Міністерство освіти і науки України
Київський національний університет будівництва і архітектури

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

РІЗУН ДМИТРО ЮРІЙОВИЧ

УДК 658.5:69:004.9

ДИСЕРТАЦІЯ

ВІМ-ОРІЄНТОВАНИЙ ЕКОНОМІКО-УПРАВЛІНСЬКИЙ ІНСТРУМЕНТАРІЙ ЦИФРОВОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ БУДІВЕЛЬНОГО ПІДПРИЄМСТВА

051 – Економіка

05 – Соціальні та поведінкові науки

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____Д.Ю.Різун

Науковий керівник: 1. **Чуприна Христина Миколаївна**, доктор економічних наук, професор кафедри менеджменту в будівництві Київського національного університету будівництва та архітектури

2. **Клименко Микола Олександрович**, кандидат технічних наук, доцент, завідувача кафедри машин і обладнання технологічних процесів Київського
національного університету будівництва та архітектури

Київ – 2026

АНОТАЦІЯ

Різун Д. Ю. – **«BIM-орієнтований економіко-управлінський інструментарій цифрової трансформації будівельного підприємства»**. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. – Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 05 «Соціальні та поведінкові науки» за спеціальністю 051 «Економіка». – Київський національний університет будівництва і архітектури. – Київ, 2026.

Дисертацію присвячено обґрунтуванню теоретико-методичних засад і розробленню BIM-орієнтованого економіко-управлінського інструментарію цифрової трансформації будівельного підприємства, який забезпечує коригування його економіко-управлінських характеристик на основі даних інформаційного моделювання будівель (BIM). Обґрунтовано інтеграцію параметрів інформаційної моделі в узгоджену систему показників ефективності управлінських рішень, механізм верифікації BIM-даних, інструментарій цифрового моніторингу та дорожню карту масштабування BIM-підходів в управлінні будівельним підприємством.

Нагальність дослідження обумовлена потребою підвищення ефективності управління будівельними підприємствами в умовах відновлення зруйнованої інфраструктури, обмеженості фінансових і матеріальних ресурсів та зростання вимог до прозорості управлінських рішень. Інформаційне моделювання будівель в Україні отримало нормативне підґрунтя у вигляді Концепції впровадження BIM-технологій і національних стандартів, гармонізованих зі стандартами серії ISO 19650, однак на рівні будівельних підприємств ефекти BIM переважно оцінюються в межах окремих проєктів – через кількість колізій, тривалість проєктування чи точність кошторисних розрахунків. Цифрова трансформація при цьому розглядається як технологічне завдання, а не як інструмент управління економічними та управлінськими характеристиками підприємства. Відхилення обсягів робіт, тривалості та потреби в ресурсах, що виявляються в інформаційній моделі, відображаються у фінансовій звітності із

запізненням, коли можливості їх коригування вже обмежені. Це зумовлює необхідність формування економіко-управлінського інструментарію, здатного пов’язати параметри інформаційної моделі з характеристиками підприємства в цілому та забезпечити випереджальне коригування управлінських рішень. Отже, нагальність дослідження визначається потребою переходу від фіксації наслідків відхилень до їх раннього виявлення, кількісного оцінювання та своєчасного коригування на основі єдиного джерела даних про об’єкт будівництва.

Науково-прикладні передумови дослідження сформовані сучасними напрацюваннями у сфері інформаційного моделювання будівель, оцінювання BIM-зрілості, ощадливого будівництва, віртуального проєктування й будівництва, методу освоєного обсягу та автоматизованої перевірки інформаційних моделей на основі правил. Водночас специфіка будівельних підприємств, зумовлена мультипроєктним характером діяльності, тривалістю будівельних циклів, високою часткою позикового капіталу та чутливістю фінансового результату до строків і витрат, потребує подальшого розвитку відповідного економіко-управлінського інструментарію. Науково-методична проблема полягає у недостатній розробленості взаємозв’язку параметрів, що формуються в інформаційній моделі, з економічними та управлінськими характеристиками підприємства, а також у фрагментарності наявних показників оцінювання впливу BIM, кожен з яких характеризує лише окремий аспект ефекту. Практичний запит визначається потребою будівельних підприємств у достовірних даних моделі, своєчасному виявленні відхилень, кількісному оцінюванні результатів управлінських рішень і обґрунтуванні обсягу витрат на цифрову інфраструктуру. Зазначені положення визначили спрямованість дослідження на формування BIM-орієнтованого інструментарію, що поєднує систему показників, механізм верифікації даних, цифровий моніторинг, алгоритм діагностики ефективності управлінських рішень і поетапне масштабування BIM-підходів.

