

Теплюк Марія Анатоліївна
к.е.н., доцент,
доцент кафедри бізнес-економіки та підприємництва
КНЕУ імені Вадима Гетьмана, Україна
e-mail: maria_6_11@kneu.ua
ORCID: 0000-0001-6823-336X

РИЗИК- ДІАГНОСТИКА ЕНТРОПІЙНОГО РОЗВИТКУ ПІДПРИЄМСТВ ЯК ОСНОВА ФОРМУВАННЯ АНТИКРИХКИХ БІЗНЕС-СИСТЕМ

Tepluk Mariia
PhD, assistant professor,
assistant professor
KNEU named after Vadym Hetman, Ukraine
e-mail: maria_6_11@kneu.ua
ORCID: 0000-0001-6823-336X

RISK-DIAGNOSTICS OF ENTROPIC DEVELOPMENT OF ENTERPRISES AS A BASIS FOR THE FORMATION OF ANTI-FRAGILE BUSINESS SYSTEMS

Анотація. У статті обґрунтовано методичний інструментарій оцінювання ентропійного розвитку підприємств в умовах трансцендентного економічного середовища, що характеризується високим рівнем невизначеності, турбулентності та нелінійних змін. Розкрито сутність ентропійного розвитку як інтегральної характеристики дезорганізації, нестабільності та стохастичності бізнес-процесів, що впливають на ефективність і стійкість функціонування підприємства. Запропоновано комплексний підхід до оцінювання ентропії, який поєднує системний, процесний, кількісний та якісний методичні підходи, що дозволяє ідентифікувати джерела ентропійних збурень у фінансовій, інформаційній, організаційній, виробничій та маркетинговій сферах діяльності підприємства. Обґрунтовано доцільність інтеграції елементів теорії інформації, синергетики, фрактальної геометрії та нечіткого моделювання для глибокого аналізу складних динамічних процесів розвитку. Особливу увагу приділено побудові математичної моделі ентропійного розвитку підприємства на основі системи диференціальних рівнянь типу Вольтерри–Лотки, адаптованої до економічних умов. Запропонована модель дозволяє досліджувати взаємодію прибутковості та ентропійних чинників, аналізувати траєкторії розвитку, визначати точки динамічної рівноваги та оцінювати циклічні коливання як прояви ентропійної нестабільності. Виконано лінійний аналіз поведінки системи в околі точки рівноваги та обґрунтовано можливість кількісного оцінювання економічного ризику як міри ентропійної волатильності. Доведено, що застосування запропонованого методичного інструментарію створює підґрунтя для формування адаптивних та антикрихких управлінських стратегій, спрямованих на зниження деструктивного впливу ентропії та забезпечення сталого й інноваційного розвитку підприємств у довгостроковій перспективі.

Ключові слова: ризик, антикрихкість, ентропійний розвиток, підприємство, методичний інструментарій, економічна ентропія, математичне моделювання, ризик, антикрихкість, трансцендентна економіка.

Abstract. The article substantiates the methodological tools for assessing the entropic development of enterprises in a transcendental economic environment characterized by a high level of uncertainty, turbulence and nonlinear changes. The

essence of entropic development is revealed as an integral characteristic of disorganization, instability and stochasticity of business processes that affect the efficiency and stability of the enterprise. A comprehensive approach to assessing entropy is proposed, which combines systemic, process, quantitative and qualitative methodological approaches, which allows identifying sources of entropic disturbances in the financial, information, organizational, production and marketing spheres of the enterprise. The feasibility of integrating elements of information theory, synergetics, fractal geometry and fuzzy modeling for in-depth analysis of complex dynamic development processes is substantiated. Special attention is paid to building a mathematical model of entropic development of an enterprise based on a system of differential equations of the Volterra–Lotka type, adapted to economic conditions. The proposed model allows us to study the interaction of profitability and entropic factors, analyze development trajectories, determine dynamic equilibrium points and evaluate cyclical fluctuations as manifestations of entropic instability. A linear analysis of the system behavior around the equilibrium point is performed and the possibility of quantitative assessment of economic risk as a measure of entropic volatility is substantiated. It is proven that the application of the proposed methodological tools creates a basis for the formation of adaptive and antifragile management strategies aimed at reducing the destructive impact of entropy and ensuring sustainable and innovative development of enterprises in the long term.

Keywords: *risk, antifragility, entropic development, enterprise, methodological tools, economic entropy, mathematical modeling, risk, antifragility, transcendental economy*

JEL: D24, L25, O12

Проблематика дослідження. У сучасних умовах зростаючої турбулентності економічного середовища, посилення глобальних і локальних кризових явищ, цифрової трансформації та структурних зрушень в економіці, традиційні підходи до управління ентропійним розвитком підприємств виявляються недостатніми для забезпечення їх довгострокової стійкості. Домінування реактивних моделей управління, орієнтованих переважно на мінімізацію втрат та підтримання стабільності, не дозволяє підприємствам ефективно адаптуватися до невизначеності, а тим більше — використовувати кризові збурення як джерело зростання. Особливої актуальності в цьому контексті набуває проблема своєчасного виявлення, ідентифікації та інтерпретації ризиків розвитку підприємств. Існуючі системи ризик-менеджменту здебільшого зосереджені на окремих фінансових або операційних ризиках, мають фрагментарний характер і не враховують системну природу ризиків, їх нелінійну динаміку, взаємопосилення та зв'язок із процесами розвитку, трансформації й еволюції бізнес-систем. Водночас у наукових дослідженнях недостатньо розробленими залишаються підходи до ризик-діагностики розвитку підприємств як інтегрованого інструменту, що поєднує оцінювання ентропійних процесів, вразливостей, адаптивного потенціалу та можливостей підприємства до самооновлення. Наявний дефіцит методологічних засад, показників і моделей, які дозволяли б не лише фіксувати рівень ризику, а й визначати точки переходу від крижкості до стійкості та антикрижкості, ускладнює формування ефективних управлінських рішень. Крім того, концепція антикрижкості бізнес-систем, попри її зростаючу популярність, залишається недостатньо інституціоналізованою в прикладних дослідженнях підприємницького розвитку. Відсутність чітко структурованих діагностичних інструментів, які б дозволяли оцінювати здатність підприємств отримувати вигоди від ризиків, шоків і невизначеності, обмежує практичну реалізацію антикрижких стратегій розвитку.

