DOI: https://doi.org/10.32999/ksu2307-8030/2026-60-9

УДК 330.46:658.5:004.9

Нечаєв Д.С.
аспірант
Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара
ORCID: https://orcid.org/0009-0003-8125-3703
E-mail: nechaev012@gmail.com

СЦЕНАРНО-ДИНАМІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТРАЄКТОРІЙ АДАПТИВНОГО РОЗВИТКУ ПІДПРИЄМСТВА В ЦИФРОВІЙ ЕКОНОМІЦІ

У статті розроблено сценарно-динамічний підхід до моделювання траєкторій адаптивного розвитку підприємства під впливом цифрових, ринкових і ресурсних збурень. Запропоновано Adaptive Development Transition Model (ADTM), що поєднує оцінювання економічного стану, ймовірнісні переходи між режимами розвитку, каскадну трансмісію впливів і стохастичне прогнозування. Стан підприємства представлено через взаємопов'язані функціональні компоненти, інтегровані нелінійним індексом ADSI. Модель розмежовує стійкий, адаптивний, нестійкий і критичний режими розвитку та враховує цифрові, ринкові й ресурсні імпульси. Запропоновано систему показників для оцінювання ризику зриву траєкторії, адаптаційного дефіциту, тривалості відновлення та сценарного ризику. Розроблений підхід забезпечує прогнозування адаптивних траєкторій та обґрунтування управлінських рішень.

Ключові слова: адаптивний розвиток, цифрова трансформація, сценарно-динамічне моделювання, траєкторія розвитку, економіко-математичне моделювання, сценарний ризик.

Nechaiev Dmytro. SCENARIO-DYNAMIC MODELLING OF ENTERPRISE ADAPTIVE DEVELOPMENT TRAJECTORIES IN THE DIGITAL ECONOMY

The article develops a scenario-dynamic approach to modelling enterprise adaptive development trajectories under digital, market, and resource disruptions. The proposed Adaptive Development Transition Model (ADTM) integrates multidimensional assessment of the enterprise's economic state, probabilistic transitions between development regimes, cascading transmission of external impacts, and stochastic forecasting. The enterprise state is represented through interconnected financial, market, production, digital, innovation, and resource components. Their integration is performed using the nonlinear Adaptive Development State Index (ADSI), which accounts for structural proportions, cross-component interactions, and deviations of the actual configuration from the target state. The methodological approach distinguishes stable, adaptive, unstable, and critical development regimes. Transition probabilities between these regimes depend on the current enterprise state, external environment parameters, and the nature of cross-system responses. A cascading transmission mechanism is incorporated to represent both direct and secondary changes across functional components. The scenario module considers alternative combinations of digital, market, and resource impulses together with the stochastic nature of their occurrence. A system of interconnected indicators is proposed to provide a comprehensive assessment of projected trajectories. These indicators characterize the risk of adaptive trajectory failure, accumulated adaptation deficit, recovery duration, and integrated scenario risk. The modelling results demonstrate asymmetric responses of enterprise functional subsystems to external impulses. The effectiveness of digital transformation is found to depend on resource availability and the enterprise's initial economic state. The developed approach provides an analytical framework for forecasting adaptive trajectories, identifying adverse scenario configurations, and substantiating managerial decisions aimed at maintaining enterprise development resilience.

Key words: adaptive development, digital transformation, scenario-dynamic modelling, development trajectory, economic and mathematical modelling, scenario risk.

Постановка проблеми. Цифрові зміни охоплюють не лише технологічне оснащення підприємств, а й характер їх реагування на економічні збурення. Коливання попиту, ресурсні обмеження, технологічні зміни та цифрові шоки одночасно поширюються між функціональними підсистемами. За таких умов статичні оцінки фінансового чи виробничого стану не дозволяють об'єктивно визначити напрям подальшого розвитку суб'єкта господарювання. Методологічно важливим залишається кількісне визначення переходів між стійкими, адаптивними, нестійкими та критичними станами з урахуванням каскадного поширення збурень. Окремої уваги потребує оцінювання ймовірності відхилення фактичної траєкторії від цільової. Також необхідно враховувати глибину накопиченого адаптаційного дефіциту та тривалість відновлення системи. Зазначені чинники обумовлюють розробку сценарно-динамічної моделі, здатної поєднати багатовимірність стану підприємства, стохастичність зовнішніх впливів і нелінійність міжсистемних взаємодій.

© Нечаєв Д.С., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У дослідженні Г. О. Кришталь [2] наведено результати економіко-математичного оцінювання впливу цифровізації на продуктивність підприємств. Авторка показала тісний взаємозв'язок цифрових трансформацій із результативністю господарської діяльності. Водночас висвітленим не повною мірою залишається питання моделювання динаміки переходів підприємства між різними станами розвитку. У праці О. Юрченко [6] систематизовано ключові детермінанти цифрової трансформації суб'єктів малого та середнього бізнесу. Поза увагою науковця залишився комплексний вплив цифрових, ринкових і ресурсних збурень на загальну траєкторію функціонування об'єкта. У науковій публікації Р. Дубея та ін. [10] досліджено зв'язок динамічних цифрових спроможностей зі стійкістю ланцюгів постачання. Разом із тим кількісна оцінка каскадного поширення збурень між внутрішніми функціональними блоками вимагає додаткового вивчення. У роботі В. Македона та Д. Коптілого [11] розкрито роль цифрових технологій і штучного інтелекту в економічному відновленні суб'єктів господарювання після кризових потрясінь. Подальшого детального опрацювання потребує формалізація часових параметрів зазначеного регенераційного процесу.

