УДК 338.45:69:004.9
DOI: https://doi.org/10.32782/2413-9971/2026-62-7

Дац А.Я.
аспірант,
Національний університет «Львівська політехніка»
ORCID: https://orcid.org/0009-0008-0200-1898

Dats Andrii
PhD Student,
Lviv Polytechnic National University

ФОРМУВАННЯ ЦИФРОВОЇ БІЗНЕС-МОДЕЛІ БУДІВЕЛЬНОГО ПІДПРИЄМСТВА НА ОСНОВІ ІМПЛЕМЕНТАЦІЇ ЦИФРОВОГО ІНСТРУМЕНТАРІЮ

Анотація. Актуальність дослідження зумовлена потребою системної інтеграції цифрових технологій у бізнес-моделі будівельних підприємств в умовах цифрової трансформації галузі. Мета статті – формалізація та апробація цифрової бізнес-моделі будівельного підприємства DBMCE як організаційно-економічного інструменту цифрової трансформації. Методологічну основу становлять метод аналізу ієрархій, метод головних компонент, кластерний і регресійний аналіз, аналіз чутливості та сценарне моделювання. Розкрито структуру моделі DBMCE, що охоплює блоки V–P–R–F–S та наскрізний цифровий рівень D, який інтегрує BIM, системи KPI/EVM, середовище спільних даних (CDE), ERP-системи та смарт-контракти. Обґрунтовано логіку взаємодії цифрових інструментів у системі управління будівельним підприємством. Практична цінність полягає у формуванні дорожньої карти поетапного впровадження цифрових технологій.

Ключові слова: DBMCE, цифрова трансформація, бізнес-модель, будівельне підприємство, BIM, KPI, CDE, AHP, цифрова зрілість.

Постановка проблеми. Цифрова трансформація будівельного підприємства дедалі менше може розглядатися як локальна автоматизація кошторисних, проєктних або облікових операцій. Економічний ефект виникає тоді, коли дані, цифрові моделі та показники виконання включені до єдиної логіки прийняття управлінських рішень і змінюють спосіб формування ціннісної пропозиції, організації процесів, використання ресурсів, фінансування та взаємодії із замовниками, інвесторами і підрядниками. Міжнародні дослідження продуктивності будівництва пов'язують потенціал цифровізації з 10D BIM, цифровою координацією, мобільною взаємодією та аналітикою, наголошуючи, що вигоди виникають передусім у разі інтегрованого, а не ізольованого використання інструментів [7, с. 99–100].

Для України проблема набуває додаткової ваги через потребу масштабного відновлення, підвищення прозорості фінансування і керованості інвестиційно-будівельних проєктів. Актуальні оцінки потреб відновлення формуються у міжсекторальній рамці, що вимагає від учасників ринку зіставних даних, простежуваності рішень і здатності обґрунтовувати витрати та результати [8, с. 15]. За таких умов цифрові інструменти мають бути інтегровані безпосередньо у бізнес-модель підприємства, інакше технологічні інвестиції не трансформуються в стабільний економічний результат.

Запропонована модель DBMCE формалізує бізнес-модель будівельного підприємства через п'ять базових блоків: V (Value Proposition – ціннісна пропозиція), P (Processes – ключові процеси), R (Resources – ресурси), F (Financial Model – фінансова модель), S (Stakeholders – стейкхолдери), а також наскрізний цифровий рівень D (Digital Layer), який забезпечує інтеграцію цифрового інструментарію в усі складові бізнес-моделі. Практичне завдання полягає не лише у виборі технології, а у визначенні послідовності її впровадження, ваги окремих блоків, очікуваного внеску у результативність та допустимих меж інтерпретації статистичних оцінок.

Наукова проблема, відповідно, полягає у поєднанні трьох рівнів, які в багатьох дослідженнях розглядаються окремо: архітектури бізнес-моделі; системи цифрових інструментів; кількісного контуру оцінювання та валідації. Для будівельного підприємства це особливо важливо через проєктний характер діяльності, множинність стейкхолдерів, часові лаги між інвестицією у цифрову інфраструктуру та економічним ефектом, а також високі вимоги до якості даних і доказовості управлінських рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних дослідженнях цифрової трансформації будівельних підприємств простежуються кілька взаємопов'язаних напрямів. По-перше, розвивається організаційно-економічний підхід, за яким результативність BIM та інших технологій залежить

© Дац А.Я., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)

від організаційних змін, освітнього потенціалу і спроможності підприємства сформувати цілісний механізм трансформації. Загорецька О.Я., Дац А.Я. обґрунтовують взаємозалежність BIM-інтеграції та розвитку людського капіталу, що зміщує акцент із технології як продукту на технологію як елемент організаційної системи [1, с. 1528–1537]. У подальшому нами розглядається BIM, контроль змін і KPI як складові конкурентоспроможної моделі діяльності підприємства та інвестиційного інструментарію [2, с. 2316–2328].

По-друге, емпіричні дослідження імплементації BIM показують необхідність кількісного оцінювання рівня цифровізації підприємств та факторів, що визначають його відмінності. Сорокіна Л.В. та інші розглядають моделювання рівня впровадження BIM на підприємствах як інструментарій, що дозволяє перейти від опису окремих цифрових практик до зіставлення підприємств за інтегральними параметрами та виявлення резервів підвищення результативності [3, с. 277–295]. Це створює основу для використання кластеризації, інтегральних індексів та інших методів сегментації цифрової зрілості.

