього газу – довготривалий вплив на клімат, який після припинення емісії, що викликала його, залишається значною мірою постійним протягом сотень років [2].

У рамках зроблених допущень може бути побудована така математична модель:

$$\begin{aligned} \frac{dC}{dt} &= a_1 E - a_2 C G - V_0 C, & \frac{dG}{dt} &= V_1 y (C_{\max} - C)(A_0 + A_e E + A_g G) - a_3 G, \\ \frac{dE}{dt} &= V_2 (1 - y)(C_{\max} - C)(A_0 + A_e E + A_g G) - a_4 E, \end{aligned} \quad (1)$$

де  $C$  – рівень ПГ, джерелом яких є антропогенна діяльність;  $E$  та  $G$  – рівні функціонування відповідно до звичайної та зеленої енергетик;  $y$  – частка зеленої енергетики у загальному енергетичному балансі;  $a_i (i=1,4)$ ,  $V_0$ ,  $V_1$  та  $V_2$  – константи, що характеризують швидкості генерації ПР енергетикою  $E$ ; видалення ПР енергетикою  $G$ ; заміни технологій в енергетиках  $E$  та  $G$ ; пов'язані із зношеністю енергомереж; мимовільного розпаду ПГ; відтворення зеленої та звичайної енергетик;  $C_{\max}$  – максимальний рівень ПР, після досягнення якого робота енергосистеми стає неможливою. Функція  $f(G, E) = A_0 + A_e E + A_g G$  відображає лінійний характер залежності швидкостей відтворення енергії від змінних  $E$  і  $G$ . Параметри  $A_e$  та  $A_g$  характеризують ефективність роботи у відповідних типах енергетик.

Врахуємо, що час розпаду ПГ значно перевищує швидкість інших процесів, що описуються моделлю (1), тому членом  $V_0C$  можна знехтувати. Тоді, заміною змінних система (1) може бути перетворена до наступного вигляду:

$$\gamma_1 \frac{dc}{dt} = \alpha e - cg, \quad \gamma_2 \frac{dg}{dt} = v_1 y(1-c)(1+e+g) - g, \quad \gamma_3 \frac{de}{dt} = v_2(1-y)(1-c)(1+e+g) - e, \quad (2)$$

де  $g = A_g G / A_0$ ,  $e = A_e E / A_0$ ,  $\alpha = a_1 A_g / (a_2 C_{\max} A_e)$ ,  $\gamma_1 = A_g / (A_0 a_2)$ ,  $\gamma_2 = 1 / a_3$ ,  $\gamma_3 = 1 / a_4$ ,  $c = C / C_{\max}$ ,  $v_1 = A_g V_1 C_{\max} / a_3$ ,  $v_2 = A_e V_2 C_{\max} / a_4$ .

Результати модельних досліджень (2), коли  $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = 1$  показано на рис. 1–3.

Як впливає з рис. 1 зростання  $y$  призводить до зменшення стаціонарного рівня  $c$ , причому збільшення параметра  $v_2$  зміщує криву направо, оскільки в цьому випадку при більш менших  $y$  порушуються умови стійкості стаціонарної точки, або вона втрачає фізичний сенс.

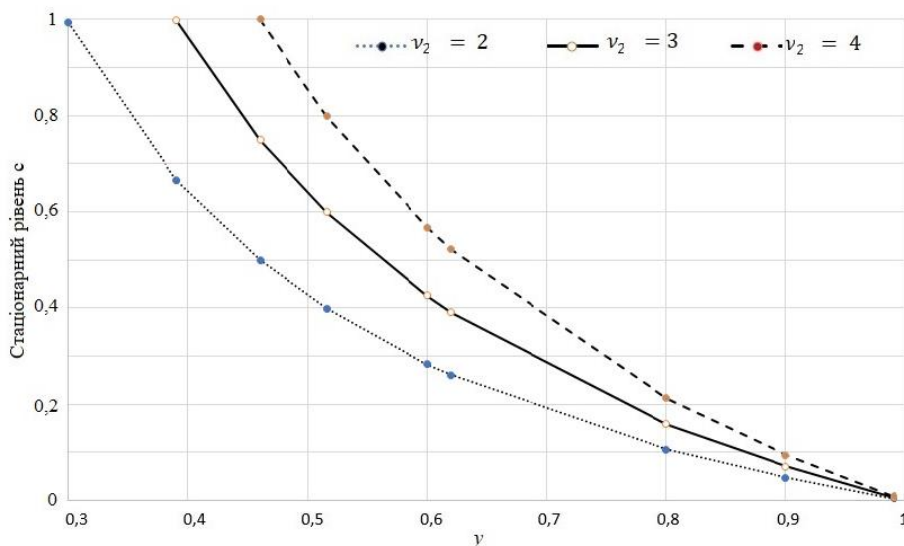


РИС. 1. Залежність стаціонарного рівня  $c$  від величини  $y$  при різних  $v_2$