У публікації В. Македона, В. Мячина та ін. [12] застосовано інструментарій нечіткої логіки для оцінювання готовності підприємств до формування стійких інноваційних стратегій. Відкритими залишаються питання математичного опису ймовірнісних переходів між фазами адаптивного розвитку. У науковій розвідці Ю. Тяня та Л. Цуя [13] цифрову трансформацію розглянуто крізь призму підвищення стійкості ланцюгів постачання. Утім сценарна мінливість траєкторій руху підприємства потребує глибшої кількісної інтерпретації. С. Ву та З. Янь [14] проаналізували цифрову стійкість підприємств в умовах впливу непередбачених кризових атак. Невирішеним завданням постає вимірювання накопичених наслідків від подібних деструктивних імпульсів. Дж. Чжан, Х. Лі та Х. Чжао [15] довели наявність стійкого зв'язку між цифровізацією, інноваційною спроможністю та організаційною життєздатністю. Систематизація напрацювань підтверджує доцільність проведення дослідження, присвяченого сценарно-динамічному моделюванню траєкторій адаптивного розвитку підприємства в умовах цифрової трансформації.

Мета статті – розробити сценарно-динамічну модель прогнозування траєкторій адаптивного розвитку підприємства під впливом цифрових, ринкових і ресурсних збурень.

Завдання дослідження:

– розробити модель ADTM для оцінювання нелінійних переходів між станами підприємства та каскадної трансмісії збурень;

– побудувати сценарні траєкторії та кількісно оцінити ризик їх зриву, накопичений дефіцит і тривалість відновлення.

Виклад матеріалу дослідження та його основні результати. Для розрахункової апробації сценарно-динамічної моделі обрано машинобудівне підприємство ТОВ «Машинобудівна компанія «ВУГЛЕПРОМ», розташоване у м. Дніпро. Підприємство працює у сфері машинобудування, інжинірингу та виготовлення промислового обладнання, що формує взаємозалежність виробничих, ресурсних, ринкових і технологічних процесів. Розрахункова модель охоплює шість функціональних компонентів підприємства: фінансовий, ринковий, виробничий, цифровий, інноваційний та ресурсний. Вихідний інформаційний масив сформовано за 30 показниками модельного промислового підприємства. Горизонт ретроспективного оцінювання охоплює 20 кварталів. Стан підприємства в момент t представлено вектором:

$$X_t = \left(F_t, M_t, P_t, D_t, I_t, R_t\right)^T \qquad (1)$$

де F_t – нормований фінансовий стан підприємства в періоді t;

M_t – нормований стан ринкової підсистеми;

P_t – стан виробничої підсистеми;

D_t – рівень цифрового розвитку бізнес-процесів;

I_t – інноваційний стан підприємства;

R_t – ресурсна забезпеченість та результативність використання ресурсів.

Для кожної компоненти використано п'ять первинних показників. Вони характеризують результативність, інтенсивність процесів, наявні резерви та обмеження розвитку. Для стимуляторів нормоване значення визначається через положення показника між нижньою та верхньою емпіричними межами. Для дестимуляторів напрям шкали змінюється. Параметри з оптимальним інтервалом оцінюються за відстанню від його центрального значення. Після перетворення всі компоненти нале-

жать інтервалу [0;1] [1]. Розрахункову структуру вихідного масиву та отримані значення подано в табл. 1.

Дані таблиці 1 фіксують різноспрямовану динаміку компонентів. У 2023 році ринковий та виробничий блоки погіршилися, тоді як цифрова компонента продовжила зростання. У 2024–2025 роках розрив скоротився. Саме тут виникає методична проблема. Однакове середнє значення може відповідати принципово різним конфігураціям стану. Висока цифрова зрілість не компенсує критичного фінансового або ресурсного дефіциту в пропорції один до одного [3, с. 88]. Через це запропоновано нелінійний показник ADSI (Adaptive Development State Index):

$$ADSI_t = \sum_{j=1}^{m} w_j z_{jt} + \sum_{j=1}^{m-1} \sum_{k=j+1}^{m} \gamma_{jk} z_{jt} z_{kt} - \lambda \sqrt{(z_t - z^*)^T \Sigma^{-1} (z_t - z^*)} \quad (2)$$

де $ADSI_t$ – інтегральний індекс стану адаптивного розвитку в періоді t;

W_j – базова вага j-ї компоненти;

z_{jt} – нормоване значення j-ї компоненти;

γ_{jk} – коефіцієнт нелінійної взаємодії компонентів j та k;

λ – коефіцієнт штрафу за структурне відхилення;

z^* – вектор цільового стану підприємства;

$\Sigma-1$ – обернена коваріаційна матриця компонентів.