По-третє, значна частина праць концентрується на цифрових інструментах управління конкретними параметрами проєкту. Бєлєнкова О.Ю. та інші розглядають цифровізацію як підприємств так і фінансування будівельних проєктів, акцентують на ролі інтегрованих інформаційних потоків у координації учасників і фінансовому контролі [4, с. 108–115]. Організаційно-економічні інструменти управління інвестиційними програмами за участю будівельних підприємств також розглядаються через цифровізацію управлінських процедур і взаємодії в праці Титок В.В. та інших [5, с. 1060–1066]. Левченко Н.М. наголошує, що для проєктів реконструкції BIM демонструє можливість зниження інформаційних втрат та підвищення керованості рішень на етапах відновлення об'єктів [6, с. 64–70].

Методичний блок дослідження спирається на усталені інструменти багатокритеріального та статистичного аналізу. Метод аналізу ієрархій AHP дає змогу формалізувати експертні пріоритети та контролювати узгодженість матриці попарних порівнянь T.L. Saati [9, с. 83–98]. Rousseeuw P. J. Silhouettes зауважив, що для обґрунтування кількості кластерів доцільним є silhouette-критерій, який оцінює співвідношення внутрішньокластерної компактності та відокремленості кластерів [10, с. 53–65]. За малих вибірок і наявності впливових спостережень коригування стандартних похибок за HC3 – робастний метод оцінювання стандартних похибок регресійної моделі, стійкий до гетероскедастичності та особливо доцільний для малих вибірок і за наявності впливових спостережень. HC3 підвищує надійність статистичного висновку порівняно зі звичайними стандартними похибками регресійної моделі, оціненої методом найменших квадратів (OLS-помилками) радять використати MacKinnon J. G., White H. [11, с. 305–325].

Разом із тим аналіз праць дає підстави виділити кілька невирішених аспектів. По-перше, недостатньо формалізовано, яким чином окремі цифрові рішення вбудовуються саме у структуру бізнес-моделі, а не лише у технологічний контур проєкту. По-друге, бракує єдиного індексного механізму, який поєднував би внесок цінності, процесів, ресурсів, фінансової моделі та стейкхолдерів з окремою оцінкою цифрової зрілості. По-третє, потребує посилення процедура перевірки стійкості висновків: вибір кількості кластерів, чутливість до ваг, впливові спостереження, мультиколінеарність та розмежування внутрішньої і зовнішньої валідності. Саме на ці невирішені складові орієнтована модель DBMCE.

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Метою статті є формалізація, кількісне обґрунтування та методична апробація моделі DBMCE як організаційно-економічного інструменту імплементації цифрових технологій у бізнес-моделях будівельних підприємств.

Для досягнення мети поставлено такі взаємопов'язані завдання: визначити функціональну архітектуру DBMCE та роль наскрізного цифрового рівня D; сформувати інтегральний показник і систему ваг блоків на основі AHP; оцінити взаємозв'язок між BIM, KPI-системами, CDE, ERP і результативністю; перевірити факторну придатність, кластерну структуру, робастність регресійних оцінок і чутливість ранжування; провести сценарну апробацію «до/після»; розмежувати результати, що мають емпіричну основу, та результати, отримані на синтетичному масиві для технічної перевірки алгоритму; сформувати практичну дорожню карту впровадження.

Результати дослідження. Дослідження побудовано як послідовність чотирьох аналітичних контурів. Перший контур описує фактичний профіль використання цифрового інструментарію за групами підприємств – агреговані дані для 28 великих, 35 середніх і 17 малих підприємств, тобто загалом 80 спостережень.

Другий контур – модельний – формалізує бізнес-модель та інтегральний KPI. Показники приводяться до порівнянного інтервалу методом min-max, після чого агрегуються з вагами AHP. Третій контур – валідаційний – використовує кодований апробаційний масив P01–P24 (17 Core і 7 Reserve), сформований методом імітаційного моделювання для тестування розрахункового контуру моделі DBMCE. Його функція полягає у перевірці працездатності розрахункової процедури, стабільності кластеризації, діагностики регресій та чутливості ваг. Четвертий контур – сценарно-прикладний – переводить результати у формат «до/після» та дорожню карту управлінських дій.

Таке розмежування є принциповим для доказовості. Для валідації моделі використано критерій Кайзера–Мейєра–Олкіна (KMO), метод головних компонент (PCA), скоригований індекс Ренда (ARI), відстань Кука (Cook's D), HC3-робастне оцінювання

стандартних похибок та коефіцієнт рангової кореляції Спірмена (Spearman's ρ), отримані на P01–P24, не використовуються як аргумент зовнішньої валідності DBMCE. Вони підтверджують лише внутрішню узгодженість і технічну працездатність алгоритму. Зовнішня валідність потребує повторення всього контуру на незалежній верифікованій вибірці підприємств.

Модель DBMCE подає цифрову трансформацію не як сукупність програмних продуктів, а як зміну логіки функціонування бізнес-моделі. Базова структура охоплює п'ять економічних блоків: V – ціннісна пропозиція; P – ключові процеси; R – ресурси; F – фінансова модель; S – стейкхолдери. Наскрізний рівень D інтегрує цифрові інструменти між цими блоками та забезпечує обмін даними, узгодження рішень і простежуваність результату (табл. 1).

