

Тетяна В. Гринько¹, Сергій С. Дулепов²

МОДЕЛЬНА ФОРМАЛІЗАЦІЯ ГРУПОВОЇ ДИНАМІКИ БІЗНЕС-СТРУКТУР В КОНТУРАХ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ

У статті здійснено модельну формалізацію групової динаміки бізнес-структур у контурах адаптивного управління та стратегічного адміністрування під впливом інтенсифікації екзогенної ентропії середовища. Методологічний базис дослідження сформовано на основі апарату нелінійних рівнянь Лотки-Вольтерри, інструментів фазового аналізу та системної кібернетики. Наукова новизна отриманих результатів полягає в оригінальній дискретизації часу моделі з урахуванням управлінських лагів та формалізації коефіцієнтів міжгрупового тиску на основі закону Вебера–Фехнера. Виділено інтегральний показник розвитку екосистем через ендогенний потенціал зростання та динамічні ваги. Здійснено аналіз локальної стійкості стаціонарних точок системи, що дозволило класифікувати сценарії втрати стабільності через виникнення автоколивань у результаті бифуркації Андронова-Хопфа та транзит до детермінованого хаосу. Практичне значення полягає у предиктивному адмініструванні ризиків в умовах гібридних викликів.

Ключові слова: модель Лотки-Вольтерра, дискретна динаміка, бифуркація, ентропія середовища, закон Вебера-Фехнера, бізнес-структури, управлінські лаги, детермінований хаос, групова динаміка

Формл. 8. Літ. 17.

DOI: 10.32752/1993-6788-2026-1-298-615-625

¹ <https://orcid.org/0000-0002-7882-4523>

² <https://orcid.org/0009-0005-3875-1111>

Tetiana Grynko, Serhii Dulieпов

MODEL FORMALIZATION OF BUSINESS STRUCTURES GROUP DYNAMICS WITHIN ADAPTIVE MANAGEMENT LOOPS

The article substantiates a model formalization of business structures group dynamics within the frameworks of adaptive management and strategic administration under the pressure of intensifying exogenous environmental entropy. The methodological core of the research is built upon the adaptation of the non-linear Lotka-Volterra differential equations, phase space analysis, and cybernetic systems theory. The scientific novelty of the developed approach lies in the original time-discretization of the model, which accounts for inherent operational lags, and the formalization of inter-group pressure coefficients based on the Weber–Fechner psychophysical law. These dynamic functions reflect the complexity gap between external market chaos and the internal regulatory diversity of the management loop. The study incorporates a modernized integral development indicator computed via dynamic, entropy-dependent weights and endogenous growth potential. A comprehensive analytical investigation of the local asymptotic stability of the system's stationary points was conducted. This mathematical modeling successfully classified distinct scenarios of stability loss, including divergent actor displacement, non-linear oscillations via the Andronov-Hopf bifurcation, and a total transition into deterministic chaos. The practical significance of the findings lies in providing a predictive administration framework to monitor systemic degradation risks under hybrid threats.

Keywords: Lotka-Volterra model, discrete dynamics, bifurcation, environmental entropy, Weber-Fechner law, business structures, management lags, deterministic chaos, group dynamics

Peer-reviewed, approved and placed: 18.04.2026

¹ Oles Honchar Dnipro National University, Ukraine.

² Oles Honchar Dnipro National University, Ukraine.

Постановка проблеми. Сучасний етап еволюції глобального та вітчизняного економічного простору характеризується поглибленням стану перманентної турбулентності, що концептуалізується через парадигму VANI-світу [1]. У цих умовах мінливість бізнес-середовища набуває екстремального, нелінійного характеру, супроводжуючись різкими флуктуаціями ресурсних потоків, безпековими шоками та форсованою цифровізацією.

Класичні дослідження [2] доводять існування «розриву складності» та дозволяють обґрунтувати припущення, щодо індивідуальної стійкості бізнес-структур. При цьому в реальних ринкових умовах жодна організація не розвивається у вакуумі. Мінливість екзогенного середовища діє не лише на окремого суб'єкта, а й радикально трансформує архітектуру та траєкторії процесів розвитку складних багатокомпонентних бізнес-структур у їхній груповій динаміці.

