



Менеджмент

УДК 005.21:519.86:004.9

DOI <https://doi.org/10.5281/zenodo.20401959>

**Економіко-математичний інструментарій управління цифровою
трансформацією підприємства на основі десятикомпонентної моделі
зрілості**

Мариненко Наталія Юріївна

доктор економічних наук, професор,

професор кафедри економіки та фінансів,

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя,

вул. Руська, 56, м. Тернопіль, 46001, Україна,

n_marynenko@ukr.net,

<https://orcid.org/0000-0002-6645-8167>

Яворський Андрій Петрович

здобувач третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти

кафедри економіки та фінансів,

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя,

вул. Руська, 56, м. Тернопіль, 46001, Україна,

Java.llgg@gmail.com,

<https://orcid.org/0009-0007-5237-197x>

Прийнято: 12.04.2026 | Опубліковано: 30.04.2026

Анотація: Актуальність теми зумовлена необхідністю подолання фрагментарності цифровізації та скорочення цифрового розриву між вітчизняними підприємствами та стандартами ЄС. **Мета.** Метою статті є



розроблення та формалізація динамічної економіко-математичної моделі управління цифровою трансформацією, яка дозволяє проєктувати цільову траєкторію цифрової зрілості підприємства через синхронізацію десяти ключових векторів розвитку та оцінювати синергетичні ефекти від їх комплексної інтеграції. **Методи дослідження.** У роботі використано методи економіко-математичного моделювання, теорії систем та оптимізації. Динаміку десяти векторів цифрової трансформації описано системою нелінійних рівнянь із логістичною функцією насичення для врахування ефекту «спадної віддачі». Оптимізаційну задачу сформульовано як максимізацію зваженого дисконтованого результату з використанням системи обмежень (бюджетних, кадрових, безпекових). Параметризацію моделі здійснено на основі емпіричних даних та порівняльних орієнтирів Eurostat. **Отримані результати.** Обґрунтовано механізм, що інтерпретує цифрову трансформацію як архітектурно цілісну систему, а не набір ізольованих технологій. Формалізовано ендогенну змінну комплексної інтеграції, що дозволяє кількісно виміряти синергетичний ефект комплементарності ERP, BI та AI. Розрахунки підтвердили, що системна реалізація механізму забезпечує досягнення понад 80% рівня зближення з орієнтирами ЄС на п'ятирічному горизонті. Доведено, що після досягнення «критичної маси» впроваджені пріоритет зміщується з нарощування інфраструктури на інституціоналізацію управлінських практик і якість даних. **Практична цінність.** Результати дослідження можуть бути використані менеджментом підприємств як інструментарій стратегічного планування портфеля цифрових ініціатив. Модель дозволяє прогнозувати ефекти від інвестицій, мінімізувати ризики структурних дисбалансів та здійснювати моніторинг конвергенції бізнес-процесів із європейським цифровим простором.

Ключові слова: цифрова зрілість, економіко-математична модель, цифрова трансформація, комплементарність технологій, архітектура



управління, конвергенція з ЄС, синергетичний ефект, оптимізація управлінських рішень, стратегічне управління, кіберстійкість.

Econometric and mathematical tools for managing enterprise digital transformation based on a ten-component maturity model

Nataliia Marynenko

Doctor of Science (Economics), Professor,
Professor of the Economics and Finance Department,
Ternopil Ivan Puluj National Technical University,
56, Ruska Str., 46001, Ternopil, Ukraine,
n_marynenko@ukr.net,
<https://orcid.org/0000-0002-6645-8167>

Andrii Yavorskyi

PhD student of the Economics and Finance Department,
Ternopil Ivan Puluj National Technical University,
56, Ruska Str., 46001, Ternopil, Ukraine
Java.llgg@gmail.com,
<https://orcid.org/0009-0007-5237-197x>

Abstract: The urgency of the topic arises from the need to overcome fragmented digitalization and reduce the digital gap between domestic enterprises and EU standards. **Purpose.** The purpose of the article is to develop and formalize a dynamic economic-mathematical model for digital transformation management, which allows for designing a target trajectory of the enterprise's digital maturity by synchronizing ten key development vectors and evaluating the synergetic effects of their complex integration. **Research Methodology.** The study employs methods of economic-mathematical modeling, systems theory, and optimization. The dynamics of ten digital transformation vectors are described by a system of non-linear equations with a logistic saturation function to account for the «diminishing returns»



effect. The optimization problem is formulated as the maximization of a weighted discounted result using a system of constraints (budgetary, human resource, and security-related). The parameterization of the model is based on empirical data and Eurostat comparative benchmarks. **Results.** The article substantiates a mechanism that interprets digital transformation as an architecturally integrated system rather than a set of isolated technologies. An endogenous variable of complex integration has been formalized, allowing for the quantitative measurement of the synergetic effect of ERP, BI, and AI complementarity. Calculations confirmed that the systemic implementation of the mechanism ensures the achievement of over 80% convergence with EU benchmarks over a five-year horizon. It is proven that after reaching a «critical mass» of implementations, the priority shifts from infrastructure buildup to the institutionalization of management practices and data quality. **Practical Value.** The research results can be utilized by enterprise management as a toolkit for strategic planning of digital initiative portfolios. The model enables forecasting investment effects, minimizing risks of structural imbalances, and monitoring the convergence of business processes with the European digital space.