Кількісною основою DBMCE є зважений інтегральний індекс. Для п'яти базових блоків він визначається як:

$$KPI_DBMCE = \sum_(i=1)^5 (w_i \cdot K_i) \qquad (1)$$

де K_i – нормований показник відповідного блоку;
w_i – його ваговий коефіцієнт;
Σw_i=1.

Нормування виконується за співвідношенням:

$$x_norm = (x - x_min) / (x_max - x_min) \qquad (2)$$

Окремо у вихідній концепції вводиться індекс цифрової зрілості, який агрегує технологічні та компетентнісні складові цифрової трансформації будівельного підприємства:

$$M^d = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i D_i , \qquad (3)$$

де M^d – інтегральний індекс цифрової зрілості будівельного підприємства;
α_i – ваговий коефіцієнт і-тої складової цифрової зрілості;
D_i – нормоване значення і-тої складової;
n – кількість складових, включених до розрахунку; при цьому $\sum_{i=1}^{n} \alpha_i = 1$.

У змістовному наповненні індекс охоплює технологічну оснащеність підприємства та рівень цифрових компетентностей персоналу, що відповідає логіці вихідної моделі цифрової зрілості. Зростання значення (M^d) характеризує підвищення здатності підприємства не лише використовувати окремі цифрові технології, а й інтегрувати їх у взаємопов'язану систему управління бізнес-процесами

Ваги п'яти блоків визначено методом AHP (табл.2). Узгодженість матриці попарних порівнянь контролюється коефіцієнтом CR; прийнятність CR=0,042 свідчить про внутрішню узгодженість експертної системи пріоритетів відповідно до загальної логіки AHP [9, с. 83–98].

Агрегований профіль цифровізації демонструє стійкий розрив між великими, середніми та малими підприємствами. Найбільшу поширеність має BIM, тоді як CDE і Smart Contracts формують вузьке місце цифрової інтеграції, особливо в малих підприємств. Це має принципове значення для DBMCE: за відсутності середовища спільних даних технологічні

Таблиця 1

Функціональна архітектура моделі DBMCE

Блок	Економічний зміст	Цифрові інструменти	Очікуваний управлінський результат
V	Ціннісна пропозиція	KPI-дашборд, EVM	Прозорість результату та передбачуваність бюджету
P	Ключові процеси	BIM 3D–7D, CDE workflow	Координація, управління змінами, зменшення колізій
R	Ресурси	ERP, BIM-інфраструктура, CDE	Керованість ресурсів і цифрової спроможності
F	Фінансова модель	5D BIM, Smart Contracts, автоматизація КБ-2в	Зв'язок фізичного виконання з фінансовим підтвердженням
S	Стейкхолдери	CDE, контроль доступу, спільні дані	Єдина доказова база взаємодії учасників
D	Наскрізний цифровий рівень	BIM + KPI + CDE + ERP + Smart Contracts	Системна інтеграція та синергетичний ефект

Джерело: систематизовано автором за [1–3]

Таблиця 2

Вагові коефіцієнти блоків DBMCE за методом AHP

Блок	Зміст	Вага w_i	Пріоритетне обґрунтування
V	Ціннісна пропозиція	0,20	Паритет із ресурсним блоком
P	Ключові процеси	0,25	Пріоритет BIM-координації та керування процесами
R	Ресурси	0,20	Цифрова інфраструктура і компетентності
F	Фінансова модель	0,10	Фінансовий результат значною мірою похідний від процесів
S	Стейкхолдери	0,25	Критична роль взаємодії замовника, інвестора і підрядника

Джерело: розраховано автором; CR=0,042<0,10

моделі, показники виконання й фінансові процедури залишаються роз'єднаними.

У великих підприємств рівень BIM становить 0,87, KPI-систем – 0,79, CDE – 0,61, ERP – 0,74, Smart Contracts – 0,43. Для середніх підприємств відповідні значення становлять 0,54; 0,62; 0,31; 0,48; 0,18, для малих – 0,22; 0,35; 0,09; 0,27; 0,05. Таким чином, технологічна доступність BIM сама по собі не гарантує системної цифровізації. Найбільший розрив виникає саме в інструментах інтеграції даних і транзакцій (табл. 3).

Теплова карта виявляє критично низький рівень CDE (0.09) та Smart Contracts (0.05) у малих підприємствах. Великі підприємства лідирують по BIM (0.87), але навіть вони не досягли повної системної інтеграції (рис. 1.)

Кластеризація будівельних підприємств (k-means)

$J = \Sigma_i \Sigma(x \in C_i) \|x - \mu_i\|^2$ *(мінімізація внутрішньокластерних відхилень)*

Первинна кластеризація цього аналітичного контуру розподіляє підприємства на три групи (табл. 4):

21 % – низький рівень цифровізації із середнім KPI 0,32;

44 % – часткова цифровізація із KPI 0,57;

35 % – інтегрована модель із KPI 0,81.

Для першої групи пріоритетом є BIM-пілот і навчання, для другої – зв'язування KPI, ERP і CDE, для третьої – розвиток digital twins та поглиблена аналітика. Така сегментація перетворює інтегральний індекс із засобу рейтингу на інструмент вибору управлінської траєкторії (рис. 2).