Аналізі літературних джерел. Дослідження проблем ризик-діагностики розвитку підприємств тісно пов'язані з використанням кваліметричних підходів до оцінювання складних соціально-економічних систем. Так, у працях М. Адаменко обґрунтовано методологію кваліметричної оцінки інноваційного потенціалу персоналу підприємств, що дозволяє формалізувати якісні характеристики розвитку та трансформувати їх у кількісні показники [1; 2]. Запропоновані підходи створюють методичну основу для побудови інтегральних індикаторів, які можуть бути адаптовані до завдань діагностики ризиків і виявлення прихованих ентропійних процесів у діяльності підприємств. Подальший розвиток кваліметричного інструментарію простежується у роботі Д. В. Бровка, В. Хвороста та В. Тищенка, де оцінювання рівня живучості об'єктів здійснюється з урахуванням багатфакторності та невідзначеності зовнішнього середовища [3]. Хоча дослідження виконано в галузевому контексті, його методичні положення мають універсальний характер і можуть бути використані для ризик-діагностики стійкості та крихкості бізнес-систем в умовах нелінійної динаміки. Значний науковий інтерес становлять роботи, присвячені проблемам релокації бізнесу як реакції підприємств на економічні ризики та кризові виклики. Зокрема, у дослідженні G. Catalin та P. Oana запропоновано модель прийняття управлінських рішень щодо релокації бізнесу в умовах нестабільності, що розглядається як інструмент зниження ризиків і збереження конкурентоспроможності [4]. Водночас автори зосереджуються переважно на адаптивних механізмах, не розкриваючи потенціал використання ризиків як джерела розвитку.

Емпіричні аспекти просторової мобільності підприємств висвітлено у роботі М. Christersson та J. Culley, де проаналізовано частоту та масштаби релокації організацій [5]. Отримані результати дозволяють ідентифікувати релокацію як прояв реакції бізнес-систем на зростання ентропії зовнішнього середовища, що є важливим для формування системи ранньої ризик-діагностики. Питання кількісного оцінювання економічного ризику в умовах нелінійної динаміки розглянуто у праці Ю. В. Коляди, Т. Л. Кмитюк та І. Ф. Шатарської, де запропоновано систему методів і моделей аналізу числової міри ризику [6]. А також у працях Матвійчук А. [7;8], та інші, де автори акцентують увагу на змінності та нестійкості ризикових параметрів, що безпосередньо корелює з концепцією ентропійного розвитку підприємств та необхідністю комплексної ризик-діагностики. Подальший розвиток кваліметричного підходу в контексті управління релокацією бізнесу запропоновано у роботах [9;10], де оптимізація бізнес-моделі розглядається крізь призму багатокритеріального оцінювання управлінських рішень. Запропонований підхід є важливим інструментом формалізації ризик-діагностики та дозволяє оцінювати здатність підприємств трансформувати ризики у джерело підвищення результативності.

Узагальнення результатів аналізу літературних джерел свідчить, що, попри наявність значного доробку у сфері кваліметрії, ризик-менеджменту та досліджень релокації бізнесу, питання ризик-діагностики ентропійного розвитку підприємств як основи формування антикрихких бізнес-систем залишається недостатньо систематизованим. В свою чергу, — це умовляє необхідність інтеграції ентропійного підходу, кваліметричних методів і концепції антикрихкості в єдину методологічну платформу подальших наукових досліджень.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Незважаючи на наявність значної кількості наукових досліджень, присвячених ризик-менеджменту, кваліметричній оцінці діяльності підприємств, аналізу нелінійної динаміки еконо-

мічних систем та проблемам релокації бізнесу, у сучасній науковій літературі відсутній цілісний підхід до ризик-діагностики саме ентропійного розвитку підприємств. Переважна більшість існуючих моделей зосереджена на фіксації рівня ризику або стійкості, тоді як процеси накопичення ентропії, переходу від порядку до хаосу та трансформації крихких бізнес-систем в антикрихкі залишаються поза межами системного аналізу. Недостатньо дослідженим є питання інтеграції кваліметричних методів оцінювання з ентропійним підходом для виявлення прихованих дисбалансів розвитку підприємств. Також не сформовано універсальний діагностичний інструментарій, який дозволяв би одночасно оцінювати рівень ризику, адаптивний потенціал та здатність підприємств отримувати вигоди від зовнішніх збурень. Відсутність такої методики обмежує практичне впровадження концепції антикрихкості в управлінні розвитком бізнес-систем.

Метою статті. Метою статті є обґрунтування теоретико-методичних засад ризик-діагностики ентропійного розвитку підприємств та розробка методичного підходу до оцінювання їх антикрихкості як здатності трансформувати ризики, невизначеність і зовнішні шоки у фактори розвитку та підвищення результативності бізнес-систем.

Методика дослідження. Методика дослідження ґрунтується на поєднанні загальнонаукових та спеціальних методів економічного аналізу. У процесі дослідження використано методи аналізу та синтезу — для узагальнення теоретичних підходів до ризик-діагностики та ентропійного розвитку підприємств; системний та структурно-функціональний підходи — для дослідження підприємства як відкритої нелінійної бізнес-системи; кваліметричні методи — для формування інтегральних показників ризику та ентропії розвитку; методи економіко-математичного моделювання — для опису нелінійної динаміки ризиків; графічні та логіко-аналітичні методи — для візуалізації діагностичних результатів і обґрунтування управлінських рішень.