На рис. 2 показано результати дослідження залежності стаціонарного рівня  $e + g$  від величини  $y$  при різних значеннях  $v_1, v_2, \alpha$ . Результати моделювання показують, що існує значення  $y$ , при якому стаціонарний рівень  $e + g$  досягає максимуму.

На рис. 3 показано дослідження динаміки змінних моделі (2) при різних значеннях  $y$ . Збільшення  $y$  спочатку призводить до зростання рівня змінних  $e$  та  $g$ , однак при досягненні значення  $y = 0,62$ , у подальшому збільшенні  $y$  знижує їх рівні. Розраховані площі під кривими  $e(t)$  та  $g(t)$ , що дозволило визначити обсяги  $e + g$ , вироблені на інтервалі  $[0, T]$ .

Таким чином, існує оптимальний рівень, починаючи з якого подальше зниження рівня ПГ за рахунок впровадження зеленої енергетики буде призводити до скорочення сумарних обсягів продукції, яка створюється традиційною та зеленою енергетиками.

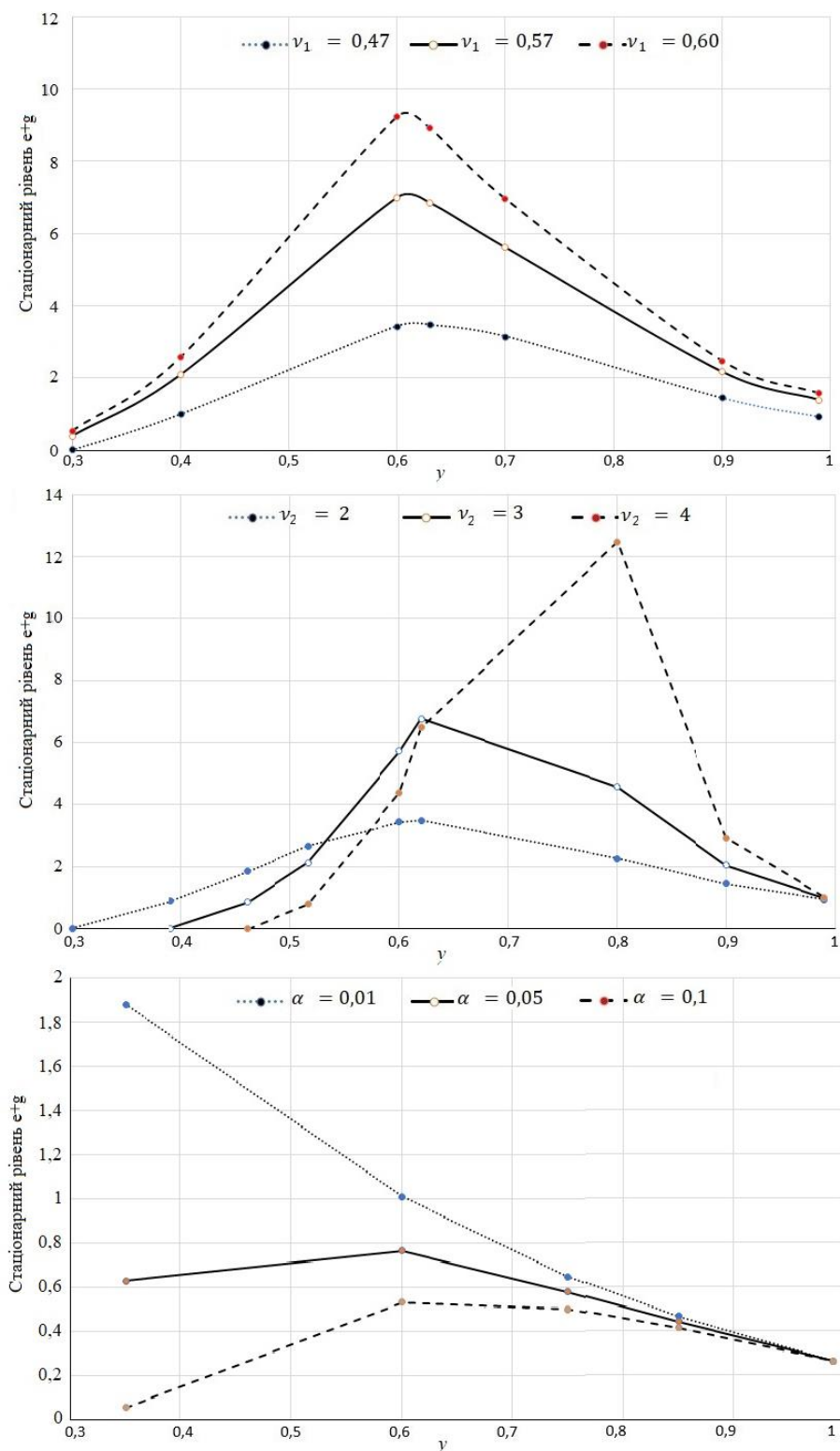


РИС. 2. Залежність стаціонарного рівня  $e + g$  від величини  $y$

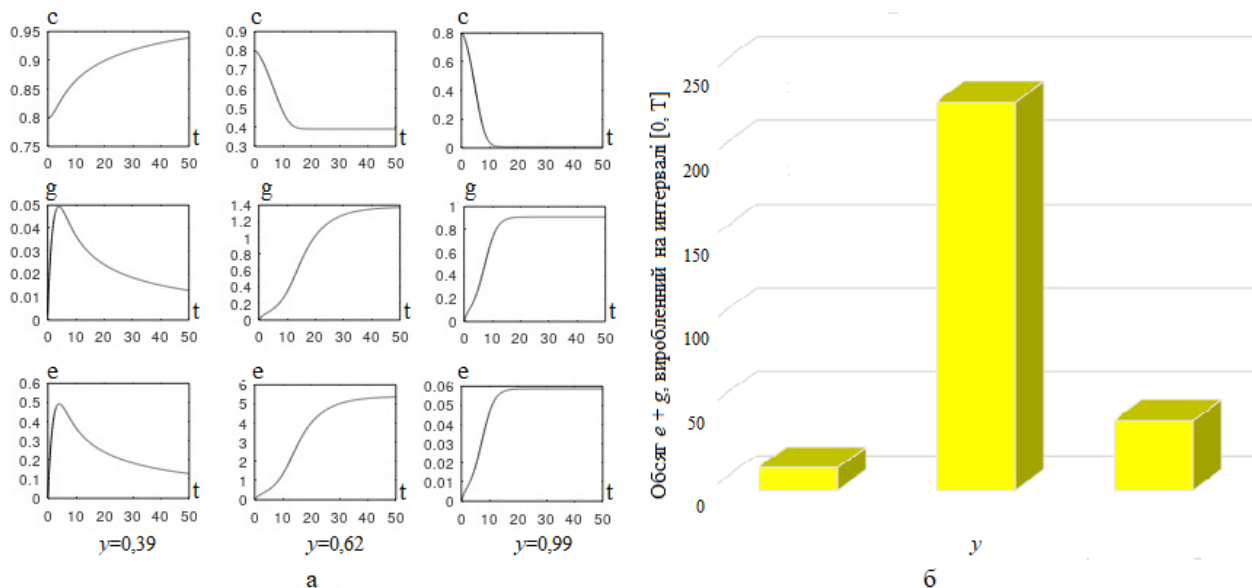


РИС. 3. Дослідження динаміки змінних моделі (2) при різних значеннях  $\gamma$

**Модель зі змінними параметрами.** Розглянемо більш складний випадок, коли частка параметрів моделі (1) залежать від часу. Будемо вважати, що  $V_1$  та  $V_2$  змінюються у залежності від коливань попиту на енергетичні ресурси;  $a_2$  залежить від стану лісних екосистем – головних поглиначів  $CO_2$ ;  $a_3$  та  $a_4$  залежать від інтенсивності використання енергії для потреб економіки. Тоді модель (1) трансформується таким чином:

$$\begin{aligned} \frac{dC}{dt} &= a_1 E - a_2(t)CG, & \frac{dG}{dt} &= V_1(t)y(C_{\max} - C)(A_0 + A_e E + A_g G) - a_3(t)G, \\ \frac{dE}{dt} &= V_2(t)(1 - y)(C_{\max} - C)(A_0 + A_e E + A_g G) - a_4(t)E. \end{aligned} \quad (3)$$

