

DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2026-86-8>

УДК 330.3:338.2

ФОРМАЛІЗАЦІЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНОЇ СТІЙКОСТІ БІЗНЕС-СТРУКТУР НА ЗАСАДАХ НЕЛІНІЙНОЇ ДИНАМІКИ

FORMALIZATION AND MODELING OF DYNAMIC STABILITY OF BUSINESS STRUCTURES ON THE BASIS OF NONLINEAR DYNAMICS

Гринько Тетяна Валеріївна

доктор економічних наук, професор,
Дніпровський національний університет імені Олеса Гончара
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7882-4523>

Дулєпов Сергій Сергійович

аспірант,
Дніпровський національний університет імені Олеса Гончара
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3875-1111>

Grynko Tetiana, Dulieпов Serhii

Oles Honchar Dnipro National University

У статті обґрунтовано теоретико-методологічні засади моделювання динамічної стійкості бізнес-структур в умовах високої ентропії середовища бізнес-структури. Науковий пошук базується на синтезі закону необхідної різноманітності В. Ешбі та апарату нелінійної дискретної динаміки. Запропоновано перехід від неперервних моделей розвитку до дискретного рекурентного рівняння, що дозволило формалізувати вплив управлінського лагу на траєкторію гомеостазу системи. Ключову увагу приділено концепції «інженерії різноманітності», де параметри внутрішнього потенціалу росту та ресурсної ємності середовища визначені як функції ентропійного балансу. У межах дослідження проведено аналіз стійкості отриманого дискретного відображення та встановлено фундаментальні пороги втрати керованості та ідентифіковано критичне значення добутку темпу росту на крок дискретизації, перевищення якого призводить до виникнення детермінованого хаосу. Доведено, що стійкість бізнес-структури детермінована не лише обсягом сховища управлінських механізмів, а й швидкістю їх активації. Отримані результати створюють підґрунтя для розробки цифрових систем предиктивного менеджменту, здатних мінімізувати ризики входження складних організаційних систем у фазу некерованих біфуркацій.

Ключові слова: закон необхідної різноманітності, інженерія різноманітності, дискретна динаміка, ентропійний баланс, управлінський лаг, детермінований хаос, стійкість бізнес-структур.

The article substantiates the theoretical and methodological foundations for modeling the dynamic stability of business structures operating within the high-entropy environment of inter-organizational cooperation. The research synthesis is built upon W. R. Ashby's Law of Requisite Variety (LRV) and the mathematical apparatus of non-linear discrete dynamics. The authors propose a fundamental transition from continuous growth models to a discrete recurrence mapping, which enables the formalization of the impact of the management lag Δt on the system's homeostatic trajectory. A central focus of the study is the concept of "variety engineering," where the parameters of the intrinsic growth rate $r(H(R), H(D))$ and the carrying capacity of the environment $K(H(R), H(D))$ are redefined as functions of the entropy balance. This approach allows for a quantitative measure of the regulator's variety relative to environmental disturbances. By applying the Euler discretization method to the classical Verhulst logistic equation, the study identifies a specific "numerical chaos" phenomenon inherent in management systems. The stability of the resulting discrete mapping was rigorously tested using the Schur-Cohn criterion. The analysis reveals a fundamental threshold of controllability, identified by the dimensionless parameter $\Delta t \Delta r(H(R), H(D))$. The research proves that even with a robust repository of management mechanisms, an excessive time lag in decision-making acts as an independent source of entropy, pushing the business structure into a zone of bifurcations and period-doubling. The study establishes that the transition to deterministic chaos occurs when the product of the growth rate and the discretization step exceeds the Feigenbaum point. The scientific novelty of the work lies in the integration of "variety



engineering" into iterative management cycles, providing a mathematical basis for predictive business intelligence. The results demonstrate that systemic stability is not a static property but a dynamic equilibrium between the cognitive complexity of the regulator and the temporal resolution of the control loop. These findings provide a framework for developing digital twins and AI-driven management systems capable of maintaining structural integrity in a BANI-world environment by dynamically adjusting the control step to counteract environmental entropy.

Keywords: Law of Requisite Variety, diversity engineering, discrete dynamics, entropy balance, managerial lag, deterministic chaos, sustainability of business structures.