У кібернетичному вимірі процеси розвитку груп бізнес-структур є результатом нелінійної взаємодії багатьох контурів зворотного зв'язку. При цьому закон необхідної різноманітності В. Ешбі [3] вказує, що для забезпечення тривалого життєздатного розвитку в мінливому середовищі система повинна безперервно нарощувати свою внутрішню складність. Коли темпи екзогенних змін зростають, традиційні імперативи розвитку (такі як масштабування, експансія чи оптимізація) починають залежати від характеру міжорганізаційних взаємозв'язків – від чистої конкуренції за обмежену місткість ринку до мутуалістичного симбіозу в межах цифрових платформ та екосистем.

Класичні підходи до моделювання групової динаміки розглядають процеси розвитку або як ізольовані лінійні тренди, або як статичні стани рівноваги (наприклад, у концепціях екологічних ніш чи кластерів) [4], де коефіцієнти взаємодії компаній є незмінними, часто використовуються в сучасних дослідженнях [5]. Насправді ж, під тиском мінливого середовища, самі процеси розвитку та інтенсивність взаємовпливу структур перетворюються на динамічні функції від накопиченої ентропії.

Математичним базисом для відображення таких еволюційних процесів може виступати конкурентна модель Лотки-Вольтерри [6] або її модифікації [7]. Проте її класичне застосування у вигляді неперервних диференціальних рівнянь ігнорує дискретну природу прийняття рішень та інформаційні лаги, що в умовах нестабільності веде до викривлених висновків про «хибну стабільність» ринку. Відтак, постає об'єктивна наукова потреба у розробці та обґрунтуванні дискретного математичного інструментарію, який дозволяє формалізувати процеси розвитку та групову динаміку бізнес-структур як функцію від параметрів мінливості середовища, ідентифікуючи умови збереження коаліційної стійкості та точки переходу системи до детермінованого хаосу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання математичного моделювання міжорганізаційної взаємодії та еволюції складних систем тривалий час перебуває у фокусі кібернетичних та економічних досліджень. Фундаментальні засади аналізу групової динаміки через концепцію ринкових ніш та системних взаємозв'язків закладено в теорії організаційної екології

М. Хеннана та Дж. Фрімана [8], а також у кластерній парадигмі М. Портера [4]. У цих працях еволюційні процеси груп компаній розглядаються переважно у статичному інституційному контексті, де адаптивні коефіцієнти вважаються незмінними.

Застосування нелінійного апарату біологічної кібернетики, зокрема рівнянь Лотки–Вольтерри, для моделювання економічних процесів отримало суттєвий поштовх у працях Дж. Біші, К. Чіарелли та М. Копеля, які довели схильність олігополістичних ринків та взаємодіючих груп фірм до утворення складних нелінійних коливань і точок біфуркації [9].

Питання інформаційного навантаження на економічні системи та оцінки їхніх адаптивних спроможностей через термодинамічні аналогії та ентропійні баланси досліджувалися в межах концепцій керованої самоорганізації в роботі М. Прокопенка [10].

Сучасний етап розвитку наукової думки демонструє чіткий тренд на адаптацію моделювання групової динаміки бізнес-структур до високотехнологічних і мінливих бізнес-ландшафтів.

Так, у дослідженні Р. Іванова та Н. Максишко [11] розвинено теорію динамічних систем та запропоновано числовий метод розв'язання задачі оцінки результатів взаємодії між банками та страховими компаніями на основі системи диференціальних рівнянь. Розглянуто адитивний та мультиплікативний типи взаємодії, що дозволило дослідити та проаналізувати групову динаміку для різних варіантів впливу діяльності досліджуваних суб'єктів.

У дослідженні Б.Ши, У. Лі, Т. Ляна та ін. [12] за допомогою модифікованих рівнянь Лотки–Вольтерри було успішно формалізовано процеси коеволуції складних сервісних екосистем під впливом зовнішніх технологічних чинників.

Водночас у науковому дослідженні У. Озділека [13] модель Лотки–Вольтерри поєднується з ентропійно-максимізуючими моделями (зокрема, теорією просторової гравітації Вільсона), що дозволяє використовувати цей апарат при враховуванні просторової зв'язності і ресурсних обмежень середовища при прогнозуванні групових траєкторій.

Крім того, в статті О. Михайловської, О. Ляшенко [14] представлено модель взаємодії трьох типів агентів: стратегічних реформаторів, інерційних акторів та кооператорів у контексті інституційної стійкості. Методологічний базис дослідження сформовано на основі модифікованого апарату нелінійних рівнянь Лотки–Вольтерри, інструментарію фазового аналізу, а також концептуальних положень системної динаміки у поєднанні з порівняльним моделюванням адаптивних реакцій та оцінюванням інституційної резильєнтності. У межах моделювання ідентифіковано критичні зони вразливості, за якими руйнуються архітектоніка кооперації, та розраховано біфуркаційні пороги інституційного стимулювання, необхідні для утримання групової стійкості.