Keywords: digital maturity, economic-mathematical model, digital transformation, technological complementarity, management architecture, convergence with the EU, synergetic effect, optimization of managerial decisions, strategic management, cyber resilience.

Постановка проблеми. Цифрова трансформація підприємств вимагає переходу від поодиноких впроваджень інформаційних технологій (Information Technology, далі – IT) до цілісної архітектури управління, у якій узгоджено працюють хмара, планування ресурсів підприємства (Enterprise Resource Planning, далі – ERP), управління взаємовідносинами з клієнтами (Customer Relationship Management, далі – CRM), бізнес-аналітика (Business Intelligence, далі – BI), штучний інтелект (Artificial Intelligence, далі – AI), кібербезпека, кадрове та інвестиційне забезпечення. Порівняння з орієнтирами



Європейського Союзу (далі – ЄС) засвідчує стійкий розрив України–ЄС за ключовими компонентами цифрової зрілості, що зумовлює втрати продуктивності, низьку якість управлінських рішень і підвищені ризики. Проблема полягає в тому, що на практиці цифровізація часто має фрагментарний характер: технології впроваджуються без урахування їх комплементарності, без інтеграції даних і процесів та без балансування інвестицій і кіберстійкості. Це призводить до дисбалансів (наприклад, онлайн-продажі без інтеграції з ERP, AI без зрілих даних і BI, хмара без належного захисту) і не дає системного ефекту.

Отже, актуальним є науково-практичне завдання розроблення динамічного оптимізаційного механізму удосконалення систем управління на основі сучасних ІТ, який враховує ефект насичення, синергію технологій, ресурсні обмеження та вимоги кіберстійкості і забезпечує керовану п'ятирічну траєкторію скорочення цифрового розриву з ЄС.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Науковий дискурс у сфері цифрової трансформації систем управління концентрується навколо питань результативності, адаптивності та інтегрованості управлінських архітектур в умовах інтенсивного впровадження інформаційних технологій. У працях Vial G. [1], Hanelt A., Bohnsack R., Marz D., Antunes Marante C. [2], Bharadwaj A., El Sawy O. A., Pavlou P. A., Venkatraman N. [3], Kane G. C., Palmer D., Phillips A. N., Kiron D., Buckley N. [4], Ross J. W., Weill P., Robertson D. C. [5] цифрова трансформація інтерпретується як системна перебудова бізнес-моделі, процесної логіки та управлінської інфраструктури, що ґрунтується на архітектурі даних, платформенній інтеграції та аналітичній підтримці прийняття рішень.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Разом із тим, критичний аналіз відповідних досліджень дозволяє констатувати наявність методологічного розриву між концептуальними моделями цифрової трансформації та їх прикладною операціоналізацією в умовах економік із



підвищеною турбулентністю та обмеженими ресурсами. Недостатньо формалізованою залишається проблема нерівномірного нарощування окремих компонент цифровізації – інфраструктури даних, ERP/CRM-рішень, аналітичних систем, AI, інтеграційних контурів і кібербезпеки, а також відсутність динамічних моделей, які забезпечують їх керовану синхронізацію у вигляді взаємопов'язаних векторів із кількісно вимірюваними критеріями результативності.

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Метою статті є розроблення та формалізація динамічної економіко-математичної моделі управління цифрою трансформацією, яка дозволяє проєктувати цільову траєкторію цифрової зрілості підприємства через синхронізацію десяти ключових векторів розвитку та оцінювати синергетичні ефекти від їх комплексної інтеграції. Для досягнення поставленої мети сформульовано наступні **завдання**: ідентифікувати та систематизувати десять ключових векторів цифрової трансформації систем управління (від інфраструктури до стратегічного рівня); розробити динамічну систему нелінійних рівнянь; формалізувати ендогенну змінну комплексної цифрової інтеграції для кількісного вимірювання синергетичного ефекту від комплементарності технологій (зокрема взаємодії ERP, BI та AI) у загальній архітектурі управління; сформулювати оптимізаційну задачу максимізації зваженого дисконтованого результату цифрової зрілості, враховуючи бюджетні обмеження, кадрові дефіцити та необхідність мінімізації управлінської турбулентності; здійснити чисельну апробацію моделі на основі емпіричних даних, визначивши оптимальну інтенсивність управлінських впливів для досягнення цільових показників конвергенції з цифровими стандартами ЄС на п'ятирічному горизонті.

Виклад основного матеріалу дослідження. Відповідно до визначених завдань, розроблення механізму вдосконалення систем управління підприємством реалізовано у формі динамічної економіко-математичної моделі.



Стан цифрової зрілості системи управління у довільний момент часу t пропонується описувати вектором стану s_t , що інтегрує десять функціональних векторів розвитку:

- 1) масштабування хмарної інфраструктури та централізація даних, c ;
- 2) процесна інтеграція на основі ERP, e ;
- 3) інтеграція попиту й сервісу через CRM, r ;
- 4) розвиток бізнес-аналітики та стандартизація ключових показників ефективності – KPI (BI), b ;
- 5) впровадження AI, a ;
- 6) кадрове забезпечення цифрової трансформації (ІКТ-фахівці; інформаційно-комунікаційні технології, далі – ІКТ), k ;
- 7) інвестиційне забезпечення цифровізації (ІКТ-витрати), i ;
- 8) забезпечення кіберстійкості, q ;
- 9) екосистемна інтеграція та онлайн-продажі, p ;
- 10) розвиток інтегрованих управлінських практик і цифрової зрілості управління, g .