Для оцінювання синергетичного ефекту використано модель взаємодії:

$$KPI = \beta_0 + \beta_1 \cdot BIM + \beta_2 \cdot KPIs + \beta_3 \cdot (BIM \times KPIs) + \beta_4 \cdot CDE + \beta_5 \cdot ERP + \varepsilon \quad (4)$$

Отримані коефіцієнти свідчать, що найбільший стандартизований внесок має BIM (β=0,412), однак самостійне трактування цього коефіцієнта було б неповним. Додатковий додатний ефект взаємодії BIM×KPI (β=0,250; p<0,001) показує, що результативність підвищується, коли інформаційна модель

Таблиця 3

Рівень імплементації цифрового інструментарію за групами підприємств

Група підприємств	BIM	KPI	CDE	ERP	Smart Contracts
Великі (n=28)	0,87	0,79	0,61	0,74	0,43
Середні (n=35)	0,54	0,62	0,31	0,48	0,18
Малі (n=17)	0,22	0,35	0,09	0,27	0,05

Джерело: розраховано автором за агрегованими даними вихідного дослідження

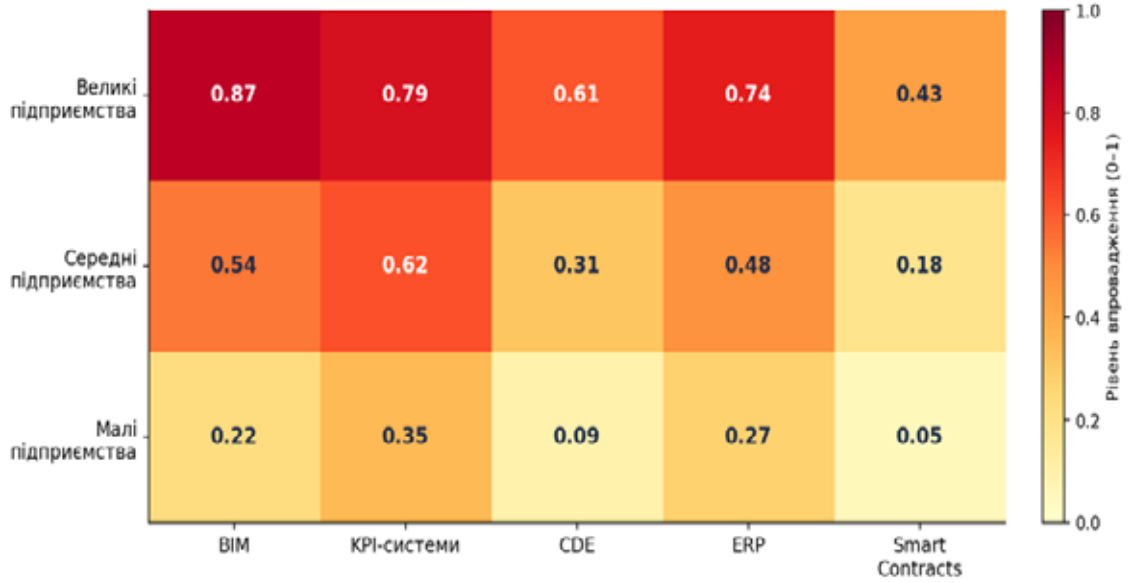


Рис. 1. Теплова карта рівня імплементації цифрового інструментарію

Джерело: розраховано автором

Таблиця 4

Характеристика кластерів будівельних підприємств

Кластер	Назва	Частка	KPI_сер	Пріоритет
1	Низький рівень	21%	0.32	BIM-пілот, навчання
2	Часткова цифровізація	44%	0.57	Зв'язати KPI+ERP+CDE
3	Інтегрована модель	35%	0.81	Digital twins, PCA

Джерело: розраховано автором

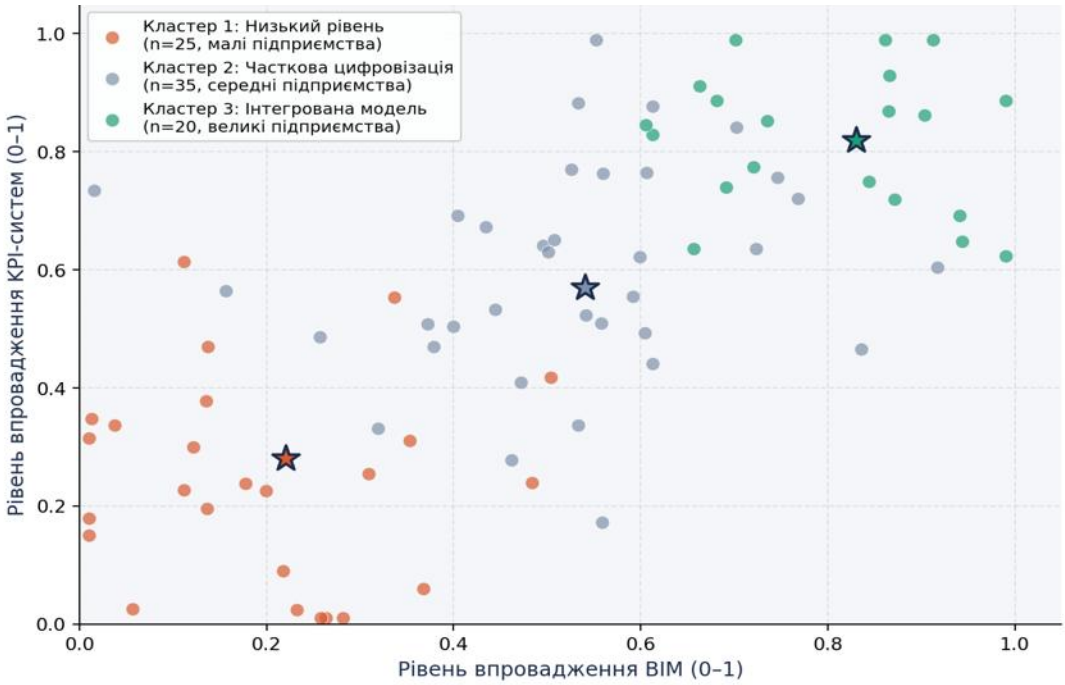


Рис. 2. Кластеризація будівельних підприємств (k-means, k=3)