Виклад основного матеріалу дослідження. Підприємство у сучасних умовах функціонує як відкрита соціально-економічна система, розвиток якої супроводжується постійним зростанням рівня невизначеності та ентропії. Ентропійний розвиток проявляється у вигляді дестабілізації внутрішніх процесів, порушення усталених зв'язків, зниження передбачуваності результатів діяльності та зростання ризиків. У цьому контексті ризик-діагностика розглядається не лише як інструмент виявлення загроз, а як механізм оцінювання потенціалу трансформації бізнес-системи. Запропонований у статті підхід до ризик-діагностики ентропійного розвитку підприємств базується на формуванні системи показників, що відображають фінансові, операційні, організаційні та стратегічні аспекти діяльності підприємства. За допомогою кваліметричного агрегування здійснюється розрахунок інтегрального індексу ентропійного ризику, який дозволяє ідентифікувати критичні зони розвитку та точки біфуркації бізнес-системи.

На нашу думку, особливістю запропонованої методики є інтерпретація ризиків як потенційного джерела зростання. Залежно від значень інтегрального індексу ентропії та адаптивного потенціалу підприємства визначаються типи бізнес-систем — крихкі, стійкі або антикрихкі, що в свою чергу створює підґрунтя для обґрунтування управлінських рішень, спрямованих на формування антикрихких стратегій розвитку, зокрема шляхом диверсифікації, релокації, цифрової трансформації та інституційного оновлення.

У розмаїтті сучасних економічних парадигм, де динаміка змін перевершує статистику передбачуваності, постає нагальна потреба в методологічному апараті, здатному досягнути й артикулювати внутрішні трансформації підприємства. У цьому контексті ентропійний розвиток виступає як метафора, що відображає рівень невизначеності, хаосу та нестабільності бізнес-процесів. Оцінювання цього феномену не є простою технічною процедурою, а радше гносеологічна місія, що прагне проникнути в сутність системних відхилень та виявити приховані драйвери дестабілізації.

Традиційні підходи до аналізу підприємницької діяльності часто зосереджуються на детермінованих моделях, ігноруючи стохастичний характер багатьох внутрішніх і зовнішніх факторів. Однак, у світлі зростаючої складності та взаємозалежності ринків, необхідність у комплексному методичному інструментарії для оцінювання ентропійного розвитку стає очевидною. Даний інструментарій має бути спроможним не лише констатувати наявність ентропії, а й вимірювати її інтенсивність, ідентифікувати джерела її походження та прогнозувати потенційні наслідки для життєздатності підприємства. Таким чином, розробка та впровадження ефективних управлінських рішень, спрямованих на зниження ентропії та забезпечення сталого розвитку, вимагає не просто реагування на виклики, а й проактивного формування майбутнього. Тобто, доцільно підкреслити, що перехід від лінійної логіки причинно-наслідкових зв'язків до системного, що враховує нелінійні взаємодії та емерджентні властивості.

Отже, методичний інструментарій оцінювання ентропійного розвитку підприємства є фундаментальним елементом сучасного стратегічного управління. Його системне та послідовне застосування дозволяє не лише своєчасно ідентифікувати потенційні ризики та загрози, що виникають внаслідок зростання невизначеності, ентропії та управлінського хаосу, а й формувати адаптивні управлінські рішення, орієнтовані на зменшення дестабілізації. Такий підхід сприяє підвищенню стійкості організаційної системи до динамічних змін зовнішнього та внутрішнього середовища, зменшенню втрат і оптимізації бізнес-процесів.

Однак на сучасному етапі простої стійкості вже недостатньо. У складному та волатильному середовищі особливої значущості набуває концепція антикрихкості, яка передбачає не лише здатність підприємства витримувати стресові впливи, а й розвиватися завдяки ним. У цьому контексті аналіз ентропії виступає вихідною точкою для діагностики «крихких місць» у структурі, тоді як кваліметричні методи оцінки дозволяють будувати інтегральні профілі антикрихкості, що охоплюють здатність до самооновлення, інновацій, гнучкості, швидкого навчання та адаптації. Тобто, в даному контексті, аналіз ентропії — це не лише інструмент вимірювання неупорядкованості, а й компас для побудови антикрихкої бізнес-моделі, здатної адаптуватися, навчатись і еволюціонувати в умовах невизначеності. Саме через поєднання ентропійного аналізу з кваліметричними методами відкривається можливість формувати стратегічну антикрихкість підприємства. Саме тому, поєднання ентропійного підходу з концепцією антикрихкості формує нову парадигму стратегічного управління, в межах якої підприємство розглядається не як система, що протистоїть хаосу, а як динамічний організм, що вчиться, трансформується і зростає завдяки змінам. Такий підхід не лише підвищує рівень життєздатності підприємства, а й відкриває можливості для побудови моделей сталого, інноваційного та трансформаційного розвитку, що є критично важливим у XXI столітті.

Для аналізу складної динаміки, що характеризує *ентропійний розвиток підприємств*, особливу теоретичну та практичну цінність становить застосування математичного апарату. Система динамічних рівнянь відноситься до класу *моделі Вольтерри-Лотки*, яка початково була розроблена для опису взаємодії біологічних популяцій («хижак-жертва» або конкурентні відносини), знаходять широке застосування в економіці для моделювання динамічних процесів, таких як конкуренція на ринку, турбулентні явища, взаємодія між різними технологічними парадигмами, коливання ринкових часток або ресурсів, тощо. Для глибинного розуміння та прогнозування динаміки розвитку підприємства в умовах зростаючої невизначеності та хаосу, що характерно для трансцендентної економіки, доцільно використовувати математичні моделі. Сформулюємо математичну модель ентропійного розвитку підприємства, яка дозволяє аналізувати взаємодію ключових показників прибутку та вплив ентропійних процесів, яка функціонує в трансцендентному середовищі такого виду:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -a \cdot x_1 + b \cdot x_1 \cdot x_2, \\ \dot{x}_2 = c \cdot x_2 + e \cdot x_1 - f \cdot x_1 \cdot x_2, \end{cases} \quad (1.1)$$

де відповідно:

— змінна x_1 — описує поточний рівень прибутку підприємства, що є інтегральним показником його впорядкованості та ефективності. Зниження x_1 може трактуватися як зростання загальної ентропії системи підприємства.

— $\dot{x}_1$ - похідна, яка характеризує швидкість зміни прибутку підприємства з часом. Висока амплітуда та непередбачуваність коливань цієї похідної свідчать про нестабільність розвитку, відображаючи фінансову та операційну ентропію підприємства.