Проте, попри значний масив наукових результатів, існуючі моделі групової динаміки зберігають вагоме обмеження. Адже вони часто розглядають коефіцієнти внутрішньогрупової взаємодії як детерміновані константи. Питання про те, як саме екзогенна мінливість середовища та

інформаційні лаги в контурах управління трансформують параметри конкуренції чи симбіозу бізнес-структур, перетворюючи їх на динамічні функції від накопиченої ентропії, залишається методологічно нерозв'язаним. Це актуалізує потребу в переході від неперервних до нелінійних дискретних моделей групового розвитку.

Метою дослідження є математична формалізація та обґрунтування нелінійного дискретного інструментарію моделювання процесів розвитку та групової динаміки бізнес-структур, який інтегрує кібернетичні закони адаптації у систему різницевих рівнянь типу Лотки-Вольтерри, що дозволяє ідентифікувати критичні параметри збереження коаліційної стійкості міжорганізаційних систем під впливом мінливості екзогенного середовища.

Основні результати дослідження. Перехід від індивідуальної траєкторії стійкості окремого економічного суб'єкта до моделювання процесів розвитку груп бізнес-структур вимагає принципової зміни модельного базису. Якщо внутрішня динаміка ізольованого економічного суб'єкту адекватно описується нелінійним логістичним рівнянням [15], то її інтеграція у міжорганізаційне середовище породжує ефекти коеволуції. Одним з найбільш релевантних аналітичних інструментів для відображення таких процесів є апарат звичайних диференціальних рівнянь [11].

Розглянемо процес взаємодії двох бізнес-структур (двох груп), для яких $N_1(t)$; $N_2(t)$ – інтегральні показники рівня розвитку бізнес-структур (консолідований капітал, частка ринку або когнітивний потенціал бізнес-структури), відповідно.

На відміну від традиційних економічних моделей, які часто ґрашають лінійністю, модель Лотки-Вольтерри базується на перехресних множниках типу $N_1(t) \cdot N_2(t)$, що дозволяє математично описати ефект синергії або, навпаки, взаємного тиску. У цьому випадку швидкість розвитку однієї групи бізнесу прямо залежить від частоти та щільності її контактів із іншою групою, що можна відобразити у неперервному вигляді розширеної моделі Лотки-Вольтерри [7]:

$$\begin{cases} \frac{dN_1(t)}{dt} = r_1 \cdot N_1(t) \cdot \left(1 - \frac{N_1(t)}{K_1} - a_{12} \frac{N_2(t)}{K_1} \right) \\ \frac{dN_2(t)}{dt} = r_2 \cdot N_2(t) \cdot \left(1 - \frac{N_2(t)}{K_2} - a_{21} \frac{N_1(t)}{K_2} \right) \end{cases} \quad (1)$$

де r_i – ендегенний потенціал зростання i -ї групи; K_i – гранична ємність ринкової ніші для відповідної групи; a_{ij} – коефіцієнт міжгрупової взаємодії, що відображає ступінь впливу j -ї групи на процеси розвитку i -ї групи.

Так, перше рівняння системи (1) відображає швидкість $(dN_1(t))/dt$ зміни стану першої групи бізнес-структур у неперервному часі. Процес розвитку складається з двох елементів.

Перший відображає додатну емпіричну акселерацію $r_1 \cdot N_1(t)$, яка визначає потенціал автономного експоненційного зростання (чим вища внутрішня ефективність r_1 і поточні масштаби групи $N_1(t)$, тим швидше вона розвивається). Це класичний «ефект масштабу» або саморепродукування.

Другий є узагальненим контуром від'ємного зворотного зв'язку, який відображає механізм гальмування росту, що складається з двох чинників:

$$\left(-r_1 \cdot \frac{N_1^2}{K_1}\right)$$

внутрішньогрупова конкуренція (ефект Ферхюльста) відображає затухання росту через самообмеження: дефіцит власних ресурсів, перенасичення власної ніші тощо;

$$\left(-r_1 \cdot a_{12} \cdot \frac{N_1(t)N_2(t)}{K_1}\right)$$

міжгруповий пресинг (ефект Лотки–Вольтерри) описує, яку частку місткості ринку першої групи «з'їдає» друга група. Коефіцієнт a_{12} є масштабатором, який показує, скільки одиниць ресурсу першої групи споживає одна одиниця потенціалу другої групи.