Постановка проблеми. Сучасна парадигма функціонування глобальних економічних систем характеризується переходом до стану перманентної турбулентності, що в науковому дискурсі концептуалізується через термінологічний апарат BANI-світу (Brittle, Anxious, Nonlinear, Incomprehensible). В умовах воєнної агресії, геополітичної напруженості та радикальної цифрової трансформації українські бізнес-структури стикаються з екстремальним рівнем непередбачуваності, що робить традиційні методи стратегічного планування, засновані на принципах лінійного детермінізму, малоефективними. Ключова наукова та прикладна проблема полягає у виникненні так званого «розриву складності», коли динаміка та різноманітність змін екзогенного середовища (технологічні прориви, безпекові загрози, флуктуації споживчих пріоритетів) значно перевищують когнітивну та структурну здатність внутрішніх управлінських контурів опрацьовувати ці сигнали та генерувати адекватні відповіді.

Фундаментальний внесок у розуміння процесів управління складністю було зроблено В. Ешбі, який сформулював закон необхідної різноманітності, згідно з яким «тільки різноманітність може поглинути різноманітність» [1]. У соціо-економічному контексті цей закон було адаптовано С. Біром у моделі життєздатної системи (VSM) [2], де наголошується на важливості адаптивної зв'язності елементів для виживання в умовах ентропії. Водночас, концепція «антикрихкості» Н. Талеба вказує на необхідність варіативності та надлишковості систем для їхнього розвитку під час стресу [3]. Подальший розвиток кібернетичних підходів у роботах В. Гейця дозволяє розглядати механізми самоорганізації як ключовий фактор стійкості складних систем [4].

Проте, незважаючи на ґрунтовність існуючих теоретичних напрацювань, залишається недостатньо вивченим питання формалізації дискретних циклів управління в умовах зростання ентропії. Більшість існуючих моделей розвитку базуються на неперервних диференціальних рівняннях, які не враховують реальну ітераційну природу прийняття рішень

та інформаційні лаги, що виникають у цифрових екосистемах. Як зазначають Е. Брінюлфссон та Е. Макафі, використання штучного інтелекту дозволяє нарощувати «контрольовану різноманітність» регулятора [5], проте математичні умови стійкості таких систем при переході від неперервного до дискретного часу залишаються малодослідженими. Виникає об'єктивна потреба у розробці математичного апарату, здатного поєднати кібернетичні закони з нелінійною дискретною динамікою для моделювання траєкторій розвитку бізнес-структур у мінливому середовищі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз сучасної наукової літератури виявляє певні методологічні розриви між описовою кібернетикою та апаратом нелінійної динаміки. Так, фундаментальний закон необхідної різноманітності В. Ешбі [1] в статті А. Сеґенфелда та Я. Бар-Яма [6] інтерпретується через оцінку ентропії в системах із дискретним часом. Ключовий висновок цієї роботи полягає в тому, що ентропія може бути кількісно визначена через інваріантні міри рекурентності орбіт. Тобто профіль складності для багатокomпонентних систем підпорядковується як правилу суми, так і багатомасштабній версії закону необхідної різноманітності. При цьому отримані результати мають описовий характер, оскільки питання причинно-наслідкового впливу та механізму (тобто того, що визначає стани кожного компонента) не розглядаються. У цей же час розглядаються лише можливі стани системи та її середовища, а також кореляції між цими станами. Спосіб, яким компоненти системи та середовища пов'язані, а також еволюція та адаптивність системи з часом залишились осторонь.

Згожий описовий підхід до застосування закону необхідної різноманітності представлено в дослідженні М. Танніра, Г. Мілса та Д. Калра [7], де пропонується концептуальна модель для міжорганізаційного середовища. Спираючись на дослідження адаптивності, робота систематизує механізми контролю для роботи у динамічних умовах.

Стаття А. Асатіані та ін. [8] пропонує стратегію безпечного впровадження складного ШІ

через механізм «соціотехнічного охоплення». В основі лежить закон необхідної різноманітності, але замість спроби розшифрувати алгоритми, пропонується встановити жорсткі межі їхньої дії, ретельно фільтрувати вхідні дані та вихідні результати. Проте дослідження зберігає якісний характер, не пропонуючи аналітичних розв'язків для перенесення показників ентропії безпосередньо у параметри динамічних рівнянь.