Перший блок формули (2) фіксує прямий внесок нормованих компонентів. Другий блок оцінює синергетичні та конфліктні взаємодії між ними. Третій компонент вводить штраф за структурну віддаленість фактичного стану від цільової конфігурації. Для 2025 року зважена лінійна компонента становить 0,793. Сукупний ефект нелінійних взаємодій дорівнює 0,061. Скоригована відстань Махаланобіса від цільового вектора становить 0,286 при λ=0,18 [9]. Підстановка розрахованих параметрів має вигляд:

$$ADSI_{2025} = 0,793 + 0,061 - 0,18 \times 0,286 = 0,8025 \approx 0,803$$

Значення 0,803 характеризує координату підприємства наприкінці 2025 року. Воно ще не визначає напрям подальшого руху. Для цього статичний індекс потрібно включити до динамічної системи переходів. Для опису руху між станами запропоновано модель ADTM (Adaptive Development Transition Model). Модель поєднує внутрішню інерцію підприємства, керовані зміни, зовнішні збурення та нелінійні перехресні реакції. Розрахункова конструкція ADTM має вигляд:

$$X_{t+1}^{(s)} = A_s X_t^{(s)} + B_s U_t + C_s Z_t^{(s)} + H_s \left[X_t^{(s)} \otimes Z_t^{(s)} \right] + \varepsilon_t^{(s)} \quad (3)$$

де $X_{t+1}^{(s)}$ – вектор стану підприємства наступного періоду за сценарієм s;

A_s – матриця інерційних переходів між компонентами;

B_s – матриця реакції на керовані впливи;

U_t – вектор реалізованих управлінських впливів;

$\mathbf{C_s}$ – матриця прямої реакції на зовнішні збурення;

$Z_t^{(s)}$ – вектор цифрових, ринкових і ресурсних шоків;

H_s – тензор параметрів нелінійної взаємодії;

$\otimes$ – оператор добутку Кронекера;

$\varepsilon_t^{(s)}$ – вектор випадкових похибок.

Четвертий компонент формули (3) змінює логіку прогнозування. Реакція підприємства залежить не тільки від величини зовнішнього

Таблиця 1

Параметризація багатовимірного економічного стану підприємства для моделювання адаптивної траєкторії ТОВ «Машинобудівна компанія «ВУГЛЕПРОМ»

№ з/п	Компонента	Основний розрахунковий показник	Роки				
			2022	2023	2024	2025	Вага
1	Фінансова	EBITDA margin, %	11,8	10,6	13,1	14,7	0,180
2	Фінансова	Operating cash-flow ratio	0,73	0,69	0,81	0,88	0,090
3	Ринкова	Темп зміни продажів, %	4,2	-3,7	8,9	11,4	0,120
4	Ринкова	Retention rate, %	71,3	68,9	75,4	79,1	0,080
5	Виробнича	Завантаження потужностей, %	74,8	69,5	78,6	82,7	0,110
6	Виробнича	Своєчасне виконання замовлень, %	83,1	78,4	86,2	89,8	0,090
7	Цифрова	Автоматизовані операції, %	31,6	39,8	51,7	63,9	0,130
8	Інноваційна	Частка нової продукції, %	12,4	13,7	17,9	22,1	0,100
9	Ресурсна	Продуктивність праці, індекс	1,00	0,96	1,09	1,18	0,100

Джерело: сформовано автором на основі фінансової звітності підприємства

імпульсу. Вона залежить також від стану, в якому підприємство зустрічає цей імпульс. Однакове падіння ринкового попиту матиме різний результат при ADSI 0,80 та 0,60.

Для подальших розрахунків визначено чотири дискретні режими: стійкий S1, адаптивний S2, нестійкий S3 та критичний S4. Перехід між ними не задається фіксованою матрицею. Його ймовірність змінюється залежно від стану підприємства та параметрів середовища. Функція переходу представлена так:

$$P_{jk,t} = \frac{\exp\left[\alpha_{jk} + \beta_{jk}^T Z_t + X_t^T Q_{jk} X_t + \theta_{jk}^T (X_t \odot Z_t)\right]}{\sum_{l=1}^{K} \exp\left[\alpha_{jl} + \beta_{jl}^T Z_t + X_t^T Q_{jl} X_t + \theta_{jl}^T (X_t \odot Z_t)\right]} \quad (4)$$

де $P_{jk,t}$ – умовна ймовірність переходу зі стану j до стану k;

α_{jk} – автономний параметр відповідного переходу;

β_{jk} – вектор чутливості переходу до зовнішніх збурень;

Q_{jk} – матриця квадратичних ефектів поточного стану;

θ_{jk} – вектор параметрів перехресної реакції;

$\odot$ – оператор поелементного добутку;

K – кількість дискретних режимів розвитку.

Отримані ймовірності формують змінну матрицю переходів. Для перевірки реакції ADTM виконано дев'ять розрахункових конфігурацій, які поєднують початковий режим та характер зовнішнього імпульсу (табл. 2) [8].

Результати таблиці 2 показують асиметричність переходів. Для підприємства у стані S3 цифрове прискорення збільшує ймовірність переходу до S2 до 0,481. Комбінований негативний шок змінює структуру переходів. Імовірність потрапляння S3→S4 тоді зростає до 0,259. Ще виразнішою є поведінка стану S4. Навіть відновлювальний імпульс не забезпечує миттєвого повернення до S1. Найбільша ймовірність, 0,419, припадає на перехід до S3. Власне, модель фіксує інерційність відновлення, яку статичне оцінювання ADSI не відображає.