Аналогічні властивості, з відповідним відображенням зв'язків, описує також друге рівняння системи (1), яке описує динаміку швидкості зміни стану другої групи бізнес-структур у неперервному часі.

Особливість запропонованого підходу полягає в тому, що коефіцієнти взаємодії a_{ij} (їх кількісні та якісні характеристики) можуть трансформуватись під впливом мінливості екзогенного середовища та рівня накопиченої інформаційної ентропії.

Так, залежно від знаків та динаміки цих коефіцієнтів, процеси розвитку груп бізнес-структур можуть набувати трьох базових режимів:

- режим чистої конкуренції $a_{12} > 0$; $a_{12} > 0$: групи бізнес-структур ведуть агресивну боротьбу за обмежений платоспроможний попит або інвестиційні ресурси. Зростання мінливості середовища змушує фірми витратити негентропійний потенціал на конкурентне протистояння;

- режим мутуалістичного симбіозу $a_{12} < 0$; $a_{12} < 0$: розвиток однієї групи розширює інформаційний «горизонт видимості» і піднімає ефективну місткість ринку для іншої групи, що знижує загальну ентропію системи (характерний для сучасних цифрових платформ та мережевих екосистем);

- асиметричний режим «платформа–агент» $a_{12} < 0$; $a_{12} > 0$ або $a_{12} < 0$; $a_{12} < 0$: аналог системи «хижак–жертва», де велика одна група масштабує свій розвиток за рахунок поглинання ресурсів та експлуатації іншої.

Проте неперервний час у диференціальних рівняннях ідеологічно часто суперечить реальній практиці менеджменту. Адже управлінські контури приймають рішення дискретно (кроками Δt , що відповідають звітним періодам: місяць, квартал, рік), а інформаційні лаги опрацювання сигналів створюють часові затримки.

Вводячи часовий лагу Δt та здійснюючи процедуру дискретизації системи (1) методом Ейлера з фіксованим кроком ітерації

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

отримуємо систему нелінійних різницевих рівнянь (ітераційних відображень):

$$\begin{cases} N_{1,t+1} = N_{1,t} + \Delta t \cdot r_1 \cdot N_{1,t} \cdot \left(1 - \frac{N_{1,t}}{K_1} - a_{12} \frac{N_{2,t}}{K_1}\right) \\ N_{2,t+1} = N_{2,t} + \Delta t \cdot r_2 \cdot N_{2,t} \cdot \left(1 - \frac{N_{2,t}}{K_2} - a_{21} \frac{N_{1,t}}{K_2}\right) \end{cases} \quad (2)$$

Система (2) описує стан системи на наступному кроці управління $t+1$ на основі даних поточного кроку t . Приймаючи $\Delta t = 1$, маємо

$$\begin{cases} N_{1,t+1} = N_{1,t} + r_1 \cdot N_{1,t} \cdot \left(1 - \frac{N_{1,t}}{K_1} - a_{12} \frac{N_{2,t}}{K_1}\right) \\ N_{2,t+1} = N_{2,t} + r_2 \cdot N_{2,t} \cdot \left(1 - \frac{N_{2,t}}{K_2} - a_{21} \frac{N_{1,t}}{K_2}\right) \end{cases} \quad (3)$$

Розглянемо зміст окремих рівнянь системи (3) на прикладі першого рівняння, розуміючи, що для другого рівняння цієї системи вони будуть аналогічні. Отже:

- $N_{1,t+1}$ – предиктивний показник розвитку на наступному кроці;
- $N_{1,t}$ – інерційне ядро системи, яке показує, що за відсутності будь-яких внутрішніх чи зовнішніх стимулів група просто копіює свій попередній стан;

$$r_1 \cdot N_{1,t} \cdot \left(1 - \frac{N_{1,t}}{K_1} - a_{12} \frac{N_{2,t}}{K_1}\right)$$

дискретний кроковий приріст.

Слід відзначити, що дискретна система (2) відкриває принципово нові можливості для аналізу стратегічної стійкості, оскільки, на відміну від неперервної моделі (де рівновага зазвичай є стабільною), дискретні відображення за певних умов схильні до генерації складних автоколивань та детермінованого хаосу.

Введемо позначення: $H_t(R_i)$ – ентропія регулятора i -ї бізнес-структури (різноманітність механізмів управління, накопичених у «сховищах» організації) на кроці t ; $H_t(D)$ – ентропія середовища функціонування бізнес-структур (різноманітність та частота збурювальних впливів) на кроці t .