Джерело: розраховано автором

пов'язана із системою вимірювання виконання. Це відповідає центральній гіпотезі DBMCE про перевагу системної інтеграції над набором ізольованих рішень. Значущими залишаються також KPI-системи (β=0,287), CDE (β=0,163) та ERP (β=0,118). Внутрішня пояснювальна здатність специфікації становить R^2=0,92, однак цей показник не слід ототожнювати із зовнішньою прогностичною точністю без перевірки на незалежній вибірці (табл. 5).

Кореляційний контур додатково показує тісні позитивні взаємозв'язки між цифровими компонентами (r=0,64–0,88), а найвища парна кореляція CDE↔ERP становить 0,88. Це підтверджує системність інструментарію, але водночас актуалізує контроль мультиколінеарності. Для оцінювання часової інерції та відкладеного ефекту цифровізації застосовано динамічну ARDL-специфікацію (Autoregressive Distributed Lag model), яка дає змогу врахувати залежність поточного рівня результативності підприємства від його попереднього стану та лагового впливу впровадження BIM. Динамічна ARDL-специфікація у вихідних матеріалах містить лаг KPI 0,623, поточний ефект BIM 0,187 і лагований ефект BIM 0,142; розрахований довгостроковий ефект становить 0,868. Отже, цифровий результат має накопичувальний характер, а максимальний ефект очікується не миттєво, а протягом двох-трьох років. Для практичного планування це означає необхідність фазової, а не одномоментної цифрової трансформації.

Окрема апробація на прикладі 24 будівельних підприємств (P01–P24) побудована як технічний stress-test моделі. Факторна придатність є високою: KMO=0,864, тест Бартлетта χ^2=127,02; p<0,001. Перша головна компонента пояснює 87,03 % дисперсії K1–K5, а дві перші компоненти – 91,91 %. Така концентрація варіації інтерпретується як наявність сильного латентного фактора цифрової зрілості, проте водночас вимагає уважного ставлення до корельованості предикторів у регресіях.

Діагностика кількості кластерів дає важливий методичний результат. За silhouette-критерієм статистично кращим є k=2 зі значенням 0,433, тоді як k=3 має 0,402 [10, с. 53–65]. У моделі залишено три кластери не як «статистично оптимальні», а як управлінськи інтерпретовані – базовий, перехідний і цифрово зрілий. Саме таке формулювання усуває суперечність між статистичним критерієм та прикладною логікою сегментації. Стійкість

Таблиця 5

Результати регресійного оцінювання впливу цифрових інструментів на KPI

Змінна	β	Ст. похибка	t-статистика	p-значення	VIF
BIM	0,412	0,045	9,16	<0,001	2,1
KPI-системи	0,287	0,052	5,52	<0,001	1,9
BIM×KPI	0,250	0,038	6,58	<0,001	2,4
CDE	0,163	0,038	4,29	0,001	1,7
ERP	0,118	0,041	2,88	0,012	1,8

Джерело: розраховано автором. R^2=0,92; F=87,4; p<0,001

трикластерного розбиття у bootstrap-повтореннях становить ARI mean=min=1,000.

Для регресійної перевірки використано HC3-робастні стандартні похибки. Порогове значення Cook's D для n=24 становить 4/n=0,167, а максимальні значення в оцінених специфікаціях коливаються від 0,261 до 1,004, тобто перевищують поріг. Це робить робастне коригування необхідним, а не факультативним; така логіка відповідає рекомендаціям для малих вибірок [11, с. 305–325]. Водночас максимальний VIF у двох специфікаціях перевищує бажаний рівень 5, що фіксується як обмеження й не приховується у висновках.

Чутливість інтегрального показника до ваг перевірено п'ятьма сценаріями: базовим, рівноваговим, технологічним, операційним та стратегічним. Мінімальна рангова кореляція з базовим рейтингом становить ρ=0,997, а в окремих сценаріях дорівнює 1,000. Отже, саме ранжування підприємств у межах синтетичного контуру є практично інваріантним до помірної перебудови ваг. Цей результат підсилює внутрішню стабільність моделі, але не усуває необхідності повторного AHP-оцінювання на розширеній експертній панелі.

Сценарний розрахунок «до/після» використано для переведення індексної моделі у формат управлінської дії. Базовий KPI дорівнює 0,6890, після змодельованого поліпшення п'яти блоків – 0,8015. Відносний приріст становить 16,33 %. Найбільший внесок формує блок K2 «процеси» – 28,9 % загального приросту, далі K5 – 22,2 %, K3 – 21,3 %, K1 – 14,2 % і K4 – 13,3 %. Така декомпозиція важлива тим, що дозволяє пов'язати інтегральний результат із конкретними напрямами втручання, а не обмежуватися одним підсумковим балом.