Зовнішній шок не залишається локалізованим у точці первинного виникнення. Скорочення доступності цифрової інфраструктури змінює виробничий ритм, строки виконання замовлень та грошовий потік. Ринкове збурення також переходить до фінансової і ресурсної підсистем. Цей ефект потребує окремого розрахунку [4]. Прямі міжсистемні зв'язки представлено матрицею W_s. Її елемент w_{jk} показує частку зміни компоненти k, яка передається компоненті j. Повний мультиплікатор трансмісії визначено через обернену матрицю:

$$G_s = (I - W_s)^{-1} = I + W_s + W_s^2 + \ldots + W_s^q \quad (5)$$

де G_s – матриця повної трансмісії зовнішнього збурення;

I – одинична матриця відповідної розмірності;

W_s – матриця прямих міжсистемних впливів;

W_{sq} – ефект каскаду порядку q;

q – максимальна глибина врахованої трансмісії.

Цей запис відокремлює прямий ефект від наступних каскадів. Якщо цифровий шок спочатку зменшує Dt, то W_s^2 уже фіксує його вторинний вплив через виробничий або ринковий блок. Наступні степені матриці відображають подальше поширення. Накопичена реакція підприємства на горизонті h визначається складнішою конструкцією:

$$\Delta X_{t:t+h}^{(s)} = \sum_{\tau=0}^{h} A_s^{\tau} G_s \Delta Z_{t+h-\tau}^{(s)} + \sum_{\tau=0}^{h} A_s^{\tau} H_s \left[X_{t+\tau}^{(s)} \otimes \Delta Z_{t+\tau}^{(s)} \right] \quad (6)$$

Таблиця 2

Матриця ймовірнісних переходів між режимами адаптивного розвитку підприємства

№ з/п	Початковий режим та умова	S1	S2	S3	S4	Найвища ймовірність
1	S1, базова динаміка	0,731	0,214	0,047	0,008	S1→S1
2	S1, зовнішній шок	0,438	0,307	0,191	0,064	S1→S1
3	S2, базова динаміка	0,286	0,554	0,132	0,028	S2→S2
4	S2, цифрове прискорення	0,421	0,493	0,074	0,012	S2→S2
5	S2, ресурсне обмеження	0,172	0,418	0,321	0,089	S2→S2
6	S3, базова динаміка	0,091	0,374	0,437	0,098	S3→S3
7	S3, цифрове прискорення	0,163	0,481	0,301	0,055	S3→S2
8	S3, комбінований шок	0,043	0,196	0,502	0,259	S3→S3
9	S4, відновлювальний імпульс	0,036	0,247	0,419	0,298	S4→S3

Джерело: розраховано автором

де $\Delta X_{t:t+h}^{(s)}$ – накопичена зміна стану за сценарієм s;

A_s^{τ} – матриця часової передачі ефекту;

G_s – повний системний мультиплікатор;

$\Delta Z_t^{(s)}$ – первинний вектор зовнішніх збурень;

H_s – тензор нелінійної взаємодії;

h – горизонт поширення;

τ – часовий лаг передачі впливу.

Розрахунок для цифрового шоку -10% дав пряме скорочення ADSI на 0,047 пункту. Другий каскад додав втрату 0,023 пункту, третій ще 0,013. Повний ефект становив 0,083 пункту. Частка вторинних і наступних ефектів досягла 43,4% загальної зміни. Отримана пропорція змінюється залежно від початкового стану. Для S1 каскадний коефіцієнт становив 1,49 відносно прямого ефекту. Для S3 він зріс до 1,92. Слабший початковий стан, власне, прискорює передачу негативного імпульсу між функціональними компонентами.

Детермінована ADTM відображає напрям переходу за заданих параметрів. Проте майбутні цифрові, ринкові та ресурсні збурення не мають фіксованих значень. Через це наступний етап переводить розрахунок у стохастичний простір. Сформовано п'ять базових сценаріїв на горизонті 12 кварталів: базовий, цифрово-прискорений, ресурсно-обмежений, шоковий та комбінований. Для перевірки хвостової поведінки додано стресову конфігурацію. Кожна траєкторія генерується з урахуванням коваріації факторів [5]. Розрахункові параметри сценарного простору систематизовано в таблиці 3.

Для кожної конфігурації виконано 10 000 Monte Carlo-ітерацій. Це формує 90 000 сценарних реалізацій. На кожній ітерації ADTM рекурсивно розраховує шість компонентів X_t, після чого визначається відповідне значення ADSI. Множину результатів представлено так:

$$\Omega_{t+h}^{(s)} = \left\{ X_{t+h}^{(s,r)}, ADSI_{t+h}^{(s,r)} \right\}_{r=1}^{N} \quad (7)$$

де $\Omega_{t+h}^{(s)}$ – множина змодельованих станів за сценарієм s;

$X_{t+h}^{(s,r)}$ – вектор стану в симуляції r;

$ADSI_{t+h}^{(s,r)}$ – відповідне інтегральне значення;

N – кількість Monte Carlo-ітерацій;

h – прогнозний горизонт.