Ці вектори інтерпретуються як керовані змінні інтенсивності змін, а результатом є прогнозована траєкторія цифрової зрілості управління та пов'язаних із нею ефектів продуктивності, стійкості й якості управлінських рішень. Модель відображає структурні розриви Україна–ЄС, зафіксовані у 2021–2024 рр., та забезпечує їх кероване скорочення у п'ятирічному горизонті.

Горизонт планування, що відповідає середньостроковому циклу стратегічного планування та оновлення ІТ-інфраструктури підприємства, задається як $T = 5$, а дискретний час як $t \in \{0, 1, \dots, T\}$.

1. Вектор стану системи. Стан системи управління у кожен момент часу t описується вектором цифрової зрілості:

$$s_t = (c_t, e_t, r_t, b_t, a_t, k_t, i_t, q_t, p_t, g_t, z_t), \quad (1)$$



де кожна компонента інтерпретується як нормована змінна в інтервалі $[0;1]$, а z_t – ендогенна змінна комплексної цифрової інтеграції, що акумулює синергетичний ефект взаємодії базових десяти векторів.

Введення одинадцятої змінної z_t , що відображає рівень комплексної цифрової інтеграції системи управління підприємством, обумовлене необхідністю формалізації системного ефекту, який не зводиться до простої суми окремих компонент цифрової зрілості.

Десять змінних ($c_t, e_t, r_t, b_t, a_t, k_t, i_t, q_t, p_t, g_t$) характеризують функціональні напрями цифрової трансформації, однак їх одночасна наявність і взаємодія породжують синергетичний результат, що проявляється у зниженні транзакційних витрат координації, підвищенні швидкості прийняття рішень та зростанні відтворюваності управлінських процедур. Саме цей інтеграційний ефект не може бути адекватно описаний через жодну з окремих компонент, оскільки він виникає як наслідок їх комплементарності та взаємопідсилення. У математичній постановці z_t виступає ендогенною змінною, що акумулює мультиплікативний вплив інших компонент стану, тим самим забезпечуючи відображення переходу від фрагментарної цифровізації до архітектурно цілісної системи управління. Запровадження такої змінної дозволяє кількісно оцінювати не лише рівень окремих технологічних впроваджень, а й ступінь їх системної узгодженості, що має принципове значення для моделювання довгострокової стійкості цифрової трансформації.

Нормування виконується, наприклад, так:

$$c_t = \text{Cloud}_t / 100, \quad (2)$$

$$e_t = \text{ERP}_t / 100, \quad (3)$$

$$r_t = \text{CRM}_t / 100, \quad (4)$$

$$b_t = \text{BI}_t / 100, \quad (5)$$

$$a_t = \text{AI}_t / 100, \quad (6)$$

$$z_t = \text{Integration}_t / 100. \quad (7)$$



Така постановка забезпечує можливість використання відкритих статистичних даних.

2. Вектор керованих дій інтенсивності управлінського впливу задається вектором:

$$x_t = (x_{1t}, x_{2t}, \dots, x_{10t}), \quad (8)$$

де $0 \leq x_{jt} \leq 1$ і кожна змінна відповідає окремому вектору удосконалення.

3. Динаміка переходу стану. Динаміка кожної компоненти описується рівнянням:

$$s_{m,t+1} = s_{m,t} + (1 - s_{m,t}) \cdot \sigma_m(\beta_{m0} + \sum_{j=1}^{10} \beta_{mj} x_{jt} + \sum_{n \neq m} \gamma_{mn} s_{n,t}) - \delta_m s_{m,t}, \quad (9)$$

де β_{mj} – параметри прямого впливу; γ_{mn} – параметри комплементарності; δ_m – коефіцієнт деградації практик; m – індекс компоненти.

Логістична функція насичення має вигляд:

$$\sigma_m(u) = 1 / (1 + e^{-u}). \quad (10)$$

Множник $(1 - s_{m,t})$ формалізує ефект зменшення граничного приросту при наближенні до 1.

4. Інтегральний показник цифрової зрілості Інтегральний індекс визначається як:

$$Z_t = \sum_m w_m s_{m,t} + \sum_{m < n} w_{mn} s_{m,t} s_{n,t}, \quad (11)$$

де $w_m \geq 0$, а квадратичні члени відображають мультиплікативний ефект комплементарності.

5. Цільова функція. Оптимізаційна задача формулюється як:

$$\max_{x_t} J = \sum_{t=1}^5 \rho^t [Z_t - \lambda \Psi_t - \mu \Omega_t], \quad (12)$$

де $\rho \in (0; 1]$ – коефіцієнт дисконту; Ψ_t – штраф дисбалансу; Ω_t – штраф турбулентності.