Наголошуючи на можливості змінюваності r_i (ендогенний потенціал зростання i -ї групи) та a_{ij} (коефіцієнт міжгрупової взаємодії, що відображає ступінь впливу j -ї групи на процеси розвитку i -ї групи), відзначимо, що в умовах екстремальної мінливості середовища ці коефіцієнти взаємодії зазнають деформації через когнітивні обмеження менеджменту.

Використовуючи закон Вебера–Фехнера [16] в контурі сприйняття складності, можна стверджувати, що ця деморфация є логарифмічною, що дозволяє представити коефіцієнти ендогенного потенціалу та міжгрупової взаємодії у вигляді:

$$r_{i,t} = r_i^0 \cdot \left(1 + \ln \frac{H_t(R_i)}{H_t(D)}\right), \quad (4)$$

$$a_{ij,t} = a_{ij}^0 \cdot \left(1 + \ln \frac{H_t(D)}{H_t(R_i)}\right) \quad (5)$$

Формули (4), (5) динамізують статичні коефіцієнти, пов'язуючи їх з кібернетичним «розривом складності» [2].

При цьому $r_{i,t}$ та $a_{ij,t}$ перераховуються на кожному кроці; r_i^0 та a_{ij}^0 – відповідні базові коефіцієнти в ідеальних, абсолютно стабільних умовах.

Логарифмічний оператор Вебера–Фехнера (4), (5): $\ln \frac{H_t(R_i)}{H_t(D)}$; $\ln \frac{H_t(D)}{H_t(R_i)}$

відображають процес того, як управлінський контур реагує на зміну зовнішнього тиску не лінійно.

Зокрема, при адекватному реагуванні ($H_t(R_i) \geq H_t(D)$) ендегенний потенціал зростання i -ї групи збільшується, а негативний (позитивний) вплив міжгрупової взаємодії зменшується (збільшується). Тобто висока якість управління нівелює деструктивний вплив мінливості середовища, і група бізнес-структур розвивається стабільно.

У цей же час, якщо менеджмент компанії не нарощує власну цифрову та аналітичну складність, а мінливість середовища стрімко зростає ($H_t(D) \rightarrow \infty$), то відношення ($H_t(D)/H_t(R_i)$) різко збільшується. Як наслідок, значення логарифма зростає, мультиплікуючи базовий коефіцієнт a_{ij}^0 .

З економічної точки зору це означає, що через брак інформації та стрес управлінці починають припускатися помилок, сприймають дії партнерів як агресивні, і звичайна конкуренція або навіть нейтральне співіснування під дією ентропії нелінійно переростає в деструктивну фазу взаємного знищення суб'єктів.

Для дослідження фазового простору розроблених дискретних моделей (2), (3) необхідно насамперед знайти її стаціонарні точки (точки динамічної рівноваги), у яких показники розвитку груп бізнес-структур залишаються незмінними від ітерації до ітерації, тобто виконуються умови:

$$\begin{cases} N_{1,t+1} = N_{1,t} = N_1^* \\ N_{2,t+1} = N_{2,t} = N_2^* \end{cases} \quad (6)$$

Отже, з системи (2) випливає

$$\begin{cases} \Delta t \cdot r_1 \cdot N_{1,t} \cdot \left(1 - \frac{N_{1,t}}{K_1} - a_{12} \frac{N_{2,t}}{K_1}\right) = 0 \\ \Delta t \cdot r_2 \cdot N_{2,t} \cdot \left(1 - \frac{N_{2,t}}{K_2} - a_{21} \frac{N_{1,t}}{K_2}\right) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

Аналіз алгебраїчної системи (7) дозволяє встановити пошуку рівноважних станів (стаціонарні точки), кожна з яких має специфічну економіко-кібернетичну інтерпретацію.

Так, $(N_1^*; N_2^*) = (0; 0)$ є точкою повної деградації (тривіальна рівновага). Це стан, за якого обидві групи бізнес-структур повністю залишають ринок або ліквідуються.

У свою чергу, стани, при яких $(N_1^*; N_2^*) = (K_1; 0)$ або $(N_1^*; N_2^*) = (0; K_2)$ є точками монопольного домінування однієї з груп (одна з груп повністю освоює місткість ринку, тоді як інша група витісняється або поглинається).