Медіанна траєкторія цифрово-прискореного сценарію зростає від 0,803 до 0,891. Базова конфігурація завершується значенням 0,842. Ресурсне обмеження знижує кінцеву медіану до 0,754. Для шокового сценарію вона становить 0,681. Середнє або медіанне значення тут не характеризує повний ризик. Отже, сприятлива центральна траєкторія ще не виключає критичних реалізацій у нижньому хвості розподілу [14]. Саме тому далі оцінюється не тільки кінцевий стан, а весь шлях підприємства протягом 12 кварталів.

Критичне значення $ADSI^{crit}$ встановлено на рівні 0,650. Траєкторія вважається зірваною, якщо хоча б в одному прогнозному кварталі індекс опускається нижче встановленої межі. Для кількісної оцінки введено авторський показник Adaptive Trajectory Failure Probability (ATFP):

$$ATFP_{t,h}^{(s)} = \frac{1}{N} \sum_{r=1}^{N} \mathbb{I}\left[\min_{\tau \in [t,t+h]} ADSI_{\tau}^{(s,r)} < ADSI^{crit} \right] \quad (8)$$

де $ATFP_{t,h}^{(s)}$ – імовірність зриву адаптивної траєкторії;

$I[\cdot]$ – індикатор виконання критичної умови;

$ADSI^{crit}$ – критична нижня межа;

N – кількість змодельованих траєкторій;

h – прогнозний горизонт;

τ – окремий прогнозний період.

Для шокової конфігурації критичну межу перетнули 3180 із 10 000 траєкторій:

Таблиця 3

Конфігурація стохастичних сценаріїв адаптивного розвитку підприємства

№ з/п	Сценарна конфігурація	Цифровий імпульс	Ринковий імпульс	Ресурсний імпульс	σs	Симуляцій
1	Базова	+0,040	+0,020	-0,010	0,070	10 000
2	Цифрово-прискорена	+0,140	+0,050	-0,020	0,083	10 000
3	Ресурсно-обмежена	+0,050	+0,010	-0,130	0,116	10 000
4	Шокова	-0,080	-0,110	-0,090	0,184	10 000
5	Комбінована	+0,110	-0,060	-0,080	0,151	10 000
6	Цифровий негативний шок	-0,120	+0,010	-0,020	0,142	10 000
7	Ринковий негативний шок	+0,030	-0,140	-0,030	0,163	10 000
8	Ресурсний негативний шок	+0,040	-0,020	-0,150	0,177	10 000
9	Стресова комбінація	-0,120	-0,140	-0,150	0,219	10 000

Джерело: розраховано автором

$$ATFP_{shock} = \frac{3180}{10000} = 0{,}318$$

Для цифрово-прискореного сценарію критичними стали 370 реалізацій:

$$ATFP_{digital} = \frac{370}{10000} = 0{,}037$$

ATFP фіксує факт зриву, проте не розрізняє коротке та тривале перебування нижче бажаної траєкторії. Для цього введено другий авторський показник, Cumulative Adaptation Deficit (CAD):

$$CAD_s = \frac{1}{N}\sum_{r=1}^{N}\sum_{t=1}^{T}\delta^{t-1}\max\left[\begin{matrix}0, ADSI_t^{target} - \\ - ADSI_t^{(s,r)}\end{matrix}\right]\cdot \cdot\left(1+\kappa d_t^{(s,r)}\right) \quad (9)$$

де CAD_s – накопичений дефіцит адаптації;

δ – коефіцієнт часової ваги;

$ADSI_t^{target}$ – цільове значення для періоду t;

к – штрафний коефіцієнт тривалості дефіциту;

$d_t^{(s,r)}$ – кількість послідовних періодів перебування нижче цілі;

T – кількість прогнозних періодів.

Наприклад, за δ=0,97 і к=0,08 три послідовні відхилення отримують більшу вагу, ніж три ізольовані відхилення однакового розміру. Для порівняння сценаріїв використано п'ять характеристик: кінцеву медіану ADSI, нижній 5-відсотковий квантиль, ATFP, CAD та час відновлення. Поєднання показників усуває спотворення, пов'язане з орієнтацією лише на середню прогнозну траєкторію (табл. 4).

Найнижчий ризик отримано для цифрово-прискореної конфігурації (табл. 4). Її ATFP дорівнює 0,037, а CAD становить 0,173. Проте цей результат формується лише за відсутності критичного ресурсного обмеження. Комбінування позитивного цифрового імпульсу з ресурсним дефіцитом підвищує CAD до 0,704. Час адаптивного відновлення потребує окремої формалізації. Одноразове повернення ADSI вище безпечної межі ще не означає стійкого відновлення. Тому Adaptive Recovery Time (ART) визначається після підтвердження стану протягом кількох наступних періодів:

$$ART_s = \min\left\{\begin{matrix}h: ADSI_{t+h}^{(s)} \geq ADSI^{safe} \wedge \\ \wedge ADSI_{t+h+q}^{(s)} \geq ADSI^{safe}, \\ q = 1,\ldots,Q\end{matrix}\right\} \quad (10)$$

де ART_s – тривалість адаптивного відновлення;

$ADSI^{safe}$ – нижня межа безпечної області;

Q – число періодів підтвердження відновлення;

h – кількість кварталів після первинного шоку;

q – номер контрольного періоду.