Для дослідження складних взаємозв'язків між різними секторами економіки у [3–6] використовувались три- та шести секторальні моделі Лоренца. Вони об'єднували в єдиній структурі однотипним чином описані сектори економіки, кожен з яких розглядався у термінах рівня продуктивності, кількості робочих місць і рівня структурних порушень. Відповідно до даних Державної служби статистики України [7] більше всього виробляють викидів  $CO_2$  в атмосферу: 1) підприємства пов'язані з постачанням електроенергії, газу, пари та кондиційованого повітря – 46 %; 2) переробна промисловість – 31,7 %; 3) добувна промисловість і розроблення кар'єрів – 15,1 %. Додаймо до цих галузей ще системи ЖКГ, транспорту та лісного господарства. Модель взаємопов'язаних секторів економіки, які найбільшою мірою впливають на рівень ПГ в атмосфері, має наступний вигляд:

$$\varepsilon_i \frac{dx_i}{dt} = \sigma_i (y_i - x_i), \quad \varepsilon_i \frac{dy_i}{dt} = [F_i(x_1, x_2, \dots, x_6) - z_i]x_i - y_i, \quad \varepsilon_i \frac{dz_i}{dt} = x_i y_i - b_i z_i, \quad (4)$$

де  $x_i$  – нормований рівень продуктивності,  $y_i$  – нормована кількість робочих місць,  $z_i$  – нормований рівень структурних порушень для добувної ( $i = 1$ ) та переробної ( $i = 2$ ) промисловостей; систем постачання електроенергії, газу, пари та кондиційованого повітря ( $i = 3$ ); ЖКГ ( $i = 4$ ); транспорту ( $i = 5$ ); лісного господарства ( $i = 6$ );  $F_i = r_i(1 - \sum a_{ij}x_j)$ ,  $a_{ij}$  – параметри, що характеризують конкуренцію між різними галузями економіки на ринках праці ( $i \neq j$ ),  $\sigma_i, r_i, b_i$  – параметри моделі Лоренца, які є функціями питомих попитів та пропозицій на продукцію відповідних виробничих систем та на кількість робочих місць у них зайнятих. Модель (4) враховує існування: 1) конкуренції за робочу силу між різними галузями економіки за робочу силу; 2) часової ієрархії (масштабування часу здійснюється за допомогою параметрів  $\varepsilon_i$ ).

Будемо вважати, що  $a_2(t) = a_2x_6$ ,  $a_3(t) = a_3(b_5x_3 + b_6x_4 + b_7x_5)$ ,  $a_4(t) = a_4(b_8x_3 + b_9x_4 + b_{10}x_5)$ ,  $V_1(t) = V_1(b_1x_1 + b_2x_2)$ ,  $V_2(t) = V_2(b_3x_1 + b_4x_2)$ . У свою чергу, зростання рівня ПГ впливає на динаміку взаємодії зазначених секторів економіки. Врахуємо це, заміною в (5)  $r_i$  на  $r_i(1 + b_{11}C)$ . Дослідження канонічної моделі Лоренца показує, що зростання параметра  $r$  – критичне для виникнення як періодичних, так і турбулентних траєкторій. Зміни  $C$ , таким чином, в областях біфуркаційних значень параметрів  $r_i$  будуть суттєво змінювати режим функціонування системи (4).

Перехід у турбулентний режим функціонування призводить до зростання сумарної кількості структурних порушень та зменшення сумарного рівня продуктивності, які розраховуються за величиною площини під відповідними кривими (див. таблицю). Зростання параметра  $b_{11}$  (рис. 4) спочатку призводить до зростання рівнів  $G$  та  $E$ , однак потім до їх зниження. Зміни  $C$  мають протилежний характер.