Стан

$$(N_1^*; N_2^*) = \left(K_1 \cdot \frac{1 - a_{12} \cdot \left(\frac{K_2}{K_1}\right)}{1 - a_{12} \cdot a_{21}}; K_2 \cdot \frac{1 - a_{21} \cdot \left(\frac{K_1}{K_2}\right)}{1 - a_{12} \cdot a_{21}} \right) \quad (8)$$

можна охарактеризувати, як точку коеволуційного співіснування (внутрішня рівновага).

Аналіз стійкості знайдених точок рівноваги проводився за методом Ляпунова [17].

Було встановлено, що точка $(N_1^*; N_2^*) = (0; 0)$ завжди є нестійким вузлом. Це означає, що за наявності бодай мінімального початкового капіталу чи появи хоча б одного агента, система миттєво відштовхується від нульового стану і починає експоненційне зростання. Повне обнулення ринку є динамічно нестійким – економічний простір завжди прагне до заповнення.

Для точок монопольного домінування однієї з груп $((N_1^*; N_2^*) = (K_1; 0)$ або $(N_1^*; N_2^*) = (0; K_2)$) встановлено логічний результат, за яким одна з груп утримує стабільну монополію лише тоді, коли її бар'єр пресингу a_{ij} , $t \in$ вищим за критичний поріг прориву іншої групи. Якщо під впливом зовнішньої ентропії $H_t(D)$ якість менеджменту однієї з груп впаде, її здатність до опору зменшиться, що дозволить іншій групі зафіксувати монопольний стан як стійкий атрактор.

Стационарний стан (8) характеризує режим динамічного балансу, за якого обидві групи бізнес-структур одночасно функціонують у спільному ринковому просторі, адаптувавшись до пресингу ніші та взаємного впливу. Стійкість цієї точки визначається складною нелінійною залежністю від динамічних коефіцієнтів (5), що демонструє можливість виникнення декількох режимів.

Так, область асимптотичної стабільності формується, коли рівень зовнішньої ентропії середовища $H_t(D)$ є збалансованим, а управлінський контур володіє достатньою різноманітністю $H_t(R_i)$ для компенсації збурень. Тобто бізнес-структури успішно адаптуються до коливань фону, а після короточасних екзогенних шоків (наприклад, логістичних збоїв чи коливань попиту) траєкторія розвитку груп повертається до стаціонарних значень або асимптотично (вузол), або через серію затухаючих хвиль бізнес-активності (фокус).

Якщо групи функціонують у режимі жорсткої конкуренції, то під тиском зростання макроекономічної або безпекової нестабільності чисельник логарифмічної функції Вебера-Фехнера в (5) стрімко збільшується, а динамічні коефіцієнти взаємного тиску ($a_{12} > 0$; $a_{21} > 0$) нелінійно зростають. У цьому випадку точка (8) зазнає дивергентної біфуркації та перетворюється на нестійке сідло [17]. Стабільне співіснування стає неможливим. Система зазнає структурного зсуву: запускається процес агресивного витіснення, за

якого одна з груп повністю монополізує ринок, а інша – зазнає ентропійного руйнування та банкрутства.

Перехід до автоколивальних режимів (втрата стійкості за Хопфом [17]) спостерігається в екосистемах із мутуалістичною або асиметричною структурою зв'язків (наприклад, цифрова платформа та мережа її агентів). При досягненні критичного рівня «розриву складності», коли швидкість реакції менеджменту суттєво запізнюється порівняно з темпами змін середовища (високі значення параметрів (4)), відбувається дискретна біфуркація Андронова-Хопфа. Точка (8) повністю втрачає притягуючу здатність, а навколо неї у фазовому просторі народжується новий стійкий атрактор – інваріантна крива (граничний цикл). З цього моменту показники розвитку бізнес-структур переходять у режим незатухаючих періодичних або квазіперіодичних коливань. Ринок починає хронічно пульсувати, коли стадії бурхливого спільного зростання циклічно змінюються фазами скоординованого падіння.

Якщо ж зовнішній макроекономічний тиск продовжує посилюватися, а когнітивний поріг управління не дозволяє стабілізувати коефіцієнти взаємодії, система миттєво проходить через каскад подвоєння періоду коливань (сценарій Фейгенбаума) [2]. Траєкторія групового розвитку повністю втрачає циклічність і переходить у стан детермінованого хаосу. Будь-яке предиктивне планування для бізнес-структур втрачає сенс, оскільки мінімальна флуктуація на кроці t призводить до абсолютно непередбачуваних колосальних розривів у станах на кроці $t+1$. Співіснування перетворюється на турбулентне блукання, що сигналізує про передкризову деградацію всієї міжорганізаційної системи.

