

**Кузьминський Костянтин Миколайович**, аспірант PhD кафедри економіки бізнесу і міжнародних економічних відносин, +38(050)781-53-31, kantonion@gmail.com, ORCID ID: 0009-0005-2491-7440.

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»  
вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002*

## МОДЕЛЮВАННЯ ПОЕТАПНОЇ ЦИФРОВОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ ВИРОБНИЧОГО КЛАСТЕРУ

***Анотація.** У статті запропоновано оригінальну модель поетапної цифрової трансформації виробничого кластеру. Модель базується на багаторівневому підході з урахуванням цифрової зрілості кожного з учасників кластеру, типології цифрових технологій, що впроваджуються (автоматизація, IoT, AI, цифрові платформи тощо), взаємозв'язків між етапами трансформації (ініціалізація, синхронізація, масштабування, оптимізація), інтеграції показників ефективності (KPI) на кожному етапі. Модель дозволяє не лише відображати поточний стан цифровізації кластеру, а й будувати сценарії розвитку з урахуванням обмежень ресурсів, ризиків та стратегічних пріоритетів галузі. Вперше формалізовано підхід до моделювання цифрової трансформації саме на рівні кластерної організації з урахуванням міжпідприємницької кооперації. Запропоновано також механізм оцінки ефективності цих процесів.*

***Ключові слова:** модель поетапної цифрової трансформації, ефективність, виробничий кластер, цифрова зрілість.*

**Kuzmynskyi Kostiantyn**, PhD student of the Department of Business Economics and International Economic Relations, +38 (050)781-53-31, kantonion@gmail.com, ORCID ID: 0009-0005-2491-7440.

*National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute".  
2, Kirpychova St., Kharkiv, Ukraine, 61002.*

## MODELING OF PHASE-BY-PHASE DIGITAL TRANSFORMATION OF A PRODUCTION CLUSTER

***Abstract.** The article proposes an original model of phase-by-phase digital transformation of a production cluster. The model is based on a multi-level approach, taking into account the digital maturity of each cluster participant, the typology of digital technologies being implemented (automation, IoT, AI, digital platforms, etc.), the relationships between the transformation stages (initialization, synchronization, scaling, optimization), and the integration of performance indicators (KPIs) at each stage. The model allows not only to reflect the current state of the cluster's digitalization, but also to build development scenarios taking into account resource constraints, risks, and strategic priorities of the industry. For the first time, an approach to modeling digital transformation has been formalized at the level of the cluster organization, taking into account inter-enterprise cooperation. A mechanism for assessing the effectiveness of these processes has also been proposed.*

***Key words:** phased digital transformation model, efficiency, production cluster, digital maturity.*

**Постановка проблеми.** У сучасних умовах глобальної цифрової трансформації та індустрії 4.0 виробничі кластери стикаються з необхідністю поетапного впровадження цифрових технологій, які забезпечують зростання інноваційного потенціалу, підвищення конкурентоспроможності та адаптивності до змін ринкового середовища. Проте на практиці цифрова трансформація часто відбувається фрагментарно, без чітко визначених етапів, цілей і взаємопов'язаних індикаторів ефективності. Відсутність формалізованих моделей, що описують поетапний перехід кластеру до цифрової зрілості, ускладнює стратегічне планування, координацію дій учасників кластеру та оцінку результатів трансформації. Отже, виникає потреба у створенні моделі поетапної цифрової трансформації виробничого кластеру, яка дозволить формалізувати процес змін, врахувати міжкластерні та внутрішньокластерні взаємодії, а також оцінити ефективність впроваджених цифрових рішень на кожному етапі.

**Мета дослідження** полягає в моделюванні поетапної цифрової трансформації виробничого кластеру з використанням багаторівневого підходу з урахуванням цифрової зрілості кожного з учасників кластеру.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій з проблеми, що розглядається.** У науковому середовищі існують різні підходи до питань щодо моделювання процесів діджиталізації. Дослідники Черчик Л., Бегун С. стверджують, і з цим слід погодитися, що використання моделей, які описують залежності обсягів виробництва від ресурсів праці в умовах цифрової трансформації дає можливість не лише оптимізувати поточні процеси, а й розробити ефективні стратегії розвитку на майбутнє [1]. Це сприяє підвищенню конкурентоспроможності економічних систем, дозволяє швидко реагувати на зміни у зовнішньому середовищі та забезпечує його стійкий розвиток.

Можливості цифрової трансформації для генерування ідей сталого бізнесу, сталих практик фінансування бізнесу та сталого розвитку та інклюзії розглядався на цілій низці науково-практичних конференцій. Така конференція у Харкові (2024) охопила широкий спектр напрямів інтеграції принципів сталого розвитку в план відновлення та декарбонізації економіки України, методології розробки

бізнес-моделей у проектуванні організації, кращих практик впровадження сталих бізнес-моделей у ЄС та Україні [2]. Метою роботи Кочерги В. І. є обґрунтування теоретичних положень цифрової трансформації та побудова імітаційної моделі, яка дозволяє дослідити вплив цифрової трансформації на економічну ефективність підприємства. В роботі розглянуто теоретичні положення цифрової трансформації та формування механізмів підвищення економічної ефективності підприємства за допомогою імітаційного моделювання [3].