Ключовий математичний конфлікт полягає у формі представлення динаміки. Зокрема, моделі розвитку соціально-економічних процесів [9; 10], які використовує в своїх дослідженнях Р. Іванов, базуються на неперервних диференціальних рівняннях, які за своєю природою є «гладкими» і не здатними генерувати детермінований хаос. Вони ігнорують часові лаги, що веде до хибної стабільності, або розглядають хаос як зовнішній шум, а не як внутрішній результат порушення закону Ешбі в дискретному часі. При цьому в дослідженні [9] через закон Вебера-Фехнера формалізовано ентропійні пороги чутливості систем до інформаційного навантаження.

У цей же час в роботах С. Строгатца [11], С. Янга та ін. [12] доводиться, що реальні управлінські системи є дискретними за своєю суттю, проте їхня формалізація через різниці рівняння часто ігнорує кібернетичний зміст коефіцієнтів.

Виділення невіршених раніше частин загальної проблеми. Отже, науковий розрив полягає у відсутності аналітичної залежності, де параметри відображення є прямими похідними від ентропійного балансу, що й зумовлює необхідність розробки авторського математичного апарату.

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Метою дослідження є розробка та обґрунтування математичного апарату аналізу динамічної стійкості бізнес-структур, який інтегрує кібернетичний закон необхідної різноманітності у нелінійну дискретну модель розвитку, що дозволяє кількісно оцінити вплив управлінських лагів та «інженерії різноманітності» на траєкторію гомеостазу системи в мінливому середовищі.

Виклад основного матеріалу дослідження. Траєкторія розвитку будь-якої бізнес-структури у міжорганізаційному середовищі визначається діалектичною взаємодією двох сил: внутрішнього прагнення до масштабування та зовнішніх обмежень (ресурсних, ринкових, інституційних та ін.). Класичні лінійні моделі експоненціального росту ігнору-

ють фактор обмеженості ресурсів, що робить їх непридатними для моделювання в умовах динамічної складності.

Найбільш адекватним математичним базисом у такому контексті є рівняння Ферхюльста [13], яке використовується в [9] та описує нелінійний процес самообмеженого росту. Вибір логістичної моделі зумовлений її здатністю формалізувати стан динамічної рівноваги, де темп розвитку системи саморегулюється залежно від її наближення до граничного стану. Розглянемо базову форму неперервного рівняння:

$$\frac{dN(t)}{dt} = r \cdot N(t) \cdot \left(1 - \frac{N(t)}{K}\right), \quad (1)$$

де $N(t)$ – інтегральний показник рівня розвитку бізнес-структури (консолідований капітал, частка ринку або когнітивний потенціал організації); r (intrinsic growth rate) – внутрішній потенціал зростання. У межах нашого дослідження r репрезентує генетичну здатність структури до самоорганізації та ефективність її внутрішніх бізнес-процесів; K (carrying capacity) – гранична ємність середовища. Це критична межа, за якою подальше кількісне розширення структури стає неможливим без якісної трансформації. K детермінується сукупністю зовнішніх факторів – від платоспроможного попиту до регуляторних бар'єрів. Параметр K визначається здатністю системи ідентифікувати та освоювати ресурси. Впровадження підсилювачів різноманітності (інструментів ШІ, Big Data) дозволяє розширювати "горизонт видимості" структури, що формалізується як динамічне зростання K .

Рівняння (1) демонструє, що на траєкторію розвитку впливають два вектори: вектор експансії (експоненційне зростання $r \cdot N(t)$) – відображає негентропійні зусилля структури, спрямовані на ріст; вектор опору (логістичне

гальмування $\left(1 - \frac{N(t)}{K}\right)$) – відображає тиск ентропії середовища та обмеженість управлінського ресурсу. У класичній моделі r – це константа. Проте згідно із законом необхідної різноманітності, потенціал зростання структури прямо залежить від її здатності нівелювати зовнішню ентропію середовища. Так, в умовах цифрової трансформації алгоритмічне підсилення дозволяє зробити r функцією від інтелектуального капіталу. Зокрема, використання ШІ та Big Data підвищує ефективність обробки інформації, що дозволяє бізнес-структурі освоювати ресурси середовища

швидше, ніж конкуренти. Отже, нарощування $H(R)$ (різноманітності регулятора) призводить до зростання r , що дозволяє системі швидше виходити на траєкторію розвитку.