Висновки. Проведене дослідження дозволило сформувати основу для моделювання нелінійної коеволюції та процесів розвитку груп бізнес-структур в умовах інтенсифікації екзогенної ентропії. Перехід від неперервних диференціальних систем до дискретних відображень типу Лотки-Вольтерри дозволив адекватно відобразити реальну практику менеджменту, яка характеризується фіксованими кроками прийняття рішень та немінучими інформаційними лагами опрацювання сигналів середовища. Теоретично обґрунтовано та математично формалізовано динамічний характер коефіцієнтів міжгрупової взаємодії, які за допомогою закону Вебера–Фехнера було зв'язано з розривом складності між зовнішнім хаосом ринку та внутрішньою різноманітністю управлінського контуру.

Аналіз локальної стійкості стаціонарних точок системи продемонстрував, що траєкторія групового розвитку повністю детермінується інформаційним балансом системи. Математично доведено, що точка тривіальної деградації завжди є нестійким джерелом, тоді як стабільність монопольних станів та режиму коеволюційного співіснування критично залежить від біфуркаційних порогів, які долаються при зростанні зовнішніх шоків. Особливу цінність для теорії антикризового менеджменту має виявлений механізм ентропійної втрати стійкості, за якого перевищення когнітивного порогу управління трансформує стабільний гомеостаз або у режим дивергентного витіснення конкурентів, або у хронічні автоколивання через біфуркацію, або у стан непередбачуваного детермінованого хаосу.

Сконструйовані фазові портрети та симуляційні сценарії дають менеджменту змогу превентивно оцінювати ризики втрати міжорганізаційної довіри та руйнування архітектури цифрових платформ чи мережових екосистем ще до моменту настання незворотної фази деградації управління.

Перспективи подальших наукових розвідок безпосередньо пов'язані з масштабуванням розробленої моделі у напрямі розширення її розмірності, що дозволить перейти від аналізу ізольованих груп до предиктивного адміністрування складних багатокомпонентних екосистемних мереж.

1. Bushuyev S., Chumachenko I., Galkin A., Bushuiev D., Dotsenko N. Sustainable Development Projects Implementing in BANI Environment Based on AI Tools. Sustainability. 2025. Vol. 17. no. 6. pp. 2607. doi: 10.3390/su17062607

2. Beer S. The Viable System Model: Its Provenance, Development, Methodology and Pathology. Journal of the Operational Research Society. 1984. Vol. 35. no. (1). pp.7–25. doi: 10.1057/jors.1984.2

3. Ashby W. R. Design for a Brain: The Origin of Adaptive Behavior. Second edition. Chapman & Hall, 1960

4. Porter M. E. Location, competition, and economic development: Local clusters in a global economy. Economic Development Quarterly. 2000. Vol. 14. no.1. pp. 15–34. doi: 10.1177/089124240001400105

5. Deller S. Are we at an inflection point in community economic development? The 4th wave. Economic Development Quarterly. 2025. Vol. 39. no. 4. pp. 215–231. doi: 10.1177/08912424251339139

6. Eskandari Z., Avazzadeh Z., Khoshsiar Ghaziani R., Li B. Dynamics and bifurcations of a discrete-time Lotka–Volterra model using nonstandard finite difference discretization method. Math. Meth. Appl. Sci. 2025. Vol. 48. pp. 7197–7212. doi: 10.1002/mma.8859

7. Bonnard B., Rouot J. Feedback classification and optimal control with applications to the controlled Lotka–Volterra model. Optimization. 2025. Vol. 74. no. 5. pp. 1173–1196. doi: 10.1080/02331934.2024.2392209

8. Hannan M. T., Freeman J. Organizational ecology. Harvard university press, 1989

9. Bischi G. I., Chiarella C., Kopel M., Szidarovszky F. Nonlinear oligopolies. Berlin: Springer, 2010

10. Prokopenko M. (Ed.). Guided self-organization: Inception . Springer Science & Business Media, 2013

11. Ivanov R. V., Maksyshko N. K. Model Assessment of Interaction between Banking and Insurance Segments of the Financial Market. European Journal of Management Issues. 2021. Vol. 29. no. 2. pp. 101–108. doi: 10.15421/192110

12. Shi B., Li Y., Liang T., Sun X., Cui L., Zhang H., Yin Y. The Evolution of Service Ecosystems Based on the Lotka–Volterra Model. Applied Sciences. 2025. Vol. 15. no. 10. pp. 5403. doi: 10.3390/app15105403