У статті Пузирьова П. та Садовського Є. досліджено роль та значення ІТ-кластерів як ключових елементів цифрової екосистеми, що сприяють інноваціям, економічному зростанню та досягненню цілей сталого розвитку. Доведено, що цифрова трансформація передбачає впровадження новітніх технологій у бізнес, урядування та соціальну сферу, а сталий розвиток забезпечує їхню гармонійну інтеграцію з урахуванням екологічних, соціальних і економічних чинників [4]. Практичний інтерес представляє монографія «Інформаційне суспільство: сучасні трансформації» [5]. Авторами доведено, що цифрова трансформація передбачає впровадження новітніх технологій у бізнес, урядування та соціальну сферу, а сталий розвиток забезпечує їхню гармонійну інтеграцію з урахуванням екологічних, соціальних і економічних чинників. Обґрунтовано, що впровадження цифровізації в економіку спричиняє ряд загроз, основна з яких є зростання рівня кіберзлочинності. Визначено основні види кіберзлочинів та змодельовано динаміку головної загрози розвитку цифрової економіки – кіберзлочинність – задля оптимізації управління економічними системами. Теоретико-методичні основи кластеризації як інструменту управління інноваційно-інвестиційним розвитком промислових підприємств, моделювання колаборацією в інноваційних кластерах, інноваційні аспекти кластерних ініціатив в умовах цифровізації економіки України, проблеми та підходи до розвитку концепцій інноваційних кластерних об'єднань, актуалізація використання кластерної моделі в інноваційному розвитку економіки України та інші питання розглянуто у численних наукових працях [6-22]. У той же час, моделюванню поетапної

цифрової трансформації та визначенню ефективності цих процесів увага приділена недостатньо. Це і визначило мету статті.

**Виклад основного матеріалу.** Розробимо модель поетапної цифрової трансформації кластеру. Вона повинна бути специфічно адаптована до високотехнологічного, наукоємного виробництва, складної кооперації (підприємств, КБ, університетів), необхідності дотримання високих стандартів безпеки та якості, інтеграції елементів Industry 4.0 та штучного інтелекту [7-10]. Закладемо у модель 5 послідовних етапів, які враховують технологічну готовність, управлінську спроможність та ступінь кооперації між учасниками кластеру.

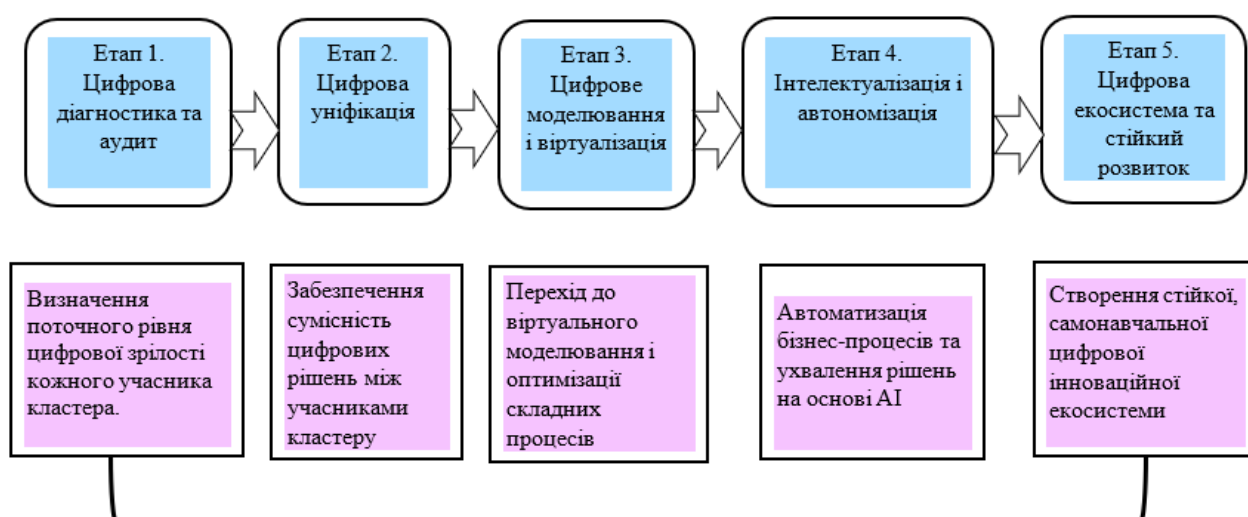


Рисунок 1 – Модель поетапної цифрової трансформації виробничого кластеру

Визначимо сутність кожного етапу [9-14].

*Етап 1.* Цифрова діагностика та аудит. Мета етапу – визначити поточний рівень цифрової зрілості кожного учасника кластера. Для цього потрібно здійснити наступні кроки.

Крок 1. Оцінка рівня автоматизації виробництва, управління, НДДКР.

Крок 2. Аудит цифрової інфраструктури (ERP, CAD/CAM, CRM, PLM).

Крок 3. Ідентифікація «цифрових розривів» у кооперації між підприємствами.

Крок 4. Визначення цифрових пріоритетів на рівні кластеру [14-15].

Реалізація цих задач досягається з використанням таких інструментів, як Digital Maturity Assessment, SWOT/PEST, опитування, експертні панелі.

*Етап 2.* Цифрова уніфікація. Мета цього етапу – забезпечити сумісність цифрових рішень між учасниками кластеру. Для цього потрібно здійснити наступні кроки.

Крок 1. Впровадження єдиних форматів даних (наприклад, STEP, XML, цифрові паспорти виробів).

Крок 2. Розробка протоколів обміну інформацією між CAD/PDM/ERP системами.

Крок 3. Впровадження кластерного цифрового хабу (Digital Integration Platform).

Крок 4. Гармонізація політик кібербезпеки.

Реалізація цих задач досягається з використанням таких інструментів, як API, OPC-UA, хмарні сховища, блокчейн для захисту ІВ.

*Етап 3.* Цифрове моделювання і віртуалізація. Мета етапу – перехід до віртуального моделювання і оптимізації складних процесів. Для цього потрібно здійснити наступні кроки.

Крок 1. Впровадження Digital Twin для складних виробів/агрегатів.

Крок 2. Застосування AI/ML для прогнозного техобслуговування.

Крок 3. Створення спільного віртуального середовища R&D (Co-Design Lab).

Крок 4. Імітаційне моделювання виробничих ліній (цифрова фабрика).

Реалізація цих задач досягається з використанням таких інструментів, як API, OPC-UA, хмарні сховища, блокчейн для захисту ІВ, Siemens NX, ANSYS, Dassault DEXPERIENCE, Azure Digital Twins.

*Етап 4.* Інтелектуалізація і автономізація. Мета етапу – автоматизація бізнес-процесів та ухвалення рішень на основі AI. Для цього потрібно здійснити наступні кроки.