Введемо коефіцієнт кібернетичної адаптивності

$$\alpha = \frac{H(R)}{H(D)}, \quad (2)$$

де $H(R)$ – ентропія регулятора (різноманітність механізмів управління, накопичених у «сховищах» організації); $H(D)$ – ентропія середовища (різноманітність та частота збурювальних впливів).

При $\alpha \geq 1$ (закон Ешбі [1] виконується), система здатна підтримувати високий темп росту та розширювати свою присутність у середовищі.

При $\alpha < 1$ (за умови $H(R) < H(D)$ виникає "розрив складності"), внутрішня ентропія системи починає зростати швидше за темп розвитку, що веде до деградації ($N \rightarrow 0$).

Відповідно, реальний коефіцієнт зростання системи r_{adj} можна представити функцією від адаптивності:

$$r_{adj} = r \cdot \Phi(\alpha), \quad (3)$$

де $\Phi(\alpha)$ – регулююча функція, яка має враховувати, що за умови $H(R) < H(D)$ виникає «дефіцит різноманітності», що математично виражається у деградації показника r та передчасній стагнації системи задовго до досягнення межі K .

Функцію (3) можна представити у вигляді

$$r_{adj} = r \cdot (1 + \ln(\alpha)) = r \cdot \left(1 + \ln \frac{H(R)}{H(D)}\right). \quad (4)$$

У контексті нашої моделі пропонуємо розглядати K як інформаційно-ресурсний горизонт, який може змінюватися під впливом управлінських рішень. Завдяки накопиченню інтелектуального капіталу та впровадженню цифрових підсилювачів, бізнес-структура здатна ідентифікувати приховані ресурси середовища, які раніше були недоступні. Математично це означає, що K стає функцією від внутрішньої різноманітності регулятора $H(R)$:

$$K(t) = K_0 \cdot (1 + \gamma H(R)), \quad (5)$$

де γ – коефіцієнт технологічної трансформації. Таким чином, «інженерія різноманітності» дозволяє системі розсувати межі ринку або підвищувати ефективність використання наявних ресурсів, відсуваючи момент стагнації.

З іншого боку, в умовах хаотичного середовища ентропія $H(D)$ може різко знижувати

ємність ніші. Геополітичні кризи, розриви логістичних ланцюгів або зміна інституційних правил діють як «ентропійний прес», що зменшує K . Якщо швидкість падіння K перевищує швидкість адаптації системи, виникає ситуація перенасичення ($N > K$), що провокує стрімку деградацію структури.

Математично це означає, що K стає функцією від внутрішньої різноманітності регулятора $H(R)$. З іншого боку, в умовах хаотичного середовища ентропія $H(D)$ може різко знижувати ємність ніші. Геополітичні кризи, розриви логістичних ланцюгів або зміна інституційних правил діють як «ентропійний прес», що зменшує K . На цьому етапі дослідження прийmemo

$$r(H(R), H(D)); K = K(H(R), H(D)).$$

Таким чином, рівняння (1) можна представити у вигляді

$$\frac{dN(t)}{dt} = r(H(R), H(D)) \cdot N(t) \cdot \left(1 - \frac{N(t)}{K(H(R), H(D))}\right). \quad (6)$$

Ця неперервна модель стає фундаментом для подальшої дискретизації для оцінки впливу ентропії [6].

Введемо фактор часового лагу Δt прийняття рішень. Проводячи дискретизацію методом Ейлера, представимо

$$\frac{dN(t)}{dt} \approx \frac{N_{t+\Delta t} - N_t}{\Delta t},$$

що дозволяє звести (6) до вигляду

$$N_{t+1} = N_t + \Delta t \cdot r(H(R), H(D)) \cdot N_t \cdot \left(1 - \frac{N_t}{K(H(R), H(D))}\right). \quad (7)$$

Це рівняння є дискретним нелінійним відображенням, стійкість якого залежить від композиції внутрішньої динаміки (r , K) та дискретизації Δt . Проведемо його аналіз.