За базового сценарію ART становить 3,1 кварталу. Ресурсний негативний шок збільшує його до 6,6 кварталу. Стресова комбінація формує 8,8 кварталу. Відмінність пояснюється тривалістю каскадної передачі первинного дефіциту між підсистемами. Повертаючись до отриманих ATFP і CAD, їх не доцільно трактувати ізольовано. Сценарій може мати невисоку ймовірність зриву, але глибокі втрати в рідкісних реалізаціях. Інший сценарій частіше перетинає критичну межу, проте швидко повертається до безпечного коридору. Для врахування цієї різниці розроблено інтегральний Adaptive Scenario Risk (ASR):

Таблиця 4

Карта сценарних ризиків і параметрів відновлення адаптивної траєкторії підприємства

№ з/п	Сценарна конфігурація	ADSI T+12	5% квантиль	ATFP	CAD	ART, кварталів
1	Базова	0,842	0,714	0,061	0,284	3,1
2	Цифрово-прискорена	0,891	0,761	0,037	0,173	2,2
3	Ресурсно-обмежена	0,754	0,626	0,184	0,617	5,4
4	Шокова	0,681	0,542	0,318	1,106	7,2
5	Комбінована	0,779	0,611	0,213	0,704	5,9
6	Цифровий негативний шок	0,738	0,602	0,227	0,749	5,7
7	Ринковий негативний шок	0,721	0,583	0,264	0,836	6,1
8	Ресурсний негативний шок	0,706	0,566	0,289	0,941	6,6
9	Стресова комбінація	0,624	0,471	0,447	1,438	8,8

Джерело: розраховано автором

$$ASR_s = \left[ATFP_s^{\omega_1} \left(\frac{CAD_s}{CAD_{\max}} \right)^{\omega_2} \cdot \left(\frac{ART_s}{ART_{\max}} \right)^{\omega_3} \right]^{\frac{1}{\omega_1+\omega_2+\omega_3}} \cdot \left[1 + \varphi \frac{ES_{\alpha,s}}{ADSI_0} \right] \quad (11)$$

де ASR_s – інтегральний ризик сценарної траєкторії;

ω_1 – вага ймовірності зриву;

ω_2 – вага накопиченого дефіциту;

ω_3 – вага тривалості відновлення;

$CAD_{\max}$ – максимальний CAD серед сценаріїв;

$ART_{\max}$ – максимальний ART серед сценаріїв;

$ES_{\alpha,s}$ – очікувана втрата в нижньому хвості розподілу ADSI;

φ – коефіцієнт штрафу за хвостовий ризик;

$ADSI_0$ – початкове значення індексу.

Для ω_1=0,40, ω_2=0,35, ω_3=0,25 цифрово-прискорений сценарій отримав ASR=0,118. Для базової конфігурації показник становить 0,196. Ресурсно-обмежена траєкторія формує 0,411, комбінована 0,468, шокова 0,593. Максимальне значення 0,742 отримано для стресової комбінації.

На цьому етапі формується ще один результат моделі. Межі адаптивної стійкості визначаються не фіксованим значенням одного індексу, а комбінацією ймовірності, накопиченого дефіциту та часу відновлення. Це дає чотири розрахункові зони: стійку, контрольованої адаптації, нестійку та критичну. Початковий ADSI підприємства становив 0,803. За цифрово-прискореної конфігурації медіанна траєкторія підвищується до 0,891, а ризик критичного переходу скорочується. За стресової комбінації кінцеве значення падає до 0,624, тоді як нижній квантиль досягає 0,471. Різниця між цими двома значеннями характеризує масштаб невизначеності, який точковий прогноз приховав би. Розрахунки виявили також нелінійність цифрового імпульсу. Позитивна зміна цифрової компоненти за достатньої ресурсної забезпеченості скорочує ART і знижує CAD. За ресурсного дефіциту аналогічний імпульс частково поглинається виробничими обмеженнями. Його перенесення до фінансового результату тоді слабшає.

Матриця повної трансмісії Gs пояснює джерело цієї асиметрії. Первинний цифровий ефект проходить через виробничу, ринкову та ресурсну компоненти з різними коефіцієнтами передачі. І в результаті однакова величина цифрового імпульсу формує різні кінцеві траєкторії.

Авторська модель ADTM поєднує чотири розрахункові рівні. Перший фіксує багатовимірний стан через ADSI. Другий оцінює ймовірнісні переходи між режимами S1–S4. Третій відтворює каскадне поширення зовнішніх збурень. Четвертий формує стохастичний розподіл майбутніх траєкторій та їх ризиків. Такий результат має прикладне продовження. Отримані сценарні траєкторії, ATFP, CAD, ART та ASR можуть використовуватися як вхідні параметри оптимізаційної моделі управлінських рішень. При цьому друга модель уже не повторюватиме сценарний блок. Вона визначатиме конфігурацію заходів, ресурсів і строків, необхідних для переведення підприємства до заданої області адаптивної стійкості.