— змінна x_2 — описує прибуток діяльності підприємства під безпосереднім впливом ентропійних процесів, що відображає його чутливість та реакцію на дезорганізаційні чинники зовнішнього та внутрішнього середовища. Зростання x_2 може вказувати на посилення впливу хаосу, тоді як його зниження, за умови збереження позитивної динаміки x_2 свідчить про ефективне управління ентропією.

— $\dot{x}_2$ - похідна, яка характеризує швидкість змінюваності прибутку під впливом ентропійних чинників. Динаміка цієї похідної дає уявлення про інтенсивність адаптивних процесів та швидкість, з якою підприємство реагує на посилення або послаблення ентропійних тисків.

— доданок $(-a \cdot x_1)$ першого рівняння математичної моделі, який відображає виснаженість ресурсів підприємства (*наприклад, зношеність основних фондів, деградація людського капіталу, вичерпання ринкових ніш*) зі сталим коефіцієнтом a . Доданок є прямим математичним відображенням зростання внутрішньої ентропії системи, що призводить до зниження її продуктивності та потенціалу.

— доданок $(b \cdot x_1 \cdot x_2)$ відображає вплив зовнішнього середовища. У контексті ентропії, цей доданок може інтерпретуватися як інноваційний потенціал або позитивна синергія, що виникає в умовах зовнішньої турбулентності. Наприклад, поява нових технологій чи зміна споживчих переваг, хоч і збільшує загальну невизначеність, може водночас створювати нові можливості для прибуткової діяльності. Таким чином, він може слугувати показником того, як підприємство перетворює зовнішню ентропію на імпульс для розвитку.

— доданок $(c \cdot x_2)$ другого рівняння математичної моделі виражає ступінь саморозвитку підприємства, який символізує негентропійні процеси, такі як інвестиції в

R&D, навчання персоналу, оптимізація внутрішніх процесів, що дозволяють системі підтримувати або підвищувати свою організованість та складність навіть в умовах зовнішнього хаосу.

— доданок $(e \cdot x_1)$ характеризує підвищення доходності фактору x_2 за рахунок взаємодії з x_1 , що може інтерпретуватися як здатність підприємства генерувати додатковий прибуток (*знижувати ентропію*) завдяки ефективній інтеграції впливу ентропійних процесів у свою основну діяльність, або через синергетичний ефект між різними аспектами прибутковості в умовах адаптації.

— доданок $(f \cdot x_1 \cdot x_2)$ вказує на частку ентропійних процесів, що безпосередньо впливають на розвиток підприємства, що в свою чергу, відображає втрати, ризики або необхідні витрати, які підприємство несе внаслідок підвищеної дезорганізації та невизначеності (*наприклад, витрати на управління ризиками, втрати від неефективності, збої*). Він є прямим кількісним показником внеску ентропії у динаміку розвитку підприємства.

— коефіцієнти a, b, c, e, f математичної моделі є додатними скалярами, що відображають інтенсивність та характер взаємозв'язків між факторами, які генерують або нівелюють ентропію в системі підприємства. Їх значення критично впливають на динамічну поведінку моделі, визначаючи стабільність, коливання або тенденції до хаосу в розвитку підприємства.

Запропонована математична модель дозволяє не лише аналізувати динаміку прибутку, а й кількісно оцінювати, як взаємодія чинників ентропії (*виснаженість, зовнішній вплив, частка ентропійних процесів*) та негентропії (*саморозвиток, синергія*) формує траєкторію розвитку підприємства в умовах трансцендентного середовища, а її дослідження є ключовим для розробки адаптивних стратегій управління.

Отже, система динамічних рівнянь Вольтерри — Лотки (1), для якої які характеризуються певними початковими умовами та наявністю специфічного доданку $(e \cdot x_1)$. Традиційно спочатку знаходяться точки левєриджу з умови $\dot{x}_1 = \dot{x}_2 = 0$, з першого рівняння математичного рівняння (2.1) маємо: $x_2 = a/b$; оскільки $x_1(b \cdot x_2 - a) = 0$, то друге рівняння системи набуває вигляду:

$$c \cdot \frac{a}{b} + e \cdot x_1 - f \cdot x_1 \cdot \frac{a}{b} = 0, \quad (1.2)$$

звідки маємо $x_1 = \frac{a \cdot c}{f \cdot a - b \cdot e}$, причому $f \cdot a > b \cdot e$. Тривіальний розв'язок $x_1 = x_2 = 0$, зрозуміло, не розглядається.

Отже, далі продовжимо математичне дослідження трендів ентропійного розвитку підприємства. Розглянемо поведінку розв'язків математичної моделі ентропійного розвитку (2.1) в околі точки рівноваги (*точки левєриджу*) — стану, де фактори прибутку та впливу ентропійних процесів збалансовані (*хоча й динамічно*). Відповідна, сідлова точка може інтерпретуватися як стан оптимальної керованості ентропією або динамічної квазі-рівноваги підприємства. Для дослідження малих відхилень від цього стану (*так званий лінійний аналіз*), використаємо заміну змінних:

$$\xi(t) = x_1 - \frac{c \cdot a}{f \cdot a - b \cdot e}; \nu(t) = x_2 - a/b. \quad (1.3)$$

Оскільки похідні $\xi'(t) = \dot{x}_1, \nu(t) = \dot{x}_2$, то ця підстановка дозволяє записати перше рівняння динамічної моделі (1) в координатах $\xi(t)$ та $\nu(t)$ таким чином:

$$\xi(\dot{t}) = \frac{b \cdot c \cdot a}{f \cdot a - b \cdot e} \cdot v(t), \quad (1.4)$$

знехтувавши нелінійністю добутку $(b \cdot \xi(t) \cdot v(t))$.

де: $x_1 = x_2 = 0$ — сталі значення прибутку та впливу ентропійних процесів у точці рівноваги, а $\xi(t)$ та $v(t)$ — малі відхилення від цих рівноважних значень, які відображають флуктуації або «шум», що генерує ентропію навколо передбачуваного стану. Спрощення дозволяє зосередитися на базових осциляційних (ентропійних) тенденціях системи поблизу точки рівноваги, ігноруючи складніші, але менш значущі для цього аналізу нелінійні взаємодії.