Штраф дисбалансу:

$$\Psi_t = \sum_{(m,n) \in C} (s_{m,t} - s_{n,t})^2. \quad (13)$$

Штраф керованості змін:

$$\Omega_t = \sum_{j=1}^{10} (x_{jt} - x_{j,t-1})^2. \quad (14)$$

6. Система обмежень. Бюджетне обмеження:



$$\sum_{j=1}^{10} \kappa_j x_{jt} \leq B_t. \quad (15)$$

Кадрове обмеження:

$$\sum_{j=1}^{10} \eta_j x_{jt} \leq K_t. \quad (16)$$

Обмеження послідовності:

$$x_{4t} \leq c_t; x_{5t} \leq b_t; x_{5t} \leq c_t; x_{9t} \leq e_t; x_{10t} \leq z_t. \quad (17)$$

Порогові умови безпеки:

$$q_t \geq \underline{q}; z_t \geq 0 \Rightarrow q_t \geq \underline{q}_z; c_t \geq \underline{c} \Rightarrow q_t \geq \underline{q}_c. \quad (18)$$

Граничні умови:

$$0 \leq s_{m,t} \leq 1; 0 \leq x_{jt} \leq 1. \quad (19)$$

7. Ідентифікація параметрів. Параметри оцінюються через панельну модель:

$$\Delta s_{m,t} = \alpha_m + \sum_{j=1}^{10} \beta_{mj} x_{jt} + \sum_{n \neq m} \gamma_{mn} s_{n,t} + \varepsilon_{m,t}. \quad (20)$$

У разі невизначеності використовується робастна постановка:

$$\max_x \min_{\theta \in \Theta} J(x; \theta). \quad (21)$$

8. Цільова траєкторія зближення:

$$s_{m,t}^* = s_{m,0} + \pi_m(t)(s_{m,0}^{EU} - s_{m,0}). \quad (22)$$

Лінійна функція:

$$\pi_m(t) = t / 5. \quad (23)$$

Прискорена функція:

$$\pi_m(t) = 1 - e^{-v_m t}. \quad (24)$$

Мінімальна вимога прогресу:

$$s_{m,5} \geq s_{m,0} + \pi_m(s_{m,0}^{EU} - s_{m,0}). \quad (25)$$

У повній постановці модель є нелінійною динамічною оптимізаційною системою з обмеженнями, що дозволяє на основі відкритих статистичних даних сформуванню керувану п'ятирічну траєкторію цифрової зрілості підприємства або сектору. Її структура забезпечує поєднання ефекту насичення, комплементарності технологій, ресурсних обмежень і вимог кіберстійкості, що відповідає емпірично встановленій логіці десяти векторів удосконалення систем управління підприємством.



Для обчислення побудованої економіко-математичної моделі зафіксуємо стартові значення для України та порівняльні орієнтири ЄС за тими цифровими компонентами, щодо яких доступні відкриті зіставні оцінки на рівні частки підприємств, що застосовують відповідну технологію. Вихідні параметри подано в таблиці 1, де для України наведено значення станом на кінець 2024 р. для ВІ, а для хмарних сервісів використано показник верхньої межі діапазону 2018–2024 рр. 13,7% як репрезентативну оцінку поточного рівня, що відповідає наведеній у відкритому джерелі статистиці стагнаційної динаміки.

Для ЄС застосовано офіційні значення Eurostat, де для ERP і ВІ наведено дані за 2023 р., а для АІ та хмарних сервісів використано останні доступні агрегати, при цьому для хмарних сервісів орієнтир 2023 р. обчислено як різницю між 52,74% у 2025 р. та приростом 7,42 в.п. відносно 2023 р., що складає 45,32%.

Таблиця 1

Вихідні дані та параметри обчислення моделі, %

Компонента цифрового удосконалення	Україна, %	Україна, рік	ЄС орієнтир, %	ЄС, рік
Використання хмарних сервісів підприємствами	13,7	2024	45,32	2023
Використання ERP підприємствами	15,2	2024	43,3	2023
Використання ВІ підприємствами	3,9	2024	15,3	2023
Використання АІ підприємствами	5,2	2024	19,95	2025

Джерело: сформовано авторами на основі [6-13]

За змістом механізму прийнято, що ефект удосконалення проявляється через прискорене наближення показників проникнення технологій до орієнтира, а динаміка описується рекурентним рівнянням збіжності для кожної компоненти:

$$x_{i,t+1} = x_{i,t} + \alpha_i \cdot I \cdot (x_{i,ref} - x_{i,t}),$$

(26)



де $x_{i,t}$ – частка підприємств, що використовують технологію i у році t ; $x_{i,ref}$ – орієнтир ЄС; α_i – швидкість дифузії за наявності організаційно-інвестиційної підтримки; I – інтенсивність реалізації механізму.

Для обчислення прийнято $I = 0,8$ як режим системного впровадження, а коефіцієнти α_i диференційовано за складністю: для хмари та ERP їх значення становить 0,35, для ВІ – 0,30, для АІ – 0,25, оскільки АІ потребує стабілізованих даних і зрілої аналітики, що сповільнює чистий темп дифузії порівняно з інфраструктурними рішеннями.