Крок 1. Впровадження систем розподіленого виробництва (smart factory cells).

Крок 2. AI-кероване планування виробництва і логістики.

Крок 3. Вбудовані сенсори та IoT для збору даних у реальному часі.

Крок 4. Інтелектуальний прогноз попиту/ресурсів для R&D.

Це досягається з використанням таких інструментів, як AI/ML, IoT, edge computing, MES/APS-системи.

*Етап 5.* Цифрова екосистема та стійкий розвиток. Мета етапу – створити стійку, самонавчальну цифрову інноваційну екосистему. Для цього потрібно здійснити наступні кроки.

Крок 1. Створення Центрального інтелектуального модуля кластеру на базі AI+Foresight-технологій.

Крок 2. Підключення до міжнародних цифрових платформ (Horizon Europe, EIT).

Крок 3. Впровадження ESG-моніторингу через цифрові інструменти.

Крок 4. Підтримка стартапів через внутрішній кластерний інкубатор. Це досягається з використанням таких інструментів, як foresight-платформи, цифрові моделі сталого розвитку, ESG-аналітика.

Під час моделювання слід враховувати, що у кластері "Мехатроніка" можуть бути різні різні цифрової зрілості учасників, а тому потрібна адаптивна стратегія впровадження. Важливо також передбачити пілотні проекти на рівні підкластерів (наприклад: Digital Twin для окремого вузла літального апарату). Доцільна також участь освітніх закладів у розробці цифрових кадрів через навчальні модулі в CAD, PLM, AI тощо.

Розробимо аналітичну модель оцінки ефективності поетапної цифрової трансформації кластера, яку можна використати для кількісного обґрунтування змін. Вона повинна враховувати не лише цифрову зрілість, а й економічні, інноваційні та організаційні показники. Кожен етап трансформації оцінюється за індексом ефективності.

1. Загальний вигляд моделі ефективності цифрової трансформації.

Позначимо:  $E_i$  – інтегральна ефективність  $i$ -го етапу;  $W_j$  – вага  $j$ -го критерію на цьому етапі,  $K_{ij}$  – нормалізоване значення показника  $j$  на  $i$ -му етапі (в межах  $[0;1]$ ),  $n$  – кількість критеріїв на етапі.

Розробимо формулу для кожного етапу цифрової трансформації. Спочатку визначемо етапи та ключові критерії визначення ефективності цифрової трансформації кластера.

*Етап 1. Цифрова діагностика.* Критерії:  $K_{11}$  – ступінь цифрової зрілості підприємств (за шкалою Digital Maturity Index);  $K_{12}$  – рівень автоматизації бізнес-процесів;  $K_{13}$  – частка цифрових даних у загальному обсязі документообігу.

Індикатор ефективності ( $E_1$ ):

$$E_1 = 0,4 \cdot K_{11} + 0,3 \cdot K_{12} + 0,3 \cdot K_{13}, \quad (1)$$

де:  $K_{11}$  – найбільш значущий (ступінь цифрової зрілості підприємств) → основа всієї трансформації,  $K_{12}$  та  $K_{13}$  — важливі, але вторинні критерії (автоматизація та цифровізація документообігу).

*Етап 2. Цифрова уніфікація.* Критерії:  $K_{21}$  – ступінь інтеграції цифрових систем між учасниками;  $K_{22}$  – уніфікація форматів даних;  $K_{23}$  – зниження часу на обмін технічною документацією. Індикатор ефективності ( $E_2$ ):

$$E_2 = 0,5 \cdot K_{21} + 0,25 \cdot K_{22} + 0,25 \cdot K_{23}, \quad (2)$$

де  $K_{21}$  (інтеграція систем) – критичний для уніфікації та основна вага. Формати даних та час обміну ( $K_{22}$  та  $K_{23}$ ) – підтримуючі чинники.

*Етап 3. Віртуалізація та цифрове моделювання.* Критерії:  $K_{31}$  – кількість цифрових двійників у використанні;  $K_{32}$  – скорочення витрат на проектування;  $K_{33}$  – кількість цифрових прототипів, що замінили фізичні. Індикатор ефективності ( $E_3$ ):

$$E_3 = 0,3 \cdot K_{31} + 0,4 \cdot K_{32} + 0,3 \cdot K_{33}. \quad (3)$$

*Етап 4. Інтелектуалізація.* Критерії:  $K_{41}$  – частка рішень, автоматизованих з використанням AI;  $K_{42}$  – скорочення людських помилок у виробництві;  $K_{43}$  – кількість використаних IoT – датчиків на одиницю продукції. Індикатор ефективності ( $E_4$ ):

$$E_4 = 0,4 \cdot K_{41} + 0,3 \cdot K_{42} + 0,3 \cdot K_{43}. \quad (4)$$

*Етап 5. Цифрова екосистема.* Критерії:  $K_{51}$  – рівень синергії кластеру (кількість спільних цифрових проєктів);  $K_{52}$  – частка учасників, що

використовують кластерну цифрову платформу;  $K_{53}$  – зовнішнє цифрове позиціонування (кількість міжнародних партнерств). Індикатор ефективності ( $E_5$ ):

$$E_5 = 0,35 \cdot K_{51} + 0,4 \cdot K_{52} + 0,25 \cdot K_{53}. \quad (5)$$

У формулах (3, 4, 5) – найбільша вага присвоєна ключовому драйверу ефективності етапу, решта – підтримка. У реальному кейсі можна змінити ваги. Якщо в кластері ще не впроваджено цифрових двійників – вага  $K_{31}$  має бути меншою, бо фактор поки не дієвий. Якщо держава стимулює IoT – можна підняти вагу  $K_{43}$ .

Вага 0,5 означає, що критерій визначає основну частину успіху етапу, вага 0,4 означає дуже значущу складову, вага 0,3 – середній вплив, але важливий, та вага 0,25 – допоміжний підтримуючий фактор.