Аналогічні дії щодо другого рівняння математичної моделі (2.1) призводять до такого диференціального рівняння:

$$\xi(\dot{t}) = c \cdot v(t) + e \cdot \xi(t) - \frac{f \cdot c \cdot a}{f \cdot a - b \cdot e} \cdot v(t) - \frac{f \cdot a}{b} \cdot \xi(t), \quad (1.5)$$

оскільки сума сталих величин дорівнює нулю у точці рівноваги:

$$c \cdot \frac{a}{b} + e \cdot \frac{a \cdot c}{f \cdot a - b \cdot e} - f \cdot \frac{a \cdot c}{(f \cdot a - b \cdot e)} \cdot \frac{a}{b} = 0. \quad (1.6)$$

Диференціюючи цей вираз (*), отримуємо диференціальне рівняння другого порядку яке описує динаміку відхилень:

$$\ddot{u} = \frac{b \cdot a \cdot c}{f \cdot a - b \cdot e} \cdot v(\dot{t}). \quad (1.7)$$

Використовуючи попередній вираз і нехтуючи нелінійністю членів, після алгебраїчних перетворень маємо:

$$\ddot{u} \approx c \cdot a \cdot v(t) - \frac{b^2 \cdot c^2 \cdot a \cdot e}{(f \cdot a - b \cdot e)^2} \cdot v(t). \quad (1.8)$$

Зауваження 1. Для певних умов, наприклад, відсутності окремих факторів (наприклад, для випадку, коли коефіцієнт $e=0$, що відповідає відсутності певного підвищення дохідності), має місце класичний варіант лінійного аналізу ортодоксальної динамічної моделі Вольтерри-Лотки. У нашому ж випадку з'являється специфічний доданок, що відображає унікальні аспекти генерації або поглинання ентропії в рамках функціонування підприємства.

$$\text{У нашому випадку з'являється доданок } \left(-\frac{b^2 \cdot c^2 \cdot a \cdot e}{(f \cdot a - b \cdot e)^2} \cdot v(t) \right). \quad (1.9)$$

Крім того, вираз похідної $\dot{v}$ можна переписати таким чином:

$$\dot{v} + \frac{b \cdot c \cdot e}{f \cdot a - b \cdot e} \cdot v(t) = \frac{b \cdot e - f \cdot a}{b} \cdot v(t), \quad (1.9)$$

що відповідає лінійному неоднорідному диференціальному рівнянню 1-го порядку, для якого існує аналітичний розв'язок, що можна записати:

$$v(\tau) = \exp(C_1 \tau) \cdot \left(\frac{c \cdot e}{C_1} \int \exp(-C_1 \tau) \xi(t)(\tau) \cdot d\tau \right), \quad (1.10)$$

де сталими інтегрування є нуль і величина $C_1 = \frac{b \cdot c \cdot e}{f \cdot a - b \cdot e}$. Інтегруванням за частинами знаходимо: $v = \frac{b \cdot e - f \cdot a}{b} \cdot \xi(t)$.

І після нескладних перетворень отримуємо стандартне (для курсу вищої математики ВНЗ) диференціальне рівняння 2-го порядку

$$\ddot{\xi} + (c \cdot a + e) \cdot \xi(t) = 0, \quad (1.10)$$

розв'язок якого записується

$$\xi(t) = A \cdot \sin(\sqrt{c \cdot a + e} \cdot t), \quad (1.11)$$

де A є сталою величиною, яка виражається через коефіцієнти динамічної моделі (1). Зауважимо, що для $e = 0$ матимемо відомий результат. Аналогічно отримується результат і для другої функції $v(t)$:

Аналогічно отримується результат для другої функції

$$v(t) = B \cdot \cos(\sqrt{c \cdot a + e} \cdot t) \quad (1.12)$$

де B є сталою величиною, яка також виражається через коефіцієнти математичної моделі (1).

Алгебраїчні перетворення (піднесення до квадрату цих виразів для змінних ξ та v , їхнє додавання) призводять до канонічного рівняння еліпсу та підходить для гемберца:

$$\frac{\xi(t)^2}{A^2} + \frac{v(t)^2}{B^2} = 1, \quad (1.13)$$

Графічно ці траєкторії будуть розтягнені або сплюснені вздовж осі абсцис, що відображає диспропорції в амплітудах та фазах коливань між показниками прибутку та впливу ентропійних процесів.

Отже, в околі рівноважної точки $E(\frac{c \cdot a}{f \cdot a - b \cdot e}; a/b)$ мають місце коливальні рухи, що є прямим проявом динамічної ентропії в системі підприємства. Саме окреслені колювання свідчать про те, що навіть у стані «балансу» система не є статичною, а постійно зазнає флуктуацій, що генерують невизначеність.

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{c \cdot a + e}}. \quad (1.14)$$

Є ключовою характеристикою, яка вказує на частоту та інтенсивність ентропійних збурень, дозволяючи оцінити, наскільки швидко система повертається до свого «ідеального» стану або наскільки циклічно проявляється дезорганізація. Розв'язки $x_1(t)$ та $x_2(t)$ динамічної математичної моделі (2.1), тобто інтегральні криві, з плином часу відображають циклічний характер ентропійного розвитку підприємства, які можуть бути, наприклад, коливання ділової активності, фінансові цикли або періодичні зміни рівня дезорганізації, спричинені зовнішніми чи внутрішніми факторами. Економічна сутність заміни змінних x_1 та x_2 на $\xi(t)$ та v відповідно означає вивчення поведінки динамічної моделі (1) в околі точки леввериджу E — аналіз трендових залежностей і статистичних складових:

$$x_1 = \xi(t) = + \frac{c \cdot a}{f \cdot a - b \cdot e}; \quad (1.15)$$

$$x_2 = v(t) + a \cdot b, \quad (1.16)$$

✓ змінна $\xi(t)$ відображає тренд динамічного збільшення прибутку підприємства, що є бажаним, упорядкованим розвитком (проявом негентропії), а доданок $\frac{a \cdot c}{f \cdot a - b \cdot e}$ є статистичною (випадковою) складовою, яка відображає ентропійні коливання навколо цього тренду, спричинені множиною непередбачуваних факторів.