Для пошуку точок рівноваги прирівняємо $N_{t+1} = N_t = N^*$ [14]. З рівняння (7) отримуємо:

$$\Delta t \cdot r(H(R), H(D)) \cdot N_t \cdot \left(1 - \frac{N_t}{K(H(R), H(D))}\right) = 0,$$

з якого маємо: $N_1^* = 0$ – точка тривіальної рівноваги (деградація структури); $N_2^* = K(H(R), H(D))$ – точка цільового гомеостазу, де система повністю освоює доступну ємність середовища.

У неперервній моделі (1) точка K завжди стабільна. Проте в дискретній моделі стабільність цієї точки залежить від «енергетики» управлінського циклу.

Щоб точка рівноваги $N_2^* = K(H(R), H(D))$ була стійкою, необхідно, щоб значення похідної функції

$$f(N_t) = N_t + \Delta t \cdot r(H(R), H(D)) \cdot N_t \cdot \left(1 - \frac{N_t}{K(H(R), H(D))}\right)$$

в цій точці за модулем не перевищувало одиницю ($|f'(N_2^*)| < 1$) [14].

Після диференціювання

$$f'(N_t) = 1 + \Delta t \cdot r(H(R), H(D)) - \frac{2 \cdot \Delta t \cdot r(H(R), H(D)) \cdot N_t}{K(H(R), H(D))}$$

отримуємо умову стабільності:

$$|1 - \Delta t \cdot r(H(R), H(D))| < 1,$$

яка дає фундаментальне обмеження для менеджменту:

$$0 < \Delta t \cdot r(H(R), H(D)) < 2. \quad (8)$$

Інтерпретуємо (8) для бізнес-структур з урахуванням аналітичних умов монотонності [14]:

– в зоні монотонної конвергенції ($0 < \Delta t \cdot r(H(R), H(D)) < 1$) бізнес-структура плавно наближається до межі K . Це ідеальний стан «ощадливого управління»;

– в зоні затухаючих осциляцій ($1 < \Delta t \cdot r(H(R), H(D)) < 2$) система «перелітає» межу K , а потім повертається. Виникають циклічні кризи, які гасяться за рахунок внутрішніх ресурсів.

При $\Delta t \cdot r(H(R), H(D)) = 2$ точка втрати стійкості. Система втрачає здатність підтримувати стаціонарний стан.

Оскільки $r(H(R), H(D))$ є функцією від ентропійного балансу, ми можемо простежити сценарій розпаду системи:

Зростання складності середовища ($H(D) \uparrow$): якщо «інженерія різноманітності» не ефективна, ефективний темп росту r падає, що парадоксально може стабілізувати систему, але на низькому рівні N ;

Гіперактивне управління ($r(H(R), H(D)) \uparrow$ при великому Δt): якщо система намагається рости швидше, ніж дозволяє швидкість її координації (Δt), добуток $\Delta t \cdot r(H(R), H(D))$ перевищує порогове значення 2: при $\Delta t \cdot r(H(R), H(D)) \approx 2,449$ виникають стабільні цикли періоду 4, при збільшенні $\Delta t \cdot r(H(R), H(D))$ система входить у режим детермінованого хаосу [14].

Отже, якщо в процесі управління ми успішно реалізуємо механізми з наявної

бази управлінських рішень ($H(R) \uparrow$), межа $K(H(R), H(D))$ починає зростати. При цьому якщо $K(H(R), H(D))$ зростає занадто швидко, система може не встигнути накопичити достатньо «інерції» (ресурсів), що призведе до «розриву тканини» організації через невідповідність структури масштабам ринку.

Таким чином, рівняння доводить, що стійкість бізнес-структури не є статичною властивістю. Вона є динамічним балансом між ентропійною потужністю (як швидко ми опрацюємо складність) та інституційною інерцією (як часто ми здатні приймати якісні рішення).