3. *Загальний інтегральний показник ефективності цифрової трансформації (ІЕЦТ) кластера* визначемо по формулі (6):

$$ІЕЦТ = w_1 \cdot E_1 + w_2 \cdot E_2 + w_3 \cdot E_3 + w_4 \cdot E_4 + w_5 \cdot E_5, \quad (6)$$

де:  $W_i$  – вага значущості кожного етапу (наприклад, якщо всі етапи однаково важливі,  $w_i = 0,2$ ).

Це модель поетапної оцінки ефективності цифрової трансформації, яку можна використовувати для аудиту прогресу кластера, візуалізувати у вигляді *radar chart* (павутинної діаграми), або інтегрувати в дашборд системи моніторингу трансформації. Вагові коефіцієнти у формулах (наприклад, 0,4, 0,3, 0,25) – це частки важливості кожного критерію в загальному індикаторі ефективності етапу. Вони використовуються для того, щоб показати відносну значущість критеріїв, збалансувати внесок кожного критерію до загального результату та уникнути викривлень при різному впливі факторів.

Можна виділити три основні підходи до вибору цих ваг: експертна оцінка, аналітична ієрархічна процедура та емпіричне коригування.

1. *Експертна оцінка* найчастіше використовується у випадках, коли формується фокус-група або панель експертів (керівники підприємств, IT-архітектори, аналітики, представники кластеру), коли кожен експерт оцінює важливість кожного критерію в рамках етапу (наприклад, за шкалою від 1 до 10)

та коли визначаються ваги як частка у сумарному впливі після нормалізації отриманих оцінок.

Наприклад, на етапі цифрової уніфікації експерти вирішили, що інтеграція систем (K<sub>21</sub>) має вирішальне значення, тому вона отримала 0,5, а інші по 0,25.

2. *Аналітична ієрархічна процедура (АНП)*. Цей метод використовують у наукових дослідженнях, він математично обґрунтований, тому що дозволяє побудову парних порівнянь між критеріями (наскільки один важливіший за інший) та обраховує ваги на основі матриці порівнянь на основі алгоритму.

3. *Емпіричне коригування*. Якщо є доступ до історичних даних про результати кластерів, то можна побачити, які саме критерії найсильніше впливали на успіх (напр. через кореляційний аналіз). У такому разі ваги задаються на основі емпіричного впливу.

У процесі цифрової трансформації інноваційного виробничого кластеру (зокрема, у контексті аерокосмічного кластеру «Мехатроніка») доцільно застосовувати поетапну аналітичну модель оцінювання, що дозволяє визначати ефективність впровадження цифрових рішень на кожному ключовому етапі трансформації. Така модель базується на принципі багатокритеріального оцінювання, згідно з яким для кожного етапу цифрової трансформації розраховується інтегральний індекс ефективності  $E_i$ , що враховує значущість окремих показників (критеріїв) та їхню нормалізовану оцінку. Інтегральна ефективність етапу обчислюється за формулою (7):

$$E_i = \sum_{j=1}^n W_j \cdot K_{ij} \quad (7)$$

де:  $E_i$  – ефективність цифрової трансформації на  $i$ -му етапі;  $K_{ij}$  – нормалізоване значення  $j$ -го показника на цьому етапі (в інтервалі  $[0;1]$ );  $W_j$  – ваговий коефіцієнт значущості  $j$ -го показника (використовується метод експертного оцінювання або АНР-аналіз);  $n$  – кількість показників, що характеризують  $i$ -й етап.

2. Структура поетапної оцінки ефективності цифрової трансформації.

Процес цифрової трансформації кластеру розподілемо на п'ять ключових етапів (табл. 1).

Таблиця 1 – Етапи процесу цифрової трансформації кластеру.

Етап	Назва етапу	Основні критерії оцінки
1	Цифрова діагностика	Цифрова зрілість, автоматизація процесів, частка цифрового документообігу
2	Уніфікація систем	Сумісність систем, єдність форматів, швидкість обміну тех. документацією
3	Віртуалізація	Digital Twins, скорочення витрат на проектування, цифрове прототипування
4	Інтелектуалізація	Рівень AI-автоматизації, зниження помилок, застосування IoT
5	Цифрова екосистема	Синергія, загальнодоступні цифрові платформи, міжнародна кооперація

На кожному етапі окремі індикатори нормалізуються в шкалі [0–1] (наприклад, шляхом лінійної нормалізації), після чого підсумовуються з урахуванням вагових коефіцієнтів.

3. Розрахунок загальної ефективності цифрової трансформації кластеру. Загальний індекс цифрової трансформації кластеру обчислюється як зважена сума ефективностей усіх етапів:

$$E_{total} = \sum_{i=1}^5 V_i \cdot E_i, \tag{3}$$

де:  $E_{total}$  – узагальнений індекс ефективності цифрової трансформації кластеру;  $E_i$  – індекс ефективності на  $i$ -му етапі;  $V_i$  — вага значущості  $i$ -го етапу (за експертною оцінкою або через аналіз стратегічних пріоритетів кластеру).

4. Нормалізація індикаторів. Для забезпечення порівнянності всіх критеріїв, значення кожного показника нормалізуємо за формулою (4):

$$K_{ij} = \frac{X_{ij} - X_j^{min}}{X_j^{max} - X_j^{min}}, \tag{4}$$

де  $X_j^{min}$ ,  $X_j^{max}$  – мінімальне і максимальне значення у вибірці.

У випадку негативно орієнтованих показників (де менше – краще), формула інвертується.

5. *Інтерпретація результатів.* Значення  $E_{total}$  інтерпретується як рівень цифрової ефективності кластеру:

0,0–0,2 – критично низький рівень цифрової інтеграції;

0,2–0,4 – фрагментарна цифровізація;

0,4–0,6 – базовий рівень цифрового розвитку;

0,6–0,8 – системна цифровізація;

0,8–1,0 – високий рівень цифрової зрілості кластеру.

Запропонована методика є універсальною та може адаптуватися під конкретний галузевий кластер шляхом деталізації критеріїв, зміни вагових коефіцієнтів та оновлення порогових значень ефективності. На рис.2 зображено ефективність цифрової трансформації по етапах.