✓ змінна $v(t)$ характеризує тренд динамічного зростання прибутку підприємства під впливом ентропійних процесів, демонструючи, як підприємство (або його окремих аспект) адаптується до хаосу, а доданок (a/b) є статистичною складовою, що відтворює випадкові відхилення або "шум" у цій адаптаційній динаміці, також відображаючи ентропійні прояви.

Таким чином, лінійний аналіз дозволяє виокремити та виміряти інтенсивність та періодичність ентропійних флуктуацій навколо бажаних або стабільних траєкторій розвитку підприємства, надаючи основу для розробки цілеспрямованих управлінських стратегій для мінімізації їхнього деструктивного впливу.

Далі проведемо аналітичне моделювання залежності ентропійних факторів на розвиток підприємства, що дозволить кількісно оцінити вплив хаосу та невизначеності на його функціонування. Шляхом ділення другого рівняння математичної моделі (2.1) на перше, ми отримуємо диференціальне рівняння, що описує співвідношення швидкостей зміни прибутку та впливу ентропійних процесів:

$$\frac{\dot{x}_2}{\dot{x}_1} = \frac{c \cdot x_2 + e \cdot x_1 - f \cdot x_1 \cdot x_2}{-a \cdot x_1 + b \cdot x_1 \cdot x_2}, \quad (1.17)$$

Шляхом відокремлення змінних та зведення до відповідних диференціалів, цей вираз набуває такого виду, що дозволяє інтегрувати його для отримання неявної залежності:

$$-a \cdot \frac{dx_2}{x_2} + b \cdot dx_2 = c \cdot \frac{dx_1}{x_1} - f \cdot dx_1 + e \cdot \frac{dx_1}{x_2}. \quad (1.18)$$

Загальний інтеграл даного виразу записується наступним чином, відображаючи інтегральну траєкторію розвитку підприємства під впливом ентропійних чинників:

$$-a \cdot \ln x_2 + b \cdot x_2 = c \cdot \ln x_1 - f \cdot x_1 + e \cdot \int \frac{dx_1}{x_2} + \ln K, \quad (1.19)$$

де величина $\ln K$ є сталою інтегрування, що визначає конкретну траєкторію розвитку підприємства залежно від його початкових умов та початкового рівня ентропії. Потенціюванням загального інтегралу отримуємо вираз, що описує неявну функціональну залежність між прибутком підприємства прибутком під впливом ентропійних процесів:

$$x_2^{-a} \cdot \exp(b \cdot x_2) = x_1^c \cdot \exp(-f \cdot x_1) \cdot K \cdot \exp\left(e \cdot \int \frac{dx_1}{x_2}\right). \quad (1.20)$$

У випадку, коли певні коефіцієнти моделі дорівнюють нулю (наприклад, $f=0$, що може відповідати відсутності безпосередніх втрат від ентропійних процесів), має місце загальний інтеграл класичної моделі Вольтерри-Лотки, який підкреслює, що базова динаміка взаємодії економічних факторів у даній моделі є фундаментальною, а додаткові члени відображають специфічні ентропійні впливи. Для цього останнього виразу (2.14) можливо вказати графічний спосіб інтерпретації розв'язку в неявній формі [6]. Для цього перепишемо вираз (2.14) таким чином:

$$x_1^{-c} \cdot \exp(f \cdot x_1) = x_2^a \cdot \exp(-b \cdot x_2) \cdot K \cdot \exp\left(e \cdot \int \frac{dx_1}{x_2}\right), \quad (1.21)$$

де стала інтегрування K визначається таким чином через початкові умови x_1 та x_2 для математичної моделі (2.1):

$$K = \frac{\exp(f \cdot x_1) \cdot \exp(b \cdot x_2)}{x_2^a \cdot x_1^c}. \quad (1.22)$$

Оскільки числове значення x_2 є часткою змінної x_1 , тобто $x_2 = q \cdot x_1$, $q < 1$, то співмножник $\exp\left(e \cdot \int \frac{dx_1}{x_2}\right)$ після елементарних перетворень набуває остаточного виду:

$$\exp\left(e \cdot \int \frac{dx_1}{x_2}\right) = \exp\left(e \cdot \int \frac{dx_1}{qx_1}\right) = \exp\left(\frac{e}{q} \cdot \int \frac{dx_1}{x_1}\right) = \exp\left(\frac{e}{q} \cdot \ln x_1\right) = \exp\left(\ln x_1^{\frac{e}{q}}\right) = x_1^{\frac{e}{q}}. \quad (1.23)$$

Тоді загальний інтеграл математичної моделі (1), що описує конкретну траєкторію ентропійного розвитку підприємства, запишеться в такому виді (*Інтеграл=Початкові умови*):

$$x_1^{-(c+\frac{e}{q})} \cdot \exp(f \cdot x_1) = x_2^a \cdot \exp(-b \cdot x_2) \cdot K, \quad (1.24)$$

В свою чергу, це робить доцільним [3] введення нових позначень, що дозволяють спростити аналіз складних нелінійних взаємодій ентропійних факторів::

$$Y = x_1^{-(c+\frac{e}{q})} \cdot \exp(f \cdot x_1), \quad X = x_2^a \cdot \exp(-b \cdot x_2), \quad (1.25)$$

і тоді має місце лінійна залежність $Y = K \cdot X$, що спрощує подальший аналіз і дозволяє виявити лінійні тренди навіть у нелінійних ентропійних системах.

Надалі розглядається специфічна система координат — перші квадранти чотирьох систем координат, а саме: XOY , x_1OY , x_2OX і x_1Ox_2 зі спільним початком — т. O . В свою чергу, це дозволяє візуалізувати динаміку прибутку та ентропійних впливів у різних масштабах та трансформаціях, *рис. 2.1*.