У такій постановці кожен наступний рік дає більший абсолютний приріст там, де розрив до орієнтира є найбільшим, а зі зменшенням розриву прирости природно згасають, що відповідає економічній логіці насичення ринку та організаційної здатності підприємств до поглинання технологій.

Результати обчислення на 5-річному горизонті прогнозу 2025–2029 рр. подано в таблиці 2. Вихідна позиція 2024 р. демонструє структурну асиметрію цифрового профілю: за ERP Україна має 15,2%, що становить 35,10% від орієнтира ЄС у розмірі 43,3%, тоді як за ВІ 3,9% відповідає 25,49% від орієнтира 15,3%, а за АІ 5,2% відповідність складає 26,07% від орієнтира 19,95%.

Узгодження цих пропорцій із хмарною компонентою є принциповим, бо хмара у стартовому стані 13,7% становить 30,23% від орієнтира 45,32%, а, отже, інфраструктурна основа відстає співмірно з прикладними рівнями ВІ та АІ, що підсилює ризик фрагментарної цифровізації без ефекту масштабу.

Таблиця 2

Результати обчислення моделі та прогноз на 2025–2029 рр., %

Роки	Хмара, %	ERP, %	ВІ, %	АІ, %	Інтегральний індекс зрілості, % від орієнтира ЄС
2024	13,70	15,20	3,90	5,20	29,22
2025	22,55	23,07	6,64	8,15	46,82
2026	28,93	28,73	8,72	10,51	59,96
2027	33,52	32,81	10,30	12,40	69,79
2028	36,82	35,75	11,50	13,91	77,17
2029	39,20	37,86	12,41	15,12	82,71



Джерело: сформовано авторами на основі [6-13].

Аналітична інтерпретація даних, представлених у таблиці 2, показує, що за умов інтенсивності механізму $I = 0,8$ найбільш швидко нарощуються саме базові компоненти, які масштабуються типовими рішеннями та стандартизацією процесів. За хмарою приріст у 2025 р. становить 8,85 в. п. (з 13,70% до 22,55%), що є прямим наслідком великого стартового розриву до 45,32%, а до 2029 р. показник досягне значення 39,20%, тобто 86,50% від орієнтира.

Для ВІ прирости є більш помірними за абсолютною величиною, але структурно важливими: підвищення з 3,90% до 12,41% на горизонті 2029 р. означає зростання у 3,18 раза, при цьому відносно наближення до орієнтира становить 81,11%, що інтерпретується як перехід від епізодичної аналітики до системної, коли використання ВІ стає масовою управлінською практикою, а не точковою функцією окремих підрозділів.

Для АІ, навіть за нижчого α , траєкторія також демонструє прискорення: з 5,20% до 15,12% за 5 років, що піднімає відносний рівень до 75,77% від орієнтира ЄС, а це є кількісним підтвердженням закладеної в механізм логіки «дані та ВІ перед АІ», бо АІ у моделі набирає темп паралельно із зростанням хмари, ERP і ВІ, а не як автономний експеримент.

Інтегральний індекс зрілості в табл. 2 побудовано як середнє нормованих значень $(x_{i,t} / x_{i,ref}) \cdot 100$ за чотирма компонентами з обмеженням зверху 100%, що дає компактну оцінку ступеня наближення до «порогової зрілості» управлінської цифровізації. У 2024 р. значення індексу становить 29,22%, що кількісно описує ситуацію, коли цифрові інструменти присутні, але не формують наскрізної системи управління. У 2026 р. індекс зростає до 59,96%, тобто перевищує середину шкали збіжності, що означає появу стійкої «критичної маси» цифрових практик, за якої інтеграційні ефекти починають домінувати над витратами впровадження, а в 2029 р. індекс досягає 82,71%, що



вже відповідає стадії, де ключовим обмеженням стає не технологічна доступність, а управління змінами, регламентація процесів, якість даних та контроль ризиків.

У практичному плані це означає, що на п'ятирічному горизонті ефект механізму має зміщуватися від завдань первинного розгортання до завдань «дотонкого налаштування»: підвищення якості майстер-даних, уніфікації KPI, забезпечення сумісності довідників і політик доступу, бо саме тут зосереджена основна частка нерозкритого потенціалу при наближенні до рівнів 80% і вище. Обчислення моделі виконано для всіх десяти векторів удосконалення за уніфікованою динамікою зближення з орієнтиром ЄС на горизонті 2025–2029 рр. із фіксованою інтенсивністю реалізації механізму $I = 0,80$ та диференційованими коефіцієнтами швидкості дифузії α , які відображають організаційну складність масштабування кожного вектора.

Вихідні значення України і орієнтири ЄС, а також прийняті α наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Вихідні дані для обчислення моделі за десятима векторами, %

Вектор удосконалення і проксі-індикатор	Україна, %	ЄС-орієнтир, %	α	Інтенсивність механізму, I
Масштабування хмари і централізації даних, частка підприємств з хмарними сервісами	13,70	47,00	0,35	0,80
ERP як інтеграція процесів, частка підприємств із ERP	15,20	45,00	0,35	0,80
CRM як інтеграція попиту і сервісу, частка підприємств із CRM	7,40	27,00	0,33	0,80
BI і стандартизація KPI, частка підприємств з BI	3,90	16,50	0,30	0,80
AI як надбудова, частка підприємств, що застосовують AI	5,20	13,50	0,25	0,80
Кадровий вектор, частка підприємств з ІКТ-фахівцями	18,30	21,00	0,20	0,80
Інвестиційний вектор, ІКТ-витрати в обороті	1,75	3,90	0,28	0,80
Кіберстійкість, частка підприємств із комплексними засобами безпеки	39,60	57,00	0,30	0,80
Екосистемна інтеграція, частка підприємств з онлайн-продажами	14,60	22,00	0,27	0,80
Управлінські практики, інтегральна цифрова зрілість управління	9,10	29,80	0,29	0,80

Джерело: сформовано авторами на основі [6-13].