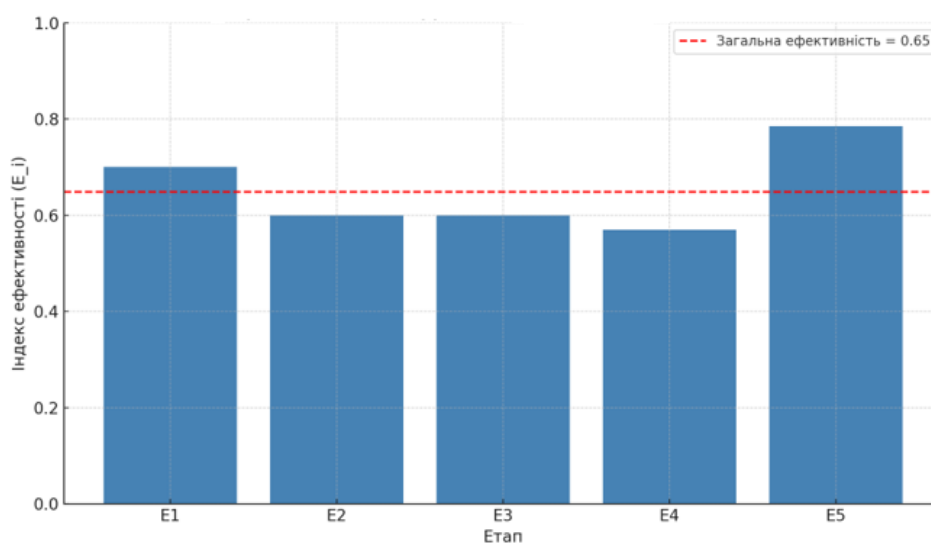


Рисунок 2 – Діаграма ефективності цифрової трансформації по етапах.

Зображена на рис. 2 діаграма ілюструє індекс ефективності на кожному з виділених у табл. 1 п'яти етапів процесу цифрової трансформації кластеру та показує червоною лінією загальну інтегральну ефективність кластеру.

Важливою задачею для інноваційних кластерів є забезпечення ефективної безперервної взаємодії, обміну даними між членами кластеру, автоматизація

рішень і гнучке управління інноваціями. Вирішення цієї задачі забезпечується на основі інтеграції таких компонентів, як цифрові платформи, хмарні рішення, Digital Twin і штучний інтелект (AI). Розглянемо сутність, задачі, механізми інтеграції, очікувані наслідки інтеграції цифрових платформ, хмарних рішень, Digital Twin, AI. Розглянемо сутність та задачі цих компонентів інтеграції. Інтеграція у цьому контексті – це створення єдиної цифрової екосистеми для всіх учасників кластеру (підприємств, наукових центрів, освітніх закладів), яка забезпечує безперервну взаємодію, обмін даними, автоматизацію рішень і гнучке управління інноваціями.

**Цифрові платформи.** Їх сутність полягає у створенні цифрової інфраструктури кластеру (наприклад, кластерний Digital Hub), яка поєднує всі сервіси, модулі та учасників кластеру. Основні задачі цифрової інфраструктури полягають у об'єднанні виробничих та R&D-процесів, веденні єдиних цифрових профілів підприємств, координації інноваційних проєктів та забезпеченні прозорої комунікації. Прикладом можуть бути Siemens MindSphere, Bosch IoT Suite, кластерні ERP/CRM-системи.

**Хмарні рішення (Cloud Solutions).** Сутність цього компоненту полягає у тому, що хмарні технології забезпечують зберігання, обробку та доступ до даних у реальному часі. Основні задачі: спільний доступ до інфраструктури (IaaS), платформ (PaaS), програм (SaaS); мобільність – можливість підключення будь-якого учасника; масштабованість: додавання нових потужностей або партнерів без втрат часу. Очікувані ефекти можуть проявлятися у зниженні витрат на ІТ-інфраструктуру, швидкому розгортанні рішень та підвищенні кібербезпеки через централізований захист.

**Наступний компонент – цифровий двійник (Digital Twin) [16].** Це цифрова копія реального об'єкта (машини, процесу, виробничої лінії), яка синхронізується з фізичним прототипом у режимі реального часу. Задачі цифрових двійників полягають у моделюванні та симуляції виробництва, прогнозуванні поломок (predictive maintenance), оптимізації енергоспоживання та логістики, навчанні та тестуванні без ризику для обладнання. Наприклад, завод

має цифрову копію всієї лінії з реальними датчиками — зміни температури чи вібрацій одразу виявляються, аналізуються AI і видаються рекомендації.

**Штучний інтелект (AI).** AI забезпечує аналіз даних, ухвалення рішень, автоматизацію управління, прогнозування тенденцій, генерацію нових рішень (Generative AI). Його основні задачі полягають у інтелектуальній аналітиці даних із сенсорів, CRM, ERP, автоматизованому управлінні виробництвом, оптимізації логістичних ланцюгів, персоналізації продуктів (AI-моделі для продуктового дизайну).

### 3. Механізми інтеграції.

**A. API<sup>1</sup>[18] та IoT<sup>2</sup>[19] – шлюзи** забезпечують з'єднання між цифровими системами (наприклад, Digital Twin ↔ AI ↔ Cloud). IoT-шлюзи передають дані із сенсорів у цифрову екосистему

**B. Єдиний кластерний Digital Hub** служить як операційна система для кластеру: вбудовані модулі комунікації, реєстрів, аналітики, управління ризиками та має інтегровані цифрові паспорти підприємств і проєктів.