В першому квадранті системи координат x_1Ox_2 (3-му квадранті цієї узагальненої системи координат) побудовано замкнуту криву, що відповідає неявно заданій функції — загальному інтегралу математичної моделі (2.1) — і показано розташування рівноважної точки $E(c + \frac{e}{q}; a \cdot b)$, замкнута крива ілюструє цикліч-

ність ентропійних коливань навколо точки рівноваги, яка може бути як стабільною, так і мати приховані аттрактори. Екстремальні точки (*min* для функції Y і *max* для X) для кривих у відповідних квадрантах систем координат x_1OY , x_2OX знаходяться як для випадку функції однієї змінної. Екстремуми вказують на моменти максимального прояву або, навпаки, мінімізації ентропійних впливів на прибуток підприємства.

■

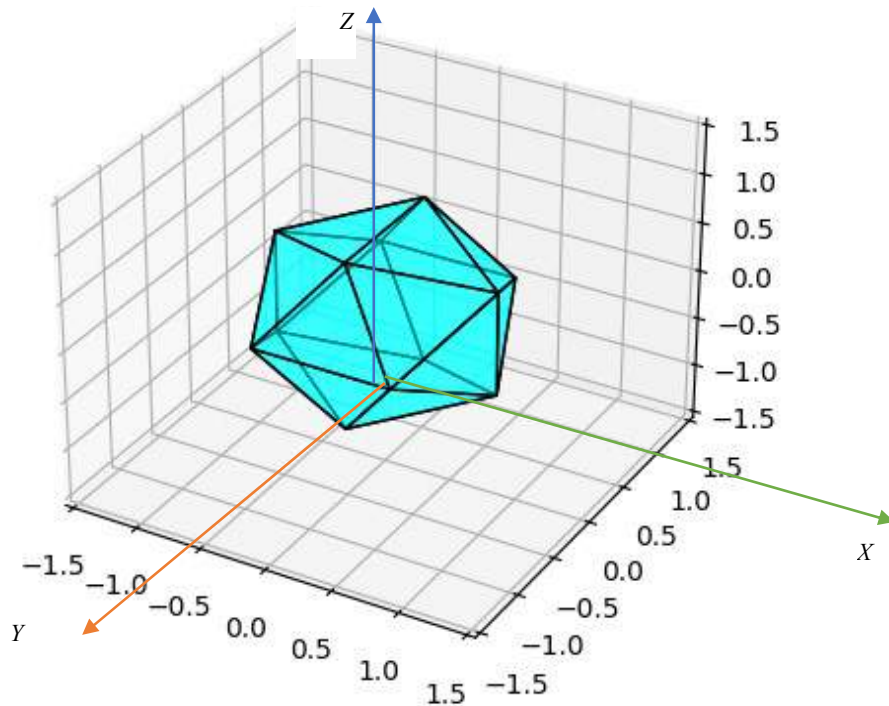


Рис. 2. Полігональна модель Гемберца
шляхом візуалізації ентропії у просторовій сітці

Джерело: побудовано за допомогою програмного продукту Untitled0.ipynb

Дискусія. Варто відмітити, що в умовах високої невизначеності та складності сучасного економічного середовища традиційні методи аналізу часто виявляються недостатньо ефективними для адекватної оцінки стану підприємства. У зв'язку з цим зростає роль нечіткого моделювання (fuzzy modeling) як інструменту, здатного враховувати якісні, неповні та нечіткі дані, що притаманні більшості управлінських рішень. На відміну від класичної бінарної логіки, яка оперує жорсткими категоріями «так» або «ні», нечітка логіка (англ. *fuzzy logic*), запропонована Лотфі Заде у 1965 році, дозволяє використовувати ступені істинності, що відкриває можливість моделювання ситуацій з проміжними станами, наприклад: *високий, але не критичний рівень ризику*» помірно нестабільний розвиток, відносно низька ефективність. Саме такі конструкції найчастіше зустрічаються при аналізі динаміки ентропійного розвитку підприємств.

Висновки У результаті проведеного дослідження обґрунтовано доцільність використання ризик-діагностики ентропійного розвитку підприємств як ключового інструменту формування антикрихких бізнес-систем в умовах трансцендентної економіки. Доведено, що зростання невизначеності, турбулентності та нелінійних збурень трансформує традиційні ризики з факторів виключно деструктивного впливу у потенційні джерела розвитку за умови наявності адекватного методичного інструментарію їх діагностики та управління. У статті уточнено економічну сутність ентропійного розвитку підприємства як інтегральної характеристики дезорганізації, стохастичності та нестійкості бізнес-процесів, що безпосередньо впливає на результативність і траєкторії розвитку. Обґрунтовано, що ризик-діагностика в ентропійному вимірі повинна виходити за межі класичного ризик-менеджменту та охоплювати оцінювання прихованих дисбалансів, адаптивного потенціалу і здатності підприємства трансформувати зовнішні шоки у конкурентні переваги. Запропоновано комплексний методичний підхід до оцінювання ентропійного розвитку підприємств, який поєднує системний, кваліметричний, синергетичний та економіко-математичний інструментарій. Побудована математична модель ентропійного розвитку на основі модифікованої системи рівнянь Вольтерри–Лотки дозволяє формалізувати взаємодію прибутковості та ентропійних чинників, ідентифікувати точки динамічної рівноваги, аналізувати циклічні коливання та кількісно оцінювати економічний ризик як міру ентропійної волатильності.

Отримані результати підтверджують, що навіть у стані відносної рівноваги підприємство перебуває у режимі постійних ентропійних флуктуацій, що потребує переходу від реактивних до проактивних управлінських стратегій. Обґрунтовано, що поєднання ентропійного аналізу з кваліметричними методами створює передумови для типологізації бізнес-систем за рівнем крихкості, стійкості та антикрихкості, а також для формування управлінських рішень, спрямованих на посилення здатності підприємств до самооновлення, навчання та еволюційного розвитку.