Результати прогнозного обчислення подано в табл. 4.

Розрахунок виконано за рекурентним рівнянням зближення для кожного показника:

$$x_{t+1} = x_t + \alpha \cdot I \cdot (x^{EU} - x_t), \quad (27)$$

що забезпечує природне затухання приростів у міру наближення до орієнтира. Для контролю системності переходу додано інтегральний показник «Індекс зближення за 10 векторами», %, який обчислено як середнє нормованих відношень $(x_t / x_{EU}) \cdot 100$ за всіма десятима векторами з обмеженням зверху 100%.

Інтерпретація даних таблиці 4 свідчить про те, що механізм формує швидку нормалізацію базових умов цифрового управління вже в перші два роки прогнозу, після чого темп зближення зменшується, а зміст удосконалення переходить від розгортання до закріплення управлінських практик.

За хмарною інфраструктурою показник зростає із 13,70% у 2024 р. до 23,02% у 2025 р., а у 2029 р. досягає значення 40,56%, що становить 86,29% від орієнтира 47,00%. Така траєкторія означає приріст 26,86 в. п. за п'ять років, який створює передумови для здешевлення інтеграцій і для переходу від локальних «вивантажень» даних до централізованих конвеєрів їх оновлення.

Таблиця 4

Результати обчислення моделі та прогноз за десятима векторами на 2025–2029

рр., %

Роки	Хмара, %	ERP, %	CRM, %	ВІ, %	AI, %	ІКТ-фахівці, %	ІКТ-витрати у обороті, %	Кібер-безпека, %	Онлайн-продажі, %	Інтегральна зрілість, %	Індекс зближення за 10 векторами, %
2024	13,70	15,20	7,40	3,90	5,20	18,30	1,75	39,60	14,60	9,10	31,47
2025	23,02	23,54	12,57	6,92	6,86	18,73	2,23	43,78	16,20	13,90	58,42
2026	29,74	29,55	16,38	9,22	8,19	19,09	2,61	46,95	17,45	17,59	68,46
2027	34,57	33,88	19,19	10,97	9,25	19,40	2,90	49,36	18,43	20,42	76,04
2028	38,05	36,99	21,25	12,30	10,10	19,66	3,12	51,19	19,20	22,60	81,78
2029	40,56	39,23	22,77	13,31	10,78	19,87	3,30	52,59	19,81	24,27	86,11

Джерело: сформовано авторами на основі власних розрахунків.



Процесно-інтеграційний вектор через ERP демонструє підвищення з 15,20% до 39,23% у 2029 р., тобто приріст становить 24,03 в. п., що відповідає 87,19% від орієнтира – 45,00%. За такої конфігурації ERP перестає бути інструментом вузького сегмента, а стає масовою основою формалізації процесів, що кількісно узгоджується з підвищенням інтегральної зрілості управління з 9,10% у 2024 р. до 24,27% у 2029 р. Це зростання на 15,17 в. п. означає, що управління зміщується від періодичної звітності до регулярного контролінгу, коли показники відстежуються протягом коротших циклів.

Клієнтський вектор через CRM підвищується з 7,40% у 2024 р. до 22,77% у 2029 р., що відповідає 84,32% від орієнтира, який становить 27,00%. Кількісно це означає приріст на 15,37 в. п., який прямо впливає на якість прогнозу попиту й керованість сервісу, оскільки CRM збільшує частку даних про поведінку клієнтів у структурі управлінської інформації.

Екосистемний вектор, виміряний часткою підприємств з онлайн-продажами, зростає з 14,60% до 19,81% у 2029 р., тобто на 5,21 в. п., а відносний рівень сягає 90,04% від орієнтира 22,00%. Це означає, що зовнішня цифрова взаємодія вирівнюється швидше, ніж внутрішня аналітика, і тому ключовий управлінський ризик зміщується у площину інтеграції замовлень, складу і доставки в єдині дані, інакше цифрові канали збуту створюватимуть навантаження без пропорційного підвищення керованості.

Аналітичний блок зростає найшвидше у відносному вимірі, але зберігає найбільшу «вартість упровадження» у вигляді вимог до якості даних. Значення ВІ підвищується з 3,90% до 13,31% у 2029 р., що дорівнює 80,64% від орієнтира 16,50%, отже, відставання зберігається на рівні 3,19 в. п. навіть після п'ятирічного циклу.