Digital Hub –<sup>3</sup> це широкий термін, який може означати як центри цифрової експертизи та інновацій, так і платформи для надання цифрових послуг, а також комплекс програм і технологій, що забезпечують цифровізацію. По суті, це

<sup>1</sup> API (Application Programming Interface) — це спосіб взаємодії комп'ютерних програм між собою. Це набір готових класів, процедур, функцій, структур і констант, що надаються додатком (бібліотекою, сервісом) для використання в зовнішніх програмних продуктах. API надає нам можливість використовувати чужі напрацювання в своїх цілях. Шлюз API надає централізовану точку входу для керування взаємодією між клієнтами та службами додатків. Він виступає як зворотний проксі-сервер і надсилає клієнтам запити до відповідних служб. Крім того, він може виконувати різні міжсесивні завдання, такі як автентифікація, завершення SSL, взаємне tls і обмеження швидкості. Навіщо використовувати шлюз API? Він виступає як посередник і запобігає прямому впливу служб додатків клієнтам. Без шлюзу API клієнти повинні безпосередньо взаємодіяти з окремими службами додатків, що може призвести до проблем у стосунках із клієнтами. Шлюз API це інструмент, який діє як єдина точка входу для інтерфейсів прикладного програмування (API). По суті, він керує, маршрутизує та контролює трафік між клієнтами та серверними службами. Це дозволяє різним службам працювати незалежно одна від одної, особливо в архітектурах мікросервісів, одночасно забезпечуючи послідовний і керований інтерфейс із зовнішнім світом.

<sup>2</sup> Шлюз IoT (інтернет речей) по суті є розумний центральний концентратор для пристроїв IoT. Пристрої-шлюзи IoT з'єднують пристрої Інтернету речей (IoT) із хмарою та один з одним, перетворюючи зв'язок пристроїв IoT і фільтруючи дані в корисну інформацію. Серверні платформи (керування даними, пристроями та абонентами) і кінцеві пристрої (сенсори, виконавчі механізми або більш складні пристрої) підключаються до шлюзу IoT за допомогою комунікаційних технологій. Він має обчислювальну платформу, яка дозволяє попередньо встановленим або визначеним користувачем програмам керувати даними, пристроями, безпекою, зв'язком та іншими функціями, пов'язаними зі шлюзом (для маршрутизації та обчислення)

<sup>3</sup> Основні значення терміну "Digital Hub. – Європейські цифрові інноваційні хаби (European Digital Innovation Hubs - EDIHs): це стратегічні партнери для бізнесу, які допомагають у цифровій трансформації, надаючи підтримку впровадження нових технологій, цифровізації та підвищення конкурентоспроможності. Платформи для надання цифрових послуг. Наприклад, "Digital HUB" може бути платформою, яка дозволяє телекомунікаційним компаніям запускати OTT-сервіси в різних країнах або надавати можливість оплати контенту з мобільного рахунку, як у випадку з групою компаній VimpelCom. Комплекс професій та послуг у сфері цифрових технологій. У ширшому розумінні "Digital Hub" може асоціюватися з компаніями або центрами, що займаються професійною розробкою сайтів, тестуванням ПЗ, веденням проєктів у соціальних мережах (SMM), а також іншими послугами, пов'язаними з цифровим маркетингом та розвитком бізнесу. Українські освітні хаби (Цифрові освітні центри). Мережа таких хабів реалізує концепцію навчання протягом життя, спрямовану на розвиток людського капіталу, зокрема через цифрову освіту.

центральний вузол, навколо якого організована діяльність або надання послуг у цифровій сфері [22].

**С. Edge Computing + Cloud.** Частина обробки даних відбувається на периферії (ближче до обладнання), частина – у хмарі. Це дозволяє швидко реагувати на події без затримок.

#### 4. Очікувані наслідки.

Таблиця 3 – Очікувані наслідки впливу процесів інтеграції на стан кластеру.

Категорія	Очікуваний ефект
Технологічний розвиток	Скорочення часу розробки і впровадження інновацій
Економічна ефективність	Зниження витрат на утримання інфраструктури, підвищення продуктивності
Гнучкість кластеру	Можливість швидко масштабувати або змінювати напрям діяльності
Підвищення якості	Контроль параметрів у реальному часі, самонавчальні системи контролю якості
Кооперація та синергія	Глибша інтеграція між учасниками кластеру, обмін ноу-хау, спільне використання даних
Кіберзахист	Централізована система управління ризиками, AI-підтримка кіберзахисту
Сталий розвиток	Оптимізація енергоспоживання, зниження впливу на довкілля через розумне управління процесами

Стратегічна доцільність інтеграції полягає у інтеграції цифрових платформ, хмарних технологій, Digital Twin і AI. Це не просто технічна модернізація, а стратегічний імператив для інноваційних кластерів, що прагнуть вийти на глобальні ринки, залучати інвестиції та забезпечити технологічне лідерство.

#### Висновки.

1. У роботі запропоновано модель поетапної цифрової трансформації виробничого кластеру, яка враховує специфіку кластерної взаємодії, рівень цифрової зрілості учасників та логіку впровадження цифрових рішень.
2. Модель дозволяє покроково планувати цифрову трансформацію, забезпечуючи стратегічну узгодженість рішень, гнучке управління ресурсами та моніторинг досягнення цілей.

3. Розроблений підхід може бути адаптований для різних типів кластерів (моногалузевих, мультигалузевих) та сприяти обґрунтованому прийняттю управлінських рішень на регіональному й національному рівнях.
4. Подальші дослідження доцільно спрямувати на практичну реалізацію моделі у вигляді цифрового двійника (digital twin) кластера з можливістю симуляції і прогнозування результатів трансформації.

### БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. Черчик Л., Бегун С. Моделювання залежностей обсягів виробництва продукції від чинників праці в умовах цифрової трансформації. Економічний часопис Волинського національного університету імені Лесі Українки. № 1(41), С. 167–175. DOI: <https://doi.org/10.29038/2786-4618-2025-01-167-175> . DOI:
2. Бізнес-моделі для сталого розвитку: виклики та цифрова трансформація [Електронний ресурс] : тези доповідей Міжнар. наук.-практ. конф. (15-16 лютого 2024 р., м. Харків, Україна) – Харків : ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2024. (PDF 393 с.)
3. Кочерга, В. І. Імітаційне моделювання впливу цифрової трансформації на економічну ефективність підприємства : дипломна робота бакалавра : 051 Економіка / Кочерга Вероніка Ігорівна. Київ, 2025. 90 с. URI : <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/75315>
4. Пузирьова П., Садовський Є. Екосистема інноваційних кластерів в контексті цифрової трансформації сталого розвитку. *Вчені записки Університету «КРОК»*, 2025. №1(77), 42–53. URL: <https://doi.org/10.31732/2663-2209-2025-77-42-53>
5. Інформаційне суспільство: сучасні трансформації : монографія. Вінниця, Могильов. 2020 URI: <http://ir.vtei.edu.ua/card.php?id=27780>
6. Войнич Л. Кожель П. Теоретико методичні основи кластеризації як інструменту управління інноваційно інвестиційним розвитком промислових підприємств. *Вісник Львівського національного університету природокористування. Серія : Економіка АПК*, 2024. №31. С. 135–145. <https://doi.org/10.31734/economics2024.31.019>.
7. Живко З. Б., Райковська І. Т., Ковтун О. А., Кургузенкова Л. А. Система ризик-менеджменту підприємств сфери послуг при формуванні інноваційних кластерів. *Формування ринкових відносин в Україні*, 2023. №7-8. С. 59–66. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.8420789>.
8. Залозна Ю. С. Солдак М. О. Міжнародний високотехнологічний кластер як складова сучасної концепції європейської інтеграції до науково-освітнього та інноваційного простору. *Вісник економічної науки України*, 2021. №2(41). С. 113–126. URL: [https://doi.org/10.37405/1729-7206.2021.2\(41\).113-126](https://doi.org/10.37405/1729-7206.2021.2(41).113-126).
9. Кудин С. І. (2023). Кластери як основа інноваційного розвитку бізнесу в регіонах України. *Ефективна економіка*, URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/efek\\_2023\\_6\\_24](http://nbuv.gov.ua/UJRN/efek_2023_6_24). <http://doi.org/10.32702/2307-2105.2023.6.22>.
10. Кукса І. М., Гнатенко І. А., Вараксіна О. В., Матієнко-Зубенко І. І. А. В. Черевко. Моделювання колаборацією в інноваційних кластерах: управління інституціональними змінами, конкурентоспроможністю, фінансовою та логістичною інфраструктурою в умовах сталого розвитку агропродовольчої сфери. *Формування ринкових відносин в Україні*, 2021. №10, 59–68. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.5807302>.
11. Кластерна політика інноваційного розвитку національної економіки : інтеграційний та інфраструктурний аспекти : монографія / За загальною редакцією д.е.н., проф. С. В. Смерічевської. Познань : Wydawnictwo naukowe WSPIA, 2020. 382 с.

12. Інформаційне суспільство: сучасні трансформації: монографія / За ред. У. Лешко; Вінницький державний педагогічний університет імені Михайла Коцюбинського. Вінниця: ФОП Корзун Д.Ю., 2020. 401 с.

13. Варга В. П. Діджиталізація як один з чинників конкурентоспроможності підприємства. *Ефективна економіка*, 2020. № 8. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=8121> (дата звернення: 21.07.2025). DOI: 10.32702/2307-2105-2020.8.154

14. Цифрова економіка: Вплив інформаційно-комунікаційних технологій на людський капітал та формування компетентностей майбутнього: монографія / Л. Л. Антонюк, Д. О. Ільницький, Л. О. Лігоненко, О. О. Денісова та ін.; за ред. Антонюк Л., Ільницького Д., Севастюк А.. Київ : КНЕУ, 2021. 337 с.

15. Цифровізація як чинник економічної трансформації та соціально-економічної безпеки України: теорія, практика, перспективи : колективна монографія / за ред. А. В. Череп, І. М. Дашко, Ю. О. Огренич, О. Г. Череп. Рига, Латвія : Baltija Publishing, 2025. 376 с.

16. Бачити майбутнє: як цифрові двійники змінюють світ довкола нас. URL: <https://epravda.com.ua/publications/2024/09/19/719518/>

17. Тренди Pot – Індустріальний інтернет речей. URL: <https://smart-eam.com/ua/news/trend-iiot/>

18. Модель зрілості кластерів – роль метчмейкінгу та як його включити. URL: <https://www.clusters.org.ua/instrumenti-klasterного-koordinatora/model-zrilosti-klasteriv/>

19. Мехович С.А., Лаушкін А.М. Моделювання цифрових КРІ у міжнародних економічних відносинах. *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит*, 2025. № 4(207). С.74–94.

20. Шлюз API (Application Programming Interface). URL: <https://www.hostragons.com/uk/>

21. Шлюз IoT(інтернет речей). URL:<https://www.dusuniot.com/uk/blog/what-is-an-iot-gateway>

22. Європейські цифрові інноваційні хаби – це центри, які допомагають малому й середньому бізнесу та державним організаціям впроваджувати цифрові технології у свої проекти й розвивати місцеву екосистему інновацій. URL: <https://www.iamcluster.zp.ua/cluster-news>

## REFERENCES:

1. Cherchyk L., Behun S. Modeliuvannya zalezhnosti obsiahiv vyrobnytstva produktsii vid chynnykiv pratsi v umovakh tsyfrovoy transformatsii. *Ekonomichniy chasopys Volynskoho natsionalnogo universytetu imeni Lesi Ukrainky*. № 1(41), S. 167–175. DOI: <https://doi.org/10.29038/2786-4618-2025-01-167-175> . DOI:

2. Biznes-modeli dlia staloho rozvytku: vyklyky ta tsyfrova transformatsiia [Elektronnyi resurs] : tezy dopovidei Mizhnar. nauk.-prakt. konf. (15-16 liutoho 2024 r., m. Kharkiv, Ukraina) – Kharkiv : KhNU im. V. N. Karazina, 2024, (PDF 393 s.)