ТАБЛИЦЯ. Площа під кривими змінних на інтервалі [0,100] при варіації  $b_{11}$

Значення параметра $b_{11}$	Площина під кривими змінних			
	$C$	$E + G$	$\sum_{i=1}^6 x_i$	$\sum_{i=1}^6 z_i$
0,05	51,430	5146,6	801,95	9407,7
0,25	50,369	45751,0	477,16	10697,0
0,5	50,559	13905,0	128,64	12490,0

На рис. 5 показано зміни параметрів біфуркації  $r_i$  при різних значеннях  $b_{11}$ . В початковий момент часу ці параметри мають наступні значення:  $r_1 = r_2 = 14$ ;  $r_3 = r_4 = r_5 = 20$ ;  $r_6 = 28$ . З них лише значення останнього відповідає режиму детермінованим стохастичним коливанням, однак завдяки змінам  $x_i$  та  $C$  параметри  $r_i$  долають біфуркаційне значення  $r = 24.74$ . Якщо при  $b_{11} = 0,05$  з часом вони повертаються у зону добіфуркаційних значень, то при  $b_{11} = 0,25$  та  $b_{11} = 0,5$  амплітуда їх коливань зростає, що призводить до більш стійких чудових атракторів.

**Оптимальне управління ризиками.** Розглянемо завдання визначення ефективних управлінь із метою мінімізації сумарних структурних порушень  $z_i$  та рівня ПР  $C$ , а також максимізації рівня життя населення за обраний інтервал часу. Будемо вважати, що ризики залежать від рівня структурних порушень, а рівень життя залежить від рівня енергетичного постачання та рівнів виробничих функцій різних галузей економіки.

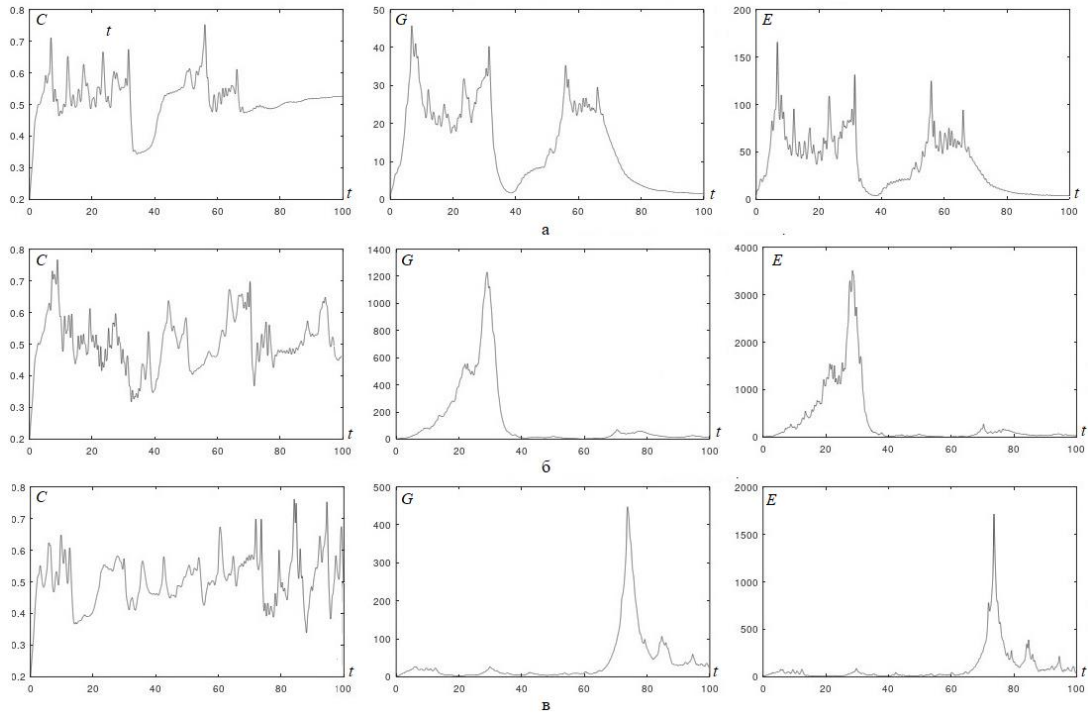


РИС. 4. Динаміка змінних моделі (5) при варіації параметра  $b_{11}$ : а) –  $b_{11} = 0,05$ ; б) –  $b_{11} = 0,25$ ; в) –  $b_{11} = 0,5$