13. Pzdilek B. Integrating Lotka–Volterra dynamics and gravity modeling for regional population forecasting. Frontiers in Built Environment. 2025. Vol. 11. pp. 1469890. doi:10.3389/fbuil.2025.1469890

14. Mykhailovska O., Liashenko O. Behavioural Dynamics of Strategic Adaptation in Public Administration under Hybrid Challenges. Problems of Modern Transformations. Series: Economics and Management. 2026. no. 24. doi: 10.54929/2786-5738-2026-24-02-01

15. Іванов Р. В. Двофакторна модель раціональної дохідної поведінки домогосподарства. Бізнес Інформ. 2015. № 2. С. 108–112.

16. Carr H. An interpretation of the Weber–Fechner law. Psychological Review. 1927. Vol. 34. no. 4. pp. 313–319.

17. Elaydi S. An introduction to difference equations. New York, NY: Springer New York, 2005

1. Bushuyev S., Chumachenko I., Galkin A., Bushuiev D., Dotsenko N. (2025). Sustainable Development Projects Implementing in BANI Environment Based on AI Tools. Sustainability, Vol. 17, no. 6, pp. 2607. doi: 10.3390/su17062607

2. Beer S. (1984). The Viable System Model: Its Provenance, Development, Methodology and Pathology. Journal of the Operational Research Society, Vol. 35, no. (1), pp.7–25. doi: 10.1057/jors.1984.2

3. Ashby W. R. *Design for a Brain: The Origin of Adaptive Behavior*. Second edition. Chapman & Hall, 1960
4. Porter M. E. (2000). Location, competition, and economic development: Local clusters in a global economy. *Economic Development Quarterly*, Vol. 14, no.1, pp. 15–34. doi: 10.1177/089124240001400105
5. Deller S. (2025). Are we at an inflection point in community economic development? The 4th wave. *Economic Development Quarterly*, Vol. 39, no. 4, pp. 215–231. doi: 10.1177/08912424251339139
6. Eskandari Z., Avazzadeh Z., Khoshsiar Ghaziani R., Li B. (2025). Dynamics and bifurcations of a discrete-time Lotka–Volterra model using nonstandard finite difference discretization method. *Math. Meth. Appl. Sci.*, Vol. 48, pp. 7197–7212. doi: 10.1002/mma.8859
7. Bonnard B., Rouot J. (2025). Feedback classification and optimal control with applications to the controlled Lotka–Volterra model. *Optimization*, Vol. 74, no. 5, pp. 1173–1196. doi: 10.1080/02331934.2024.2392209
8. Hannan M. T., Freeman J. *Organizational ecology*. Harvard university press, 1989
9. Bischi G. I., Chiarella C., Kopel M., Szidarovszky F. *Nonlinear oligopolies*. Berlin: Springer, 2010
10. Prokopenko M. (Ed.). *Guided self-organization: Inception*. Springer Science & Business Media, 2013
11. Ivanov R. V., Maksyshko N. K. (2021). Model Assessment of Interaction between Banking and Insurance Segments of the Financial Market. *European Journal of Management Issues*, Vol. 29. no. 2. pp. 101–108. doi: 10.15421/192110
12. Shi B., Li Y., Liang T., Sun X., Cui L., Zhang H., Yin Y. (2025). The Evolution of Service Ecosystems Based on the Lotka–Volterra Model. *Applied Sciences*, Vol. 15. no. 10. pp. 5403. doi: 10.3390/app15105403
13. Ilzdilek B. (2025). Integrating Lotka–Volterra dynamics and gravity modeling for regional population forecasting. *Frontiers in Built Environment*, Vol. 11. pp. 1469890. doi:10.3389/fbuil.2025.1469890
14. Mykhailovska O., Liashenko O. (2026). Behavioural Dynamics of Strategic Adaptation in Public Administration under Hybrid Challenges. *Problems of Modern Transformations. Series: Economics and Management*. no. 24. doi: 10.54929/2786-5738-2026-24-02-01
15. Ivanov, R. V. (2015). Dvofaktorna model ratsionalnoi dokhidnoi povedinky domohospodarstva [Two-factor model of rational household income behavior]. *Business Inform*, no. 2, pp.108–112.
16. Carr H. (1927). An interpretation of the Weber-Fechner law. *Psychological Review*, Vol. 34, no. 4, pp. 313–319.
17. Elaydi S. *An introduction to difference equations*. New York, NY: Springer New York, 2005