3. Kocherha, V. I. Imitatsiine modeliuvannya vplyvu tsyfrovoy transformatsii na ekonomichnu efektyvnist pidpriemstva : diplomna robota ... bakalavra : 051 *Ekonomika* / Kocherha Veronika Ihorivna. Kyiv, 2025. 90 s. URI : <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/75315>

4. Puzyrova P., Sadovskyi Ye. Ekosystema innovatsiinykh klasteriv v konteksti tsyfrovoy transformatsii staloho rozvytku. *Vcheni zapysky Universytetu «KROK»*, 2025. №1(77), P. 42–53. URL: <https://doi.org/10.31732/2663-2209-2025-77-42-53>

5. Informatsiine suspilstvo: suchasni transformatsii : monohrafiia. Vinnytsia, Mohylov. 2020  
URI: <http://ir.vtei.edu.ua/card.php?id=27780>

6. Voinycha L., Kozhel P. Teoretyko metodychni osnovy klasteryzatsii yak instrumentu upravlinnia innovatsiino investytsiynym rozvytkom promyslovykh pidpriemstv. *Visnyk Lvivskoho natsionalnogo universytetu pryrodokorystuvannya. Seriiia : Ekonomika APK*, 2024. №31. P. 135–145. <https://doi.org/10.31734/economics2024.31.019>.

7. Zhyvko Z. B., Raikovska I. T., Kovtun O. A. Kurhuzenkova L. A. Systema ryzyk-menedzhmentu pidpriemstv sfery posluh pry formuvanni innovatsiinykh klasteriv. *Formuvannya rynkovykh vidnosyn v Ukraini*, 2023. №7-8. P. 59–66. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.8420789>.

8. Zaloznova Yu. S. Soldak M. O. Mizhnarodnyi vysokotekhnolohichniy klaster yak skladova suchasnoi kontseptsii yevropeiskoi intehratsii do naukovo-osvitnoho ta innovatsiinoho prostoru. *Visnyk*

- ekonomichnoi nauky Ukrainy*, 2021. №2(41). P. 113–126. URL: [https://doi.org/10.37405/1729-7206.2021.2\(41\).113-126](https://doi.org/10.37405/1729-7206.2021.2(41).113-126).
9. Kudyn, S. I. Klasteri yak osnova innovatsiinoho rozvytku biznesu v rehionakh Ukrainy. *Efektivna ekonomika*, 2023. № 6. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/efek\\_2023\\_6\\_24](http://nbuv.gov.ua/UJRN/efek_2023_6_24). <http://doi.org/10.32702/2307-2105.2023.6.22>.
10. Kuksa I. M., Hnatenko I. A., Varaksina O. V., Matiienko-Zubenko I. I., A. V. Cherevko. Modeliuvannia kolaboratsiieiu v innovatsiinykh klasterakh: upravlinnia instytutsionalnymy zminamy, konkurentospromozhnistiu, finansovoiu ta lohistychnoiu infrastrukturoiu v umovakh staloho rozvytku ahroprodovolchoi sfery. *Formuvannia rynkovykh vidnosyn v Ukraini*, 2021. №10, 59–68. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.5807302>.
11. Klasterna polityka innovatsiinoho rozvytku natsionalnoi ekonomiky : intehratsiinyi ta infrastrukturnyi aspekty : monohrafiia / Za zahalnoi redaktsiieiu d.e.n., prof. S. V. Smerichevskoi. Poznan : Wydawnictwo naukowe WSPA, 2020. 382 s.
12. Informatsiine suspilstvo: suchasni transformatsii: monohrafiia / Za red. U. Leshko; Vinnytskyi derzhavnyi pedahohichnyi universytet imeni Mykhaila Kotsiubynskoho. Vinnytsia: FOP Korzun D.Iu., 2020. 401 s.
13. Varha V. P. Didzhitalizatsiia yak odyin z chynnykiv konkurentospromozhnosti pidpriemstva. *Efektivna ekonomika*, 2020. № 8. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=8121> (data zvernennia: 21.07.2025). DOI: 10.32702/2307-2105-2020.8.154
14. Tsyfrova ekonomika: Vplyv informatsiino-komunikatsiinykh tekhnolohii na liudskyi kapital ta formuvannia kompetentnosti maibutnoho: monohrafiia / L. L. Antoniuk, D. O. Ilnytskyi, L. O. Lihonenko, O. O. Denisova ta in.; za red. Antoniuk L., Ilnytskoho D., Sevastiuk A. Kyiv: KNEU, 2021. 337 s.
15. Tsyfrovizatsiia yak chynnyk ekonomichnoi transformatsii ta sotsialno- ekonomichnoi bezpeky Ukrainy: teoriia, praktyka, perspektyvy : kolektyvna monohrafiia / za red. A. V. Cherep, I. M. Dashko, Yu. O. Ohrenych, O. H. Cherep. Ryha, Latviia : Baltija Publishing, 2025. 376 s
16. Bachyty maibutnie: yak tsyfrovi dviinyky zminiuiut svit dovkola nas. URL: <https://pravda.com.ua/publications/2024/09/19/719518/>
17. Trendy IIot – Industrialnyi internet rechei. URL: <https://smart-eam.com/ua/news/trend-iiot/>
18. Model zrilosti klasteriv – rol metchmeikynhu ta yak yoho vkliuchyty. URL: <https://www.clusters.org.ua/instrumenti-klasterного-koordinatora/model-zrilosti-klasteriv/>
19. Mekhovych S.A., Laushkin A.M. Modeliuvannia tsyfrovyykh KPI u mizhnarodnykh ekonomichnykh vidnosynakh. *Enerhozberezhennia. Enerhetyka. Enerhoaudyt*, 2025. №4(207). S.74–94.
20. Shliuz API (Application Programming Interface). URL: <https://www.hostragons.com/uk/>
21. Shliuz IoT(internet rechei). URL: <https://www.dusuniot.com/uk/blog/what-is-an-iot-gateway>
22. Yevropeiski tsyfrovi innovatsiini khaby – tse tsenry, yaki dopomahaiut malomu y serednomu biznesu ta derzhavnym orhanizatsiiam vprovadzhuvaty tsyfrovi tekhnolohii u svoi proiekty y rozvyvaty mistsevu ekosystemu innovatsii. URL: <https://www.iamcluster.zp.ua/cluster-news>

Надійшла до редакції 17.05.2025 р.