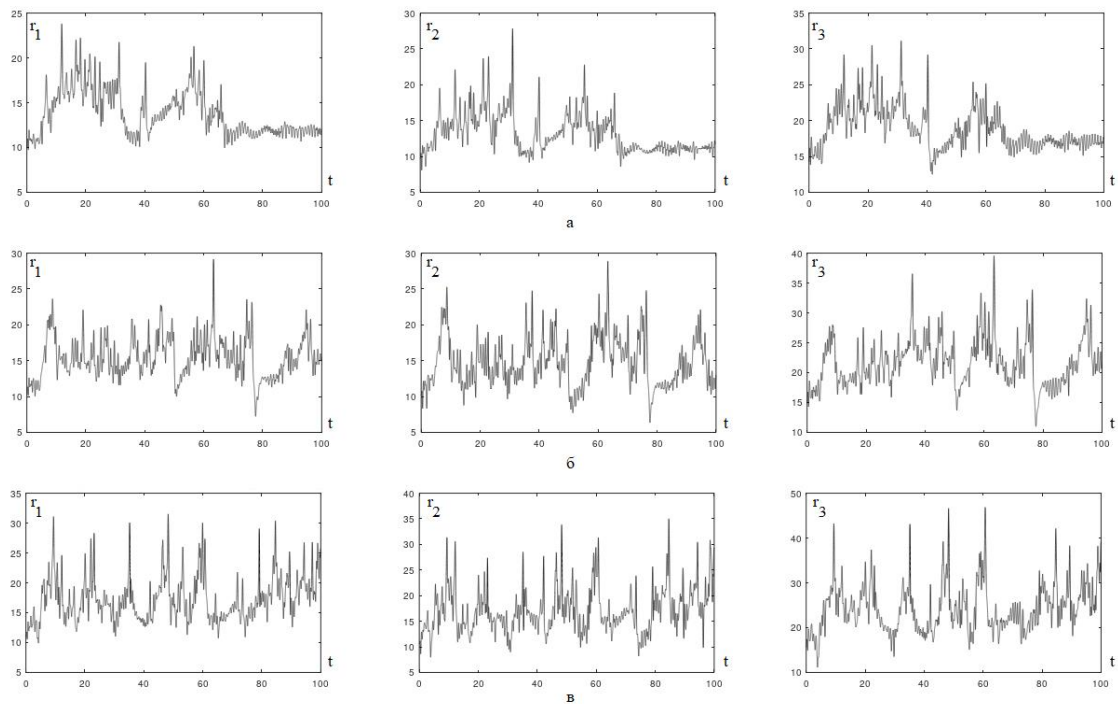


РИС. 5. Динаміка змін параметрів  $r_i (i=1,3)$  при варіації параметра  $b_{11}$ : а) –  $b_{11} = 0,05$ ; б) –  $b_{11} = 0,25$ ; в) –  $b_{11} = 0,5$

Завдання управління формулюється наступним чином: дано математичні моделі (3) та (4) та описана вище система зав'язків між ними. Дано систему обмежень, яка визначає допустимий діапазон значень змінних моделі та параметрів управління; потрібно знайти параметри управління  $\sigma_i(t), r(t), b_i(t), y(t)$ , які мінімізують функціонал:

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

де  $I_x = \int_0^T x_i dt$ ,  $I_z = \int_0^T z_i dt$ ,  $I_{eg} = \int_0^T edt + \int_0^T gdt$ ,  $I_c = \int_0^T Cdt$ ,  $k_{xi}, k_{zi}, k_{eg}, k_c$  – вагові коефіцієнти;  $l_{xi}, l_{zi}, l_e, l_c$  – множники, що дозволяють зрівняти внесок кожного з доданків до цільової функції [8].

**Висновки.** Отримані результати показують, що існує критичний рівень, починаючи з якого подальше зростання частки зеленої енергетики у загальному енергетичному балансі призводить до скорочення сумарних обсягів продукції, яка створюється енергетикою, що негативно впливає на якість життя населення. Розвиток цієї роботи буде направлено на визначення ефективних траєкторій трансформації енергетичного сектору з метою мінімізації викидів ПР і структурних порушень, та максимізації рівнів виробничих функцій галузей економіки. Буде досліджено багатокритеріальна задача оптимального управління яке дозволило би розв'язанню практичних задач трансформації енергетики за умов підвищеної невизначеності та ризиків.