Порівняння трьох сценаріїв впровадження у вихідному матеріалі також демонструє нелінійність ефекту. Мінімальний сценарій дає +5–8 % KPI, зменшення витрат на 3–5 % і строків приблизно на 5 %. Балансований сценарій передбачає +12–15 % KPI, скорочення витрат на 8–12 % і строків приблизно на 12 %. Проривний сценарій DBMCE оцінено у +18–22 % KPI, зменшення витрат на 15–20 % та строків приблизно на 20 %. Ці значення мають сценарний, а не прогнозний статус та є результатом авторського моделювання і повинні бути перевірені на фактичних даних.

Практична логіка DBMCE полягає у тому, що послідовність впровадження повинна відтворювати залежності між цифровими компонентами. BIM без KPI не формує повного циклу контролю результативності; KPI без CDE спираються на фрагментовані дані; CDE без формалізованих процедур фінансового підтвердження не забезпечує повного зв'язку між виконанням і розрахунками. Тому дорожня карта будується від цифрової моделі та показників до середовища даних, транзакційної автоматизації і розвитку компетентностей.

На основі структурних і сценарних результатів сформовано дорожню карту. Її горизонти не

Таблиця 6

Паспорт робастної апробації DBMCE

Контур	Метод / критерій	Результат	Інтерпретація
AHP	CR≤0,10	CR=0,042	Узгодженість ваг підтверджено
Факторна придатність	KMO; Bartlett	KMO=0,864; p<0,001	Матриця придатна для PCA
PCA	Частка дисперсії PC1	87,03 %	Сильний спільний фактор
Кластеризація	Silhouette	k=2: 0,433; k=3: 0,402	k=3 обрано за управлінською інтерпретованістю
Стабільність кластерів	Bootstrap ARI	1,000	Стійкість розбиття в синтетичному контурі
Регресія	Cook's D; HC3	max D=0,261–1,004 > 0,167	HC3 є необхідним
Мультиколінеарність	VIF	до 9,842	Потребує контролю в окремих специфікаціях
Чутливість ваг	Spearman ρ	min ρ=0,997	Висока рангова стійкість
Зовнішня валідність	Незалежна фактична вибірка	Не підтверджена	P01–P24 є синтетичним масивом

Джерело: розраховано автором. Примітка: результати P01–P24 характеризують внутрішню працездатність алгоритму, а не зовнішню валідність

Таблиця 7

Декомпозиція сценарного приросту інтегрального KPI

Блок	Вага	До	Після	Зважений внесок	Частка приросту
K1	0,200	0,720	0,800	0,016	14,2 %
K2	0,250	0,650	0,780	0,033	28,9 %
K3	0,200	0,700	0,820	0,024	21,3 %
K4	0,100	0,550	0,700	0,015	13,3 %
K5	0,250	0,750	0,850	0,025	22,2 %

Джерело: розраховано автором. KPI_before=0,6890; KPI_after=0,8015; ΔKPI=+16,33 %.

є жорстким календарним нормативом; вони визначають рекомендовану послідовність, у межах якої підприємство може коригувати темп відповідно до цифрової зрілості, інвестиційних можливостей і проєктного портфеля.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у формалізації DBMCE як бізнес-модельної, а не суто технологічної конструкції. Наскрізний рівень D функціонально пов'язує ціннісну пропозицію, процеси, ресурси, фінансову модель і стейкхолдерів. На відміну від підходів, що вимірюють окремо рівень BIM або цифрової зрілості, DBMCE поєднує структурну архітектуру, інтегральну оцінку, вагування, сегментацію і сценарну декомпозицію ефекту. Додаткова новизна полягає у включенні до процедури не лише «позитивних» статистичних результатів, а й обов'язкової діагностики їх стійкості – silhouette, ARI, Cook's D, VIF, HC3 та Spearman.

Практична цінність моделі проявляється у трьох функціях. Діагностична функція дає змогу визначити, де саме виникає розрив цифрового ланцюга. Пріоритизаційна функція переводить діагностику у ваги та послідовність дій. Контрольна функція пов'язує зміни у блоках із динамікою інтегрального KPI. Для підприємства це формує основу цифрової інвестиційної програми, у якій технологічні витрати мають бути обґрунтовані очікуваним управлінським результатом.

Межі застосування визначаються якістю вихідних даних. У поточному вигляді не можна робити галузеві прогнози на основі P01–P24, оскільки цей масив є синтетичним. Так само високий R^2 не є самодостатнім доказом причинного ефекту. Необхідні незалежна фактична вибірка, документована процедура її формування, часові або панельні дані, перевірка специфікації на відкладеній вибірці та повторне експертне вагування. Окремого опрацювання потребує множник R у формулі KPI_final, зміст якого має бути формально визначений до використання у прикладних розрахунках.

Висновки. У дослідженні обґрунтовано модель DBMCE як організаційно-економічний інструментарій системної імплементації цифрових технологій у бізнес-модель будівельного підприємства. Її відмінністю є наскрізний цифровий рівень D, що інтегрує BIM, KPI/EVM, CDE, ERP і Smart Contracts з п'ятьма базовими блоками V–P–R–F–S. Це дозволяє трактувати цифровізацію не як набір IT-рішень, а як механізм трансформації способу створення та підтвердження економічної цінності.

Методом AHP сформовано ваги 0,20; 0,25; 0,20; 0,10; 0,25 за CR=0,042. Аналітичний контур показав найбільший стандартизований внесок BIM (β=0,412) та значущий синергетичний ефект BIM×KPI (β=0,250; p<0,001) за R^2=0,92. Рівень CDE і Smart Contracts є критичним обмеженням насамперед для малих підприємств. Динамічні результати вказують на накопичення ефекту, що обґрунтовує поетапну логіку цифрових інвестицій.