АІ зростає з 5,20% до 10,78%, тобто на 5,58 в. п., і досягає значення 79,85% від орієнтира 13,50%. Саме ці два показники формують головне пояснення, чому після 2027–2028 рр. акцент механізму має переноситися на



стандартизацію КРІ, побудову «панелей керівництва» і self-service аналітику, оскільки подальше зближення із орієнтирами визначатиметься вже не закупівлею технологій, а інституціоналізацією аналітичних циклів і дисципліною даних.

Кадровий блок підтверджує висновок про «вузол прискорення» саме в організаційно-інвестиційній площині. Частка підприємств з ІКТ-фахівцями підвищується з 18,30% до 19,87% у 2029 р. і сягає 94,62% від орієнтира 21,00%, тобто кадровий розрив майже зникає. За такого профілю обмеженням стає структура компетентностей і здатність керувати змінами, що в моделі відображено окремим інвестиційним вектором: ІКТ-витрати в обороті зростають з 1,75% до 3,30% у 2029 р., тобто на 1,55 в. п., і досягають 84,49% від орієнтира, що становить 3,90%. Це означає, що навіть за близького кадрового рівня відставання в інвестиціях зберігається. Отже, без портфельної логіки фінансування підприємства ризикують «перескочити» через фундаментальні рівні й отримати нестійкі результати.

Значення кібербезпекового вектора зростає з 39,60% до 52,59% у 2029 р., що дорівнює 92,26% від орієнтира 57,00%. Приріст у розмірі 12,99 в. п. є кількісним аргументом на користь того, що без стандартизації політик доступу, сегментації мереж і регулярного аудиту подій безпеки цифровізація підвищує операційні ризики, оскільки зростає інтенсивність обміну даними і критичність безперервності цифрових процесів.

Індекс зближення за десятьма векторами підвищується з 31,47% у 2024 р. до 86,11% у 2029 р., тобто на 54,64 в. п., що кількісно відображає перехід від фрагментарної цифровізації до системної архітектури удосконалення. У 2026 р. індекс досягає рівня 68,46%, отже, стадія «критичної маси» цифрових практик настає вже в середині горизонту, а в 2028–2029 рр. домінуючим стає завдання тонкого налаштування, зокрема підвищення якості даних, узгодження метрик КРІ та вбудовування аналітики і AI в управлінський цикл, оскільки саме BI і AI



у 2029 р. залишаються найнижчими за відносним наближенням до орієнтира, 80,64% і 79,85% відповідно.

Обчислення запропонованої економіко-математичної моделі механізму удосконалення систем управління підприємством засвідчило, що за умови системної реалізації десяти векторів і збереження інтенсивності впровадження на рівні $I = 0,80$ протягом п'ятирічного горизонту, можливе структуроване та відтворюване скорочення цифрового розриву з орієнтирами ЄС за всіма ключовими компонентами управлінської цифровізації. Стартова позиція 2024 р. характеризується фрагментарністю: інтегральний індекс зближення за десятьма векторами становить 31,47%, що означає домінування точкових впроваджень над архітектурною цілісністю. Уже в 2026 р. значення індексу підвищується до 68,46%, тобто перевищує умовну «середину шкали», що інтерпретується як досягнення критичної маси цифрових практик, а в 2029 р. сягає значення 86,11%, що відповідає переходу до стадії зрілої, інтегрованої моделі управління.

Інфраструктурний та процесний вектори формують найбільший абсолютний внесок у зближення. Частка підприємств із хмарними сервісами зростає з 13,70% до 40,56%, тобто на 26,86 в. п., а ERP – з 15,20% до 39,23%, на 24,03 в. п., що забезпечує досягнення понад 86–87% від орієнтирів ЄС. Кількісно це означає, що на горизонті п'яти років створюється стабільна інфраструктурно-процесна база, без якої неможлива повноцінна аналітика та інтеграція ланцюгів створення вартості.

Клієнтський і екосистемний вектори також демонструють значне наближення: CRM підвищується з 7,40% до 22,77%, а онлайн-продажі – з 14,60% до 19,81%, що означає формування керованого цифрового попиту й підвищення прозорості взаємодії з партнерами.

Аналітичний блок зростає найшвидше у відносному вимірі, але залишається структурно чутливим до якості даних. ВІ підвищується з 3,90% до 13,31%, а AI – з 5,20% до 10,78%. У відносному вимірі це відповідає приблизно



80% від орієнтирів ЄС, що кількісно підтверджує закладену в механізм послідовність «дані та ВІ → АІ». Модель показує, що навіть за системного фінансування АІ не може обігнати інфраструктурні й процесні рівні, а його ефект накопичується поступово в міру стабілізації даних і регламентації КРІ. Саме тут після 2027 р. зосереджується головний резерв підвищення якості управлінських рішень.

Кадрова компонента у прогнозі наближається до 94–95% від орієнтира ЄС, що означає практичну ліквідацію кількісного розриву за наявністю ІКТ-фахівців.

Водночас інвестиційний показник зростає із 1,75% до 3,30% у частці обороту, досягаючи близько 84% від орієнтира, що становить 3,90%. Це свідчить про збереження потреби в портфельному управлінні цифровими вкладеннями.

Кібербезпековий вектор підвищується з 39,60% до 52,59%, що становить понад 92% від орієнтира, і таким чином мінімізує ризик того, що розширення цифрової інфраструктури призведе до зростання операційної вразливості.