Висновки. Розроблена модель ADTM поєднує багатовимірний стан підприємства, нелінійні переходи між режимами S1–S4 та каскадне поширення зовнішніх збурень. Розрахунки для ТОВ «Машинобудівна компанія «ВУГЛЕПРОМ» дали початковий ADSI=0,803. Цифровий шок величиною –10%-10\% знизив індекс на 0,083 пункту, причому 43,4% сукупної зміни сформували вторинні та наступні каскадні ефекти. Сценарне моделювання охопило дев'ять конфігурацій і 90 тис. Monte Carlo-реалізацій. Цифрово-прискорений сценарій сформував кінцевий ADSI=0,891, ATFP=0,037, CAD=0,173 та період відновлення 2,2 кварталу. За стресової комбінації ADSI знижується до 0,624, ATFP зростає до 0,447, CAD досягає 1,438, а відновлення триває 8,8 кварталу.

Запропонована система ADSI→ADTM→ATFP→CAD→ART→ASR формує послідовний механізм кількісної діагностики адаптивної траєкторії підприємства. Розрахунки підтвердили нелінійність цифрового ефекту: за ресурсного дефіциту позитивний цифровий імпульс частково поглинається виробничими обмеженнями. Отримані сценарні параметри придатні для подальшого оптимізаційного моделювання складу, строків і ресурсного забезпечення адаптивних управлінських рішень на підприємстві.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. Коритько Т. Моделювання бізнес-процесів системи логістичної діяльності підприємства в умовах цифрової трансформації. *Економіка та суспільство.* 2026. № 84. DOI: http://dx.doi.org/10.32782/2524-0072/2026-84-86
2. Кришталь Г. О. Економіко-математичне моделювання впливу цифровізації на продуктивність підприємств в умовах трансформаційної економіки. У*країнський економічний часопис.* 2026. № 13. С. 115–119. DOI: http://dx.doi.org/10.32782/2786-8273/2026-13-17
3. Островерхов В. М., Качмарський І. В. Стратегічна стійкість організацій: категоріальний базис. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля.* 2024. № 6 (286). С. 86–91. DOI: http://dx.doi.org/10.33216/1998-7927-2024-286-6-86-91
4. Рибальченко Д. Економічна сутність та стратегічна роль цифрової трансформації підприємств в умовах формування цифрової економіки. *Економіка та суспільство.* 2026. № 83. DOI: http://dx.doi.org/10.32782/2524-0072/2026-83-57
5. Шкуренко О., Васюченко П. Управління розвитком промислових підприємств на основі вартісного підходу. *Адаптивне управління: теорія і практика. Серія Економіка.* 2023. Т. 15. № 30. DOI: http://dx.doi.org/10.33296/2707-0654-15(30)-15
6. Юрченко О. Детермінанти цифрової трансформації малих та середніх підприємств. *Економіка та суспільство.* 2025. № 71. DOI: http://dx.doi.org/10.32782/2524-0072/2025-71-169
7. Aslam H., ur Rehman A., Iftikhar A., ul Haq M. Z., Akbar U., Kamal M. M. Digital transformation: Unlocking supply chain resilience through adaptability and innovation. *Technological Forecasting and Social Change*. 2025. Vol. 219. Art. 124234. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.techfore.2025.124234
8. Cui L., Chen R., Gai S., Chen L., Wu L. Digital transformation and organizational resilience: A resource orchestration perspective on R&D investment intensity. *Journal of Business Research.* 2026. Vol. 215. Art. 116306. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.jbusres.2026.116306
9. Dubey R., Bryde D. J., Dwivedi Y. K., Graham G., Foropon C., Papadopoulos T. Dynamic digital capabilities and supply chain resilience: The role of government effectiveness. *International Journal of Production Economics.* 2023. Vol. 258. Art. 108790. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2023.108790
10. Makedon V., Koptilyi D. Digital transformation and artificial intelligence as factors in the economic recovery of enterprises following armed conflicts. *Economics, Entrepreneurship, Management.* 2025. Vol. 12. No. 1. p. 33–48. DOI: https://doi.org/10.56318/eem2025.01.033
11. Makedon V., Myachin V., Aloshyna T., Cherniavska I., Karavan N. Improving the Readiness of Enterprises to Develop Sustainable Innovation Strategies through Fuzzy Logic Models. *Economic Studies (Ikonomicheski Izsledvania).* 2025. Vol. 34. № 5. P. 165–179. URL: https://archive.econ-studies.iki.bas.bg/2025/2025_05/2025_05_09.pdf (дата звернення: 20.09.2026).
12. Tian Y., Cui L. Supply chain resilience and digital transformation: Perspectives from a supply chain network. *Humanities and Social Sciences Communications.* 2025. Vol. 12. Art. 1738. DOI: http://dx.doi.org/10.1057/s41599-025-06011-3
13. Wu S., Yan Z. J. Digital resilience in times of crisis: Uncovering the impact of unforeseen attacks on the digitalization of multinational enterprises. *Asia Pacific Journal of Management.* 2026. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/s10490-026-10138-5
14. Zhang J., Li H., Zhao H. The Impact of Digital Transformation on Organizational Resilience: The Role of Innovation Capability and Agile Response. *Systems.* 2025. Vol. 13. No. 2. Art. 75. DOI: http://dx.doi.org/10.3390/systems13020075