Робастна апробація P01–P24 підтвердила внутрішню працездатність алгоритму: KMO=0,864; PC1=87,03 %; ARI=1,000; мінімальна Spearman ρ=0,997; сценарний приріст інтегрального KPI – 16,33 %. Водночас статистично кращим за silhouette є k=2, а k=3 обрано за управлінською інтерпретованістю; Cook's D перевищує 4/n у всіх тестових регресіях; у частині моделей VIF перевищує бажаний рівень. Фіксація цих обмежень є складовою методичної надійності, а не недоліком подання результатів.

Ключове обмеження дослідження – відсутність завершеної зовнішньої валідації: синтетичний масив не може замінити фактичні дані підприємств. Подальші дослідження мають бути спрямовані на формування верифікованої матриці будівельних підприємств із документованою методикою відбору; повторне оцінювання AHP на незалежній експертній панелі; операціоналізацію множника R; перевірку моделі на панельних даних протягом 2–3 років; порівняння DBMCE з простішими моделями цифрової зрілості; крос-валідацію прогнозних специфікацій і тестування відмінностей за розміром підприємства та типом проєктного портфеля. Саме така програма дасть змогу перейти від підтвердження функціональної цілісності DBMCE до доказу її зовнішньої валідності.

Таблиця 8

Дорожня карта імплементації DBMCE

Напрям	Основний захід	Горизонт	Відносний бюджет	Очікуваний ефект
BIM	BIM 3D–7D, Scan-to-BIM, HBIM	0–6 міс.	Високий	до +15 % якості
KPI	KPI-дашборд, EVM (CPI, SV)	3–6 міс.	Середній	до +12 % KPI
CDE	Хмарне CDE, контроль змін	6–12 міс.	Середній	до +10 % прозорості
Smart Contracts	Автоматизація КБ-2в і контрактних процедур	6–18 міс.	Середній	до -8 % ризиків
Персонал	Цифрові навички, BIM-лабораторії	0–12 міс.	Низький	до +20 % цифрової зрілості

Джерело: розроблено автором за результатами сценарного контуру. Значення мають орієнтовний сценарний характер

Список використаних джерел:

1. Загорецька О. Я., Дац А. Організаційно-економічний механізм цифрової трансформації будівельних підприємств на основі інтеграції BIM-технологій та освітнього потенціалу. *Успіхи і досягнення у науці.* 2026. № 2 (24). С. 1528–1537. DOI: https://doi.org/10.52058/3041-1254-2026-2(24)-1528-1537
2. Загорецька О. Я., Дац А. Формування конкурентоспроможної моделі діяльності будівельного підприємства у відновленні культових споруд шляхом впровадження BIM, контролю змін та KPI як інвестиційного інструментарію. *Наукові перспективи.* 2026. № 2 (68). С. 2316–2328. DOI: https://doi.org/10.52058/2708-7530-2026-2(68)-2316-2328
3. Sorokina L., Tsyfra T., Vahovich I. Modeling the Level of Implementation of BIM by Enterprises as a Means of Optimizing the Cost. Data-Centric Business and Applications. *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies.* 2024. Vol. 195. P. 277–295. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-54012-7_12
4. Bielienkova O., Novak Y., Matsapura O., Zapiechna Y., Kalashnikov D., Dubinin D. Improving the Organization and Financing of Construction Project by Means of Digitalization. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 2022. Vol. 12, Issue 8. P. 108–115. DOI: https://doi.org/10.46338/ijetae0822_14
5. Tytok V., Emelianova O., Galinsky O., Lysytsia N., Malykhin M. Organisational and Economic Tools for Managing Investment Programmes Involving Construction Enterprises Through Digitalisation. *Review of Economics and Finance*. 2022. Vol. 20. P. 1060–1066. DOI: https://doi.org/10.55365/1923.x2022.20.118
6. Levchenko N. M., Beiner P. S., Beiner N. V. Reconstruction of Buildings Using BIM Technologies During City Renewal in Ukraine. *Metal Science and Heat Treatment of Metals.* 2022. No. 4 (99). P. 64–70. DOI: https://doi.org/10.30838/J.PMHTM.2413.271222.64.912
7. McKinsey Global Institute. Reinventing Construction: A Route to Higher Productivity. McKinsey & Company, 2017. 168 p.
8. World Bank. Ukraine: Fifth Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA5): February 2022–December 2025. Washington, DC: World Bank Group, 2026.
9. Saaty T. L. Decision Making with the Analytic Hierarchy Process. *International Journal of Services Sciences*. 2008. Vol. 1, No. 1. P. 83–98. DOI: https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590
10. Rousseeuw P. J. Silhouettes: A Graphical Aid to the Interpretation and Validation of Cluster Analysis. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 1987. Vol. 20. P. 53–65. DOI: https://doi.org/10.1016/0377-0427(87)90125-7
11. MacKinnon J. G., White H. Some Heteroskedasticity-Consistent Covariance Matrix Estimators with Improved Finite Sample Properties. *Journal of Econometrics.* 1985. Vol. 29, No. 3. P. 305–325. DOI: https://doi.org/10.1016/0304-4076(85)90158-7

References:

1. Zahoretska, O. Ya., & Dats, A. (2026). Orhanizatsiino-ekonomichnyi mekhanizm tsyfrovoi transformatsii budivelnykh pidpryiemstv na osnovi intehratsii BIM-tekhnolohii ta osvitnoho potentsialu [Organizational and economic mechanism of digital transformation of construction enterprises based on BIM integration and educational potential]. *Uspikhy i dosiahnennia u nautsi*, no. 2 (24), pp. 1528–1537. DOI: https://doi.org/10.52058/3041-1254-2026-2(24)-1528-1537
2. Zahoretska, O. Ya., & Dats, A. (2026). Formuvannia konkurentospromozhnoi modeli diialnosti budivelnoho pidpryiemstva u vidnovlenni kultovykh sporud shliakhom vprovadzhennia BIM, kontroliu zmin ta KPI yak investytsiinoho instrumentariiu [Formation of a competitive construction enterprise model for restoration projects through BIM, change control and KPI]. *Naukovi perspektyvy*, no.2 (68), pp. 2316–2328. DOI: https://doi.org/10.52058/2708-7530-2026-2(68)-2316-2328
3. Sorokina, L., Tsyfra, T., & Vahovich, I. (2024). Modeling the level of implementation of BIM by enterprises as a means of optimizing the cost. In Data-Centric Business and Applications (*Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, Vol. 195, pp. 277–295). Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-54012-7_12
4. Bielienkova, O., Novak, Y., Matsapura, O., Zapiechna, Y., Kalashnikov, D., & Dubinin, D. (2022). Improving the organization and financing of construction project by means of digitalization. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, no. 12 (8), pp. 108–115. DOI: https://doi.org/10.46338/ijetae0822_14
5. Tytok, V., Emelianova, O., Galinsky, O., Lysytsia, N., & Malykhin, M. (2022). Organisational and economic tools for managing investment programmes involving construction enterprises through digitalisation. *Review of Economics and Finance*, no.20, pp. 1060–1066. DOI: https://doi.org/10.55365/1923.x2022.20.118
6. Levchenko, N. M., Beiner, P. S., & Beiner, N. V. (2022). Reconstruction of buildings using BIM technologies during city renewal in Ukraine. *Metal Science and Heat Treatment of Metals*, no. 4 (99), pp. 64–70. DOI: https://doi.org/10.30838/J.PMHTM.2413.271222.64.912
7. McKinsey Global Institute. (2017). *Reinventing construction: A route to higher productivity*. McKinsey & Company. Available at: https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/reinventing-construction-through-a-productivity-revolution
8. World Bank. (2026). Ukraine: *Fifth rapid damage and needs assessment (RDNA5): February2022-December2025.* World Bank Group. Available at: https://documents1.worldbank.org/curated/en/099022026094036395/pdf/P514499-22f93f3a-4278-42bc-b907-db9553d12069.pdf
9. Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, no. 1 (1), pp. 83–98. DOI: https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590

10. Rousseeuw, P. J. (1987). Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, no. 20, pp. 53–65. DOI: https://doi.org/10.1016/0377-0427(87)90125-7
11. MacKinnon, J. G., & White, H. (1985). Some heteroskedasticity-consistent covariance matrix estimators with improved finite sample properties. *Journal of Econometrics*, no. 29 (3), pp. 305–325. DOI: https://doi.org/10.1016/0304-4076(85)90158-7

FORMATION OF THE DIGITAL BUSINESS MODEL OF A CONSTRUCTION ENTERPRISE THROUGH THE IMPLEMENTATION OF DIGITAL TOOLS

Summary. The relevance of the study stems from the need for construction enterprises to move from the fragmented adoption of individual digital tools towards the systematic transformation of their business models. Digitalisation is viewed as an organisational and economic mechanism affecting the value proposition, key processes, resources, financial logic, stakeholder interactions, and data use throughout the project life cycle. The article aims to formalise and test the DBMCE model as an integrated framework for implementing digital technologies within the business model of a construction enterprise. The methodology combines structural and functional modelling, min–max normalisation, the AHP, correlation and regression analysis with HC3 heteroskedasticity-robust standard errors, principal component analysis, k-means clustering, sensitivity analysis using Spearman's rank correlation, and before-and-after scenario calculations. The DBMCE architecture comprises the V–P–R–F–S system, supplemented by a digital layer D integrating BIM, KPI/EVM, CDE, ERP, and smart contracts. BIM exhibited the strongest association with the composite KPI, while the BIM×KPI interaction was positive and statistically significant. The dynamic specification suggests a cumulative rather than immediate effect, supporting the rationale for phased implementation. The validation procedure indicated strong model adequacy and stability of both the three-cluster managerial segmentation and enterprise rankings under alternative weighting schemes. The before-and-after scenario yielded a 16.33% increase in the composite KPI, with the process component making the largest contribution. Since the P01–P24 dataset is synthetic, these findings validate only the computational framework and cannot be interpreted as evidence of external validity. The practical value lies in a phased implementation roadmap that combines BIM adoption, KPI-based management, a common data environment, contract and payment automation, and the development of employees' digital competencies, linking these elements to measurable management outcomes. Further research should replicate the full procedure using a verified sample of construction enterprises and incorporate the remaining adjustment factors.

Keywords: DBMCE, digital transformation, business model, construction enterprise, BIM, KPI, CDE, AHP, digital maturity.

Дата надходження статті: 17.09.2026
Дата прийняття статті до публікації: 14.10.2026
Дата публікації статті: 05.11.2026