Для збереження стійкості в умовах хаосу (BANI-світ), інженерія різноманітності повинна бути спрямована не стільки на максимізацію $r(H(R), H(D))$, скільки на мінімізацію добутку $\Delta t \cdot r(H(R), H(D))$ шляхом зменшення кроку дискретизації Δt (наприклад: за рахунок впровадження високошвидкісних цифрових двійників).

Висновки. Проведене дослідження математичної моделі та синтезу кібернетичних законів із нелінійною динамікою дозволило формалізувати крок управління Δt як критичний параметр стійкості. Зокрема доведено, що різке екзогенне стиснення ємності середовища вимагає негайного стиснення управлінського циклу Δt , а надмірний часовий лаг Δt стає самостійним джерелом ентропії.

Обґрунтовано концепцію «інженерії різноманітності» як активного процесу формування бази управлінських механізмів. Встановлено, що параметри моделі – внутрішній потенціал росту та ємність середовища не є константами, а виступають функціями ентропійного балансу, що дозволяє кількісно виміряти виконання закону необхідної різноманітності Ешбі в реальному часі.

Математичне дослідження рекурентного рівняння показало, що стійкість гомеостазу бізнес-структури залежить від безрозмірного показника $\Delta t \cdot r(H(R), H(D))$, діапазон змін якого безпосередньо впливає на динаміку бізнес-структури.

Практична значущість результатів полягає у створенні інструментарію для предиктивного менеджменту. Розроблений математичний апарат дозволяє розраховувати «горизонт передбачуваності» для міжорганізаційних проектів та визначати оптимальну швидкість прийняття рішень, яка б запобігала входженню бізнес-структури у фазу некерованих біфуркацій.

Серед напрямків подальших дослідження можна виділити вивчення ефектів резонансу

в міжорганізаційних мережах та подальша деталізація функцій $r(H(R), H(D))$ та $K(H(R), H(D))$, через апарат психофізичних законів сприйняття, що дозволить враху-

вати людський фактор у контурі управління, формалізуючи поріг, за яким менеджмент перестає адекватно реагувати на зростання складності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

1. Ashby, W. R. (1960). *Design for a Brain: The Origin of Adaptive Behavior*. Second edition. Chapman & Hall.
2. Beer, S. (1984). The Viable System Model: Its Provenance, Development, Methodology and Pathology. *Journal of the Operational Research Society*, 35(1), 7–25. doi: 10.1057/jors.1984.2
3. Taleb, N.N., & West, J. (2023). Working with convex responses: Antifragility from finance to oncology. *Entropy*, 25 (2), 343. doi: 10.3390/e25020343
4. Геєць, В. (2022). Соціальна реальність у цифровому просторі. *Економіка України*, 65 (722), 3–28. doi: 10.15407/economyukr.2022.01.003
5. Brynjolfsson, E., & McAfee, A. (2014). *The Second Machine Age: Work, Progress, and Prosperity in a Time of Brilliant Technologies*. W. W. Norton & Company.
6. Siegenfeld, A. F., & Bar-Yam, Y. (2025). A Formal Definition of Scale-Dependent Complexity and the Multi-Scale Law of Requisite Variety. *Entropy*, 27(8), 835. <https://doi.org/10.3390/e27080835>
7. Tannir, M., Mills, G., & Kalra, J. (2021). Adaptable approach to governance, cooperation and coordination: A conceptual framework of the Law of Requisite Variety in large complex projects. In *Reshaping capitalism for a sustainable world, European Academy of Management Conference-EURAM*.
8. Asatiani, A., Malo, P., Nagbøl, P. R., Penttinen, E., Rinta-Kahila, T., & Salovaara, A. (2021). Sociotechnical envelopment of artificial intelligence: An approach to organizational deployment of inscrutable artificial intelligence systems. *Journal of the association for information systems*, 22(2), 325-352. <https://doi.org/10.17705/1jais.00664>
9. Ivanov, R. V., Grynko, T. V., Porokhnya, V. M., Maksyshko, N. K., & Oglii, V. V. (2023). Model aspect of the study of the processes of sustainable development of socio-economic systems. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 1254, No. 1, p. 012123. IOP Publishing.
10. Іванов, Р. В. (2015). Двофакторна модель раціональної дохідної поведінки домогосподарства. *Бізнес Інформ*, (2), 108-112.
11. Strogatz, S. H. (2024). *Nonlinear dynamics and chaos: with applications to physics, biology, chemistry, and engineering*. Chapman and Hall/CRC.
12. Yang, S., Li, W. T., Volpert, V., Fokas, A. S., Kuronen, J., Su, J. J., ... & Kanellos, F. D. (2025). An epidemical model with nonlocal spatial infections. *Proceedings of the European Academy of Sciences and Arts*, 3(1).
13. Sojecka, A. A., & Drozd-Rzoska, A. (2025). Verhulst-type equation and the universal pattern for global population growth. *PLoS One*, 20(5), e0323165. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0323165>
14. Elaydi, S. (2005). *An introduction to difference equations*. New York, NY: Springer New York