#### Список літератури

1. The Global Risks Report 2021 (16th Edition). World Economic Forum. 2021. [https://www3.weforum.org/docs/WEF\\_The\\_Global\\_Risks\\_Report\\_2021.pdf](https://www3.weforum.org/docs/WEF_The_Global_Risks_Report_2021.pdf)
2. Archer D., Eby M., Brovkin V. et al. Atmospheric Lifetime of Fossil Fuel Carbon Dioxide. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 2009. Vol. 37. P. 117–34. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.earth.031208.100206>
3. Атоев К.Л. Комплексне моделювання впливу глобальних змін на взаємозв'язок між водними, продовольчими та енергетичними ресурсами. *Теорія оптимальних рішень*. 2017. 16. С. 3–8.
4. Atoyev K.L., Golodnikov A.N., Gorbachuk V.M., Ermolieva T.Yu., Ermoliev Yu.M., Kiriljuk V.S., Knopov P.S., Pepeljaeva 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.
5. Атоев К.Л., Вовк Л.Б., Шпига С.П. Исследование взаимосвязи продовольственных, энергетических и водных ресурсов с помощью трехсекторальной модели Лоренца. *Проблемы управления и информатики*. 2021. № 3. С. 141–152. <http://dx.doi.org/10.34229/1028-0979-2021-3-12>
6. Atoyev 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. **58** (5). P. 48–56.
7. Statistical Yearbook: Environment of Ukraine 2017. Kyiv: State Statistics Service of Ukraine, 2018. 225 p.
8. 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. **33** (2). P. 203–219. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02665894>

Одержано 24.09.2022

**Атоєв Костянтин Леонович,**

кандидат біологічних наук, старший науковий співробітник  
Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, Київ.  
<https://orcid.org/0000-0001-9892-054X>



UDC 519.711.3

**Konstantin Atoev**

## **Optimization Problems of Green Energetics**

*V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of the NAS of Ukraine, Kyiv*

*Correspondence: [konstantin\\_atoey@yahoo.com](mailto:konstantin_atoey@yahoo.com)*

**Introduction.** The widespread introduction of "green energy", which is based on renewable energy sources (RES), is recognized as the main direction on which the efforts of the world community should be concentrated in the fight against global warming. The complex network structure of the modern global economy requires a deep scientific substantiation of measures for such a transformation of the energy sector and forecasting their long-term consequences, which, in the face of growing uncertainty associated with the emergence of a large number of new systemic risks, is not an easy task. The decarbonization of the energy sector through greater use of renewable energy is thus a complex minimax optimal control problem and requires the creation of appropriate mathematical models for its solution. The article proposes a mathematical model for determining the dynamics of changes in the share of green energy (SGE) in the overall energy balance, which minimizes the growth rate of greenhouse gases (GG) in the atmosphere and maintains a given standard of living for the population.

**The purpose** of the article is to investigate, using mathematical modeling, how a change in the SGE affects the level of decarbonization and the quality of life of the population, to determine the optimal levels of the SGE, at which the level of GG is minimized and energy production and production functions of some sectors of the economy are maximized.

**Results.** A mathematical model has been developed to determine the conditions under which the growth rate of GG concentration in the atmosphere is minimized and a given standard of living of the population is maintained. The model combines in a single structure similarly described sectors of the economy, each of which is considered in terms of productivity levels, the number of jobs and structural disturbances (six-sector Lorentz model with varying coefficients depending on the level of GG). The model allows us to explore how changes in GG levels and the relationship between various sectors of the economy affect the risks of sustainable development and the quality of life of the population. The conditions for the occurrence of turbulent modes of operation are determined, which lead to an increase in the total number of structural disturbances and a decrease in the total level of productivity.

**Conclusions.** The obtained results show that there is a critical level, starting from which the further growth of SGE in the overall energy balance leads to a reduction in the total volume of products created by the energy sector, which negatively affects the quality of life of the population. The development of this work will be aimed at identifying effective trajectories for the transformation of the energy sector in order to minimize GG emissions and structural disturbances and maximize the levels of production functions of economic sectors. A multicriteria optimal control problem will be investigated, which would allow solving practical problems of energy transformation under conditions of increased uncertainty and risks.

**Keywords:** mathematical modeling, green energy, risk management.