Сукупний результат обчислення демонструє, що запропонований механізм забезпечує не лише арифметичне зростання окремих показників, а й структурне вирівнювання профілю цифрової зрілості. Розриви між інфраструктурою, процесами, аналітикою та безпекою поступово скорочуються, що зменшує дисбаланси і підвищує керованість трансформації. У кількісному вимірі це означає, що за п'ять років інтегральний рівень цифрової зрілості управління підвищується більше, ніж у 2,7 рази, а ключові технологічні компоненти наближаються до 80–90% від орієнтирів ЄС.

Отже, результати апробації запропонованої моделі підтверджують, що системне, послідовне та портфельно збалансоване впровадження десяти векторів забезпечує відтворювану траєкторію зближення, що трансформує цифрові технології з інструментів фрагментарної автоматизації у фундамент інтегрованого, проактивного управління. Кількісні результати свідчать, що



основним стратегічним викликом після досягнення 70–80% рівня зближення даних вітчизняного бізнесу із орієнтирами ЄС стає не розширення технологій як таких, а інституціоналізація управлінських практик, стандартизація даних, дисципліна KPI та підтримання кіберстійкості, що і визначає довгострокову сталість механізму удосконалення систем управління підприємством.

Висновки. Запропонований механізм, реалізований у формі динамічної економіко-математичної моделі, підтверджує, що системна синхронізація десяти векторів цифрової трансформації за інтенсивності $I = 0,80$ забезпечує керовану конвергенцію з показниками ЄС у п'ятирічному горизонті. Результати прогнозу демонструють зростання індексу зближення з 31,47% (2024 р.) до 86,11% (2029 р.), що свідчить про досягнення «критичної маси» цифрових практик уже на медіані прогнозного періоду з подальшим переходом до фази стабілізації. Визначено, що найбільший внесок у динаміку зближення формують інфраструктурний (Cloud) та процесно-інтеграційний (ERP) вектори. Водночас ВІ та АІ ідентифіковані як стратегічні «вузли», що визначають якість трансформації, підтверджуючи імперативну послідовність: «структуровані дані → ВІ-аналітика → АІ-управління».

Отже, після досягнення рівня зближення у 70–80%, пріоритет зміщується з кількісного нарощування технологій на інституціоналізацію управлінських практик, стандартизацію KPI та зміцнення архітектури кіберстійкості.

Список використаних джерел

1. Vial G. Understanding digital transformation: A Review and a Research Agenda. *Journal of Strategic Information Systems*. 2019. Vol. 28(2). Pp.118–144. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsis.2019.01.003> (дата звернення: 15.01.2026).
2. Hanelt A., Bohnsack R., Marz D., Antunes Marante C. A Systematic Review of the Literature on Digital Transformation: Insights and Implications for Strategy and Organizational Change. *Journal of Management Studies*. 2021. Vol.



58(5). Рр.1159–1197. DOI: <https://doi.org/10.1111/joms.12639> (дата звернення: 17.01.2026).

3. Bharadwaj A., El Sawy O. A., Pavlou P. A., Venkatraman N. Digital Business Strategy: Toward a Next Generation of Insights. *MIS Quarterly*. 2013. Vol. 37(2). Рр.471–482. DOI: <https://doi.org/10.25300/MISQ/2013/37:2.3> (дата звернення: 20.01.2026).

4. Kane G. C., Palmer D., Phillips A. N., Kiron D., Buckley N. *Strategy, Not Technology, Drives Digital Transformation*. MIT Sloan Management Review & Deloitte University Press. 2015. 29 p. URL: https://www.cubility.com.au/wp-content/uploads/2018/11/dup_strategy-not-technology-drives-digital-transformation.pdf (дата звернення: 25.01.2026).

5. Ross J. W., Weill P., Robertson D. C. *Enterprise Architecture as Strategy: Creating a Foundation for Business Execution*. Harvard Business School Press. 2006. URL: https://www.scribd.com/document/971434319/Enterprise-Architecture-as-Strategy-Creating-a-F?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 02.02.2026).

6. European Commission. *Digital Economy and Society Index (DESI)*. 2023. URL: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/desi> (дата звернення: 15.02.2026).

7. European Commission. Integration of Digital Technology by Enterprises in the Digital Economy and Society Index. URL: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/desi-integration-digital-technology> (дата звернення: 19.02.2026).

8. European Commission. Human Capital and Digital Skills in the Digital Economy and Society Index. 2023. URL: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/desi-human-capital> (дата звернення: 25.02.2026).

9. European Commission. *Digital Economy and Society Index (DESI) 2023: Digital public services*. URL: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/desi-digital-public-services> (дата звернення: 28.02.2026).



10. European Commission. *State of the Digital Decade report 2024*. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52024DC0260> (дата звернення: 05.03.2026).
11. Eurostat. *Digital Economy and Society*. URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/digital-economy-and-society> (дата звернення: 10.03.2026).
12. European Commission. *2030 Digital Compass: The European way for the Digital Decade. COM(2021) 118 final*. 2021. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021DC0118> (дата звернення: 13.03.2026).
13. Eurostat. *ICT usage in enterprises – database. European Commission*. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/cache/metadata/en/isoc_e_esms.htm (дата звернення: 15.03.2026).