REFERENCES:

1. Ashby, W. R. (1960). *Design for a Brain: The Origin of Adaptive Behavior*. Second edition. Chapman & Hall.
2. Beer, S. (1984). The Viable System Model: Its Provenance, Development, Methodology and Pathology. *Journal of the Operational Research Society*, 35(1), 7–25. doi: 10.1057/jors.1984.2
3. Taleb, N.N., & West, J. (2023). Working with convex responses: Antifragility from finance to oncology. *Entropy*, 25 (2), 343. doi: 10.3390/e25020343
4. Heiets, V. (2022). Sotsialna realnist u tsyfrovomu prostori [Social reality in digital space]. *Ekonomika Ukrainy – Economy of Ukraine*, 65(1 (722), 3–28. doi: 10.15407/economyukr.2022.01.003. [in Ukrainian]
5. Brynjolfsson, E., & McAfee, A. (2014). *The Second Machine Age: Work, Progress, and Prosperity in a Time of Brilliant Technologies*. W. W. Norton & Company.
6. Siegenfeld, A. F., & Bar-Yam, Y. (2025). A Formal Definition of Scale-Dependent Complexity and the Multi-Scale Law of Requisite Variety. *Entropy*, 27(8), 835. <https://doi.org/10.3390/e27080835>
7. Tannir, M., Mills, G., & Kalra, J. (2021). Adaptable approach to governance, cooperation and coordination: A conceptual framework of the Law of Requisite Variety in large complex projects. In *Reshaping capitalism for a sustainable world, European Academy of Management Conference-EURAM*.
8. Asatiani, A., Malo, P., Nagbøl, P. R., Penttinen, E., Rinta-Kahila, T., & Salovaara, A. (2021). Sociotechnical envelopment of artificial intelligence: An approach to organizational deployment of inscrutable artificial intelligence systems. *Journal of the association for information systems*, 22(2), 325-352. <https://doi.org/10.17705/1jais.00664>

9. Ivanov, R. V., Grynko, T. V., Porokhnya, V. M., Maksyshko, N. K., & Oglih, V. V. (2023). Model aspect of the study of the processes of sustainable development of socio-economic systems. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 1254, No. 1, p. 012123. IOP Publishing.
10. Ivanov, R. V. (2015). Dvofaktorna model ratsionalnoi dokhidnoi povedinky domohospodarstva [Two-factor model of rational household income behavior]. *Biznes Inform – Business Inform*, (2), 108-112. [in Ukrainian]
11. Strogatz, S. H. (2024). *Nonlinear dynamics and chaos: with applications to physics, biology, chemistry, and engineering*. Chapman and Hall/CRC.
12. Yang, S., Li, W. T., Volpert, V., Fokas, A. S., Kuronen, J., Su, J. J., ... & Kanellos, F. D. (2025). An epidemical model with nonlocal spatial infections. *Proceedings of the European Academy of Sciences and Arts*, 3(1).
13. Sojecka, A. A., & Drozd-Rzoska, A. (2025). Verhulst-type equation and the universal pattern for global population growth. *PLoS One*, 20(5), e0323165. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0323165>
14. Elaydi, S. (2005). *An introduction to difference equations*. New York, NY: Springer New York

Дата надходження статті: 15.04.2026

Дата прийняття статті: 07.05.2026

Дата публікації статті: 15.05.2026