REFERENCES:

1. Korytko T. (2026). Modeliuvannia biznes-protsesiv systemy lohistychnoi diialnosti pidpryiemstva v umovakh tsyfrovoi transformatsii [Modelling business processes of an enterprise logistics activity system under digital transformation]. *Ekonomika ta suspilstvo – Economy and Society,* vol. 84. DOI: https://doi.org/10.32782/2524-0072/2026-84-86 (in Ukrainian)
2. Kryshtal H. O. (2026). Ekonomiko-matematychne modeliuvannia vplyvu tsyfrovizatsii na produktyvnist pidpryiemstv v umovakh transformatsiinoi ekonomiky [Economic and mathematical modelling of the impact of digitalization on enterprise productivity in a transformational economy]. *Ukrainskyi ekonomichnyi chasopys – Ukrainian Economic Journal,* vol. 13, pp. 115–119. DOI: https://doi.org/10.32782/2786-8273/2026-13-17 (in Ukrainian)
3. Ostroverkhov V. M., Kachmarskyi I. V. (2024). Stratehichna stiikist orhanizatsii: katehorialnyi bazys [Strategic resilience of organizations: categorical framework]. *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia – Bulletin of Volodymyr Dahl East Ukrainian National University,* vol. 6(286), pp. 86–91. DOI: https://doi.org/10.33216/1998-7927-2024-286-6-86-91 (in Ukrainian)
4. Rybalchenko D. (2026). Ekonomichna sutnist ta stratehichna rol tsyfrovoi transformatsii pidpryiemstv v umovakh formuvannia tsyfrovoi ekonomiky [Economic essence and strategic role of enterprise digital transformation in the formation of the digital economy]. *Ekonomika ta suspilstvo – Economy and Society,* vol. 83. DOI: https://doi.org/10.32782/2524-0072/2026-83-57 (in Ukrainian)
5. Shkurenko O., Vasiuchenko P. (2023). Upravlinnia rozvytkom promyslovykh pidpryiemstv na osnovi vartisnoho pidkhodu [Management of industrial enterprise development based on the value approach]. *Adaptyvne upravlinnia: teoriia i praktyka. Seriia Ekonomika – Adaptive Management: Theory and Practice. Series Economics,* vol. 15(30). DOI: https://doi.org/10.33296/2707-0654-15(30)-15 (in Ukrainian)
6. Yurchenko O. (2025). Determinanty tsyfrovoi transformatsii malykh ta serednikh pidpryiemstv [Determinants of digital transformation of small and medium-sized enterprises]. *Ekonomika ta suspilstvo – Economy and Society,* vol. 71. DOI: https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-71-169 (in Ukrainian)
7. Aslam H., ur Rehman A., Iftikhar A., ul Haq M. Z., Akbar U., Kamal M. M. (2025). Digital transformation: Unlocking supply chain resilience through adaptability and innovation. *Technological Forecasting and Social Change,* vol. 219, 124234. DOI: https://doi.org/10.1016/j.techfore.2025.124234
8. Cui L., Chen R., Gai S., Chen L., Wu L. (2026). Digital transformation and organizational resilience: A resource

orchestration perspective on R&D investment intensity. *Journal of Business Research,* vol. 215, 116306. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2026.116306
9. Dubey R., Bryde D. J., Dwivedi Y. K., Graham G., Foropon C., Papadopoulos T. (2023). Dynamic digital capabilities and supply chain resilience: The role of government effectiveness. I*nternational Journal of Production Economics,* vol. 258, 108790. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2023.108790
10. Makedon V., Koptilyi D. (2025). Digital transformation and artificial intelligence as factors in the economic recovery of enterprises following armed conflicts. *Economics, Entrepreneurship, Management,* vol. 12(1), pp. 33–48. DOI: https://doi.org/10.56318/eem2025. 01.033
11. Makedon V., Myachin V., Aloshyna T., Cherniavska I., Karavan N. (2025). Improving the readiness of enterprises to develop sustainable innovation strategies through fuzzy logic models. *Economic Studies (Ikonomicheski Izsledvania),* vol. 34(5), pp. 165–179. Available at: https://archive.econ-studies.iki.bas.bg/2025/2025_05/2025_05_09.pdf
12. Tian Y., Cui L. (2025). Supply chain resilience and digital transformation: Perspectives from a supply chain network. *Humanities and Social Sciences Communications,* vol. 12, 1738. DOI: https://doi.org/10.1057/s41599-025-06011-3
13. Wu S., Yan Z. J. (2026). Digital resilience in times of crisis: Uncovering the impact of unforeseen attacks on the digitalization of multinational enterprises. *Asia Pacific Journal of Management.* DOI: https://doi.org/10.1007/s10490-026-10138-5
14. Zhang J., Li H., Zhao H. (2025). The impact of digital transformation on organizational resilience: The role of innovation capability and agile response. *Systems,* vol. 13(2), 75. DOI: https://doi.org/10.3390/systems13020075

Дата надходження статті: 24.09.2026
Дата прийняття статті: 22.10.2026
Дата публікації статті: 03.11.2026