Практичне значення дослідження полягає у можливості використання запропонованого методичного інструментарію для діагностики «крихких зон» підприємства, обґрунтування стратегій диверсифікації, релокації, цифрової трансформації та інституційного оновлення. Перспективи подальших наукових досліджень пов'язані з розширенням застосування нечіткого моделювання, емпіричною верифікацією запропонованої моделі та адаптацією інструментарію ризик-діагностики до галузевих і регіональних особливостей розвитку підприємств.

Література

1. Adamenko, M. (2014). Qualimetric assessment of enterprise's personnel innovative potential. *Economic Annals-XXI*, 3–4(2), 31–34. <https://ea21journal.world/index.php/ea-v140-08/>
2. Adamenko, M., Zinchenko, O., Kesy, M., Pohrebniak, A., & Redko, K. (2021). Analysis of enterprise personnel innovative potential in the system of management. *Studies of Applied Economics*, 39(7). <https://doi.org/10.25115/eea.v39i7.4986>
3. Brovko, D. V., Khvorost, V., & Tyshchenko, V. (2018). Qualimetric assessment in calculation of the survivability level of the mine surface objects. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (4), 66–71. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-4/14>

4. Catalin, G., & Oana, P. (2019). Decisional model of relocating a business in the context of current economic challenges. *International Journal of Economics and Management Systems*, 4, 98–102. <http://www.iasr.org/iasr/journals/ijems>
5. Christersson, M., & Culley, J. (2018). How far and often do organizations relocate offices? *Nordic Journal of Surveying and Real Estate Research*, 13(1), 18–31. <https://doi.org/10.30672/njsr.66009>
6. Koliada, Y. V., Kmytiuk, T. L., & Shatarska, I. F. (2020). System of methods and models for assessing nonlinear dynamics of the numerical measure of economic risk. *Efektivna Ekonomika*, (7). <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=8052>
7. Bielinskyi, A., Soloviev, V., Matviychuk, A., & Kmytiuk, T. (2025). Capturing Bitcoin Market Dynamics: Assessing Advanced Permutation Entropy Metrics as Early-Warning Indicators. *CEUR Workshop Proceedings*, 3988, Article 8. <https://ceur-ws.org/Vol-3988/paper8.pdf>
8. Bielinskyi, A., Soloviev, V., Matviychuk, A., Solovieva, V., Kmytiuk, T., & Velykoivanenko, H. (2025). Early Warning Signs: Evaluating Permutation Entropy Metrics for Stock Market Crashes. In M. Zgurovsky, & N. Pankratova (Eds.), *Studies in Systems, Decision and Control: Vol. 609. System Analysis and Data Mining (Proceedings of the International Conference on System Analysis and Intelligent Computing)* (pp. 353-369). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-97529-5_21
9. Tepliuk, M., Polishchuk, Y., Fomenko, B., Bortnik, A., Domina, O., & Matsola, S. (2024). An entropic perspective on business relocation in the context of sustainable development. *Financial and Credit Activity Problems of Theory and Practice*, 1(54), 421–439. <https://doi.org/10.55643/fcaptp.1.54.2024.4248>
10. Фоменко Б. О. (2024). Оптимізація бізнес-моделі: кваліметричний підхід до управління релокацією. *Вісник Київського національного економічного університету*, 37(4), 156–166. https://doi.org/10.33111/vz_kneu.37.24.04.14.096.10

References

1. Adamenko, M. (2014). Qualimetric assessment of enterprises personnel innovative potential. *Economic Annals-XXI*, 3–4(2), 31–34. <https://ea21journal.world/index.php/ea-v140-08/>
2. Adamenko, M., Zinchenko, O., Kesy, M., Pohrebniak, A., & Redko, K. (2021). Analysis of enterprise personnel innovative potential in the system of management. *Studies of Applied Economics*, 39(7). <https://doi.org/10.25115/eea.v39i7.4986>
3. Brovko, D. V., Khvorost, V., & Tyshchenko, V. (2018). Qualimetric assessment in calculation of the survivability level of the mine surface objects. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (4), 66–71. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-4/14>
4. Catalin, G., & Oana, P. (2019). Decisional model of relocating a business in the context of current economic challenges. *International Journal of Economics and Management Systems*, 4, 98–102. <http://www.iasr.org/iasr/journals/ijems>
5. Christersson, M., & Culley, J. (2018). How far and often do organizations relocate offices? *Nordic Journal of Surveying and Real Estate Research*, 13(1), 18–31. <https://doi.org/10.30672/njsr.66009>
6. Koliada, Y. V., Kmytiuk, T. L., & Shatarska, I. F. (2020). System of methods and models for assessing nonlinear dynamics of the numerical measure of economic risk. *Efektivna Ekonomika*, (7). <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=8052>
7. Bielinskyi, A., Soloviev, V., Matviychuk, A., & Kmytiuk, T. (2025). Capturing Bitcoin Market Dynamics: Assessing Advanced Permutation Entropy Metrics as Early-Warning Indicators. *CEUR Workshop Proceedings*, 3988, Article 8. <https://ceur-ws.org/Vol-3988/paper8.pdf>

8. Bielinskyi, A., Soloviev, V., Matviychuk, A., Solovieva, V., Kmytiuk, T., & Velykoivanenko, H. (2025). Early Warning Signs: Evaluating Permutation Entropy Metrics for Stock Market Crashes. In M. Zgurovsky, & N. Pankratova (Eds.), *Studies in Systems, Decision and Control: Vol. 609. System Analysis and Data Mining (Proceedings of the International Conference on System Analysis and Intelligent Computing)* (pp. 353-369). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-97529-5_21
9. Tepliuk, M., Polishchuk, Y., Fomenko, B., Bortnik, A., Domina, O., & Matsola, S. (2024). An entropic perspective on business relocation in the context of sustainable development. *Financial and Credit Activity Problems of Theory and Practice*, 1(54), 421–439. <https://doi.org/10.55643/fcaptp.1.54.2024.4248>
10. Fomenko B. O. (2024). *Optimizatsiia biznes-modeli: kvalimetrychnyi pidkhid do upravlinnia relokatsiieiu*. Visnyk Kyivskoho natsionalnoho ekonomichnoho

Стаття надійшла 05.10.2025; прийнята до друку 26.10.2025 р.