У **першому розділі** дисертації викладено концептуально-теоретичну основу дослідження. Проаналізовано еволюцію BIM від засобу автоматизації креслень до методології управління життєвим циклом об'єкта, моделі оцінювання BIM-зрілості, інституційні умови впровадження BIM у світі та в Україні, зв'язок вимірювань 4D і 5D з організаційно-технологічним проєктуванням. Виокремлено три напрями досліджень BIM – інформаційно-технологічний, організаційно-управлінський та напрям, пов'язаний з проблемами впровадження BIM в Україні, – і встановлено, що ефекти BIM переважно оцінюються на рівні окремого проєкту, а не підприємства в цілому. Обґрунтовано авторське розуміння економіко-управлінських характеристик будівельного підприємства як сукупності взаємопов'язаних фінансово-економічних показників і характеристик системи управління, що формуються через параметри виконання будівельних робіт. Запропоновано поняття «BIM-коригування» як цілеспрямованого процесу виявлення відхилень організаційно-технологічних параметрів (обсягів робіт, тривалості, потреби в ресурсах), що формуються та відстежуються в інформаційній моделі об'єкта, оцінювання їх впливу на економічні та управлінські характеристики підприємства й ухвалення коригувальних рішень до моменту відображення наслідків відхилень у фінансовій звітності. На відміну від традиційного контролінгу, що спирається на ретроспективні облікові дані, BIM-коригування має випереджальний характер і ґрунтується на єдиному джерелі даних про об'єкт. Прийнято наукову гіпотезу роботи, яка передбачає, що поєднання параметрів інформаційної моделі з узгодженою системою показників ефективності управлінських рішень, верифікацією даних моделі та цифровим моніторингом відхилень дає змогу скоротити час виявлення відхилень і підготовки управлінських рішень, а через нього – зменшити кількість повторних коригувань планів і непродуктивні витрати будівельного підприємства.

Обґрунтовано склад BIM-орієнтованого економіко-управлінського інструментарію цифрової трансформації будівельного підприємства як

єдності системи показників, механізму верифікації даних, інструментарію моніторингу й оцінювання, алгоритму цифрової діагностики та дорожньої карти масштабування. Визначено функціональні блоки бізнес-процесів будівельного підприємства, що піддаються BIM-інтеграції, – планування, кошторисне ціноутворення, календарне планування, постачання, контроль якості, логістику, управління ризиками та експлуатацію, – і механізми інтеграції через відкриті формати обміну даними, програмні інтерфейси, хмарні платформи та спільне середовище даних. Встановлено фрагментарність наявних показників оцінювання впливу BIM, що зумовлює потребу в побудові цифрової інфраструктури з BIM-ядром і узгодженої системи показників.

У **другому розділі** дисертаційної роботи викладено методичне підґрунтя дослідження та сформовано інструментальну базу BIM-орієнтованого управління будівельним підприємством. Обґрунтовано архітектуру цифрової інфраструктури управління з BIM-ядром, яка поєднує геометрично-параметричний, економічний і управлінський контури через програмний інтерфейс і спільне середовище даних. Запропоновано систему показників оцінювання її функціонування: індекс приросту інформаційної цінності та показник віддачі від інвестицій у BIM – для оцінювання ефекту переходу до цифрової моделі; коефіцієнти цифрової координованості й синхронізованого оновлення та індекс управлінської синхронізації – для оцінювання узгодженості часових і вартісних параметрів; ризик-скориговану вартість етапів та індекс приросту продуктивності. Порівняльна оцінка методів оцінювання ефекту BIM (показника віддачі від інвестицій, моделей BIM-зрілості, методу освоєного обсягу, систем KPI) засвідчила, що кожен з них характеризує лише окремий аспект ефекту, що обґрунтовує доцільність інтегрального оцінювання.

Розроблено механізм аналітичної верифікації BIM-даних, який поєднує організаційну верифікацію за станами інформаційних контейнерів у спільному середовищі даних згідно зі стандартами серії ISO 19650,

автоматизовану перевірку моделей за правилами з класифікацією правил за складністю реалізації та ризик-орієнтовану пріоритезацію перевірок на основі інтегрального ризику об’єкта, інерційного впливу похибки та сценарного індексу реакції. Запропоновано коефіцієнт якості даних, що агрегує результати перевірок за вимірами повноти, коректності, узгодженості та актуальності і застосовується як критерій придатності даних моделі для розрахунку показників ефективності. Сформовано інструментарій цифрового моніторингу ресурсних і часових параметрів, що поєднує збір даних на операційному рівні, їх інтеграцію в BIM- та ERP-середовищах, контроль відхилень методом освоєного обсягу, локалізацію відхилень за 4D-моделлю, імовірнісне та імітаційне прогнозування. Запропоновано трирівневу систему показників ефективності управлінських рішень: часткові показники – індекс інтегральної ефективності управління та коефіцієнт цифрової реактивності – інтегрована рентабельність управлінських рішень з узагальненням у комплексному індексі ефективності. Обґрунтовано умови застосування методу ентропії для визначення вагових коефіцієнтів, зокрема необхідність зіставлення результату з оцінкою за рівних вагових коефіцієнтів за короткого ряду спостережень, та метрику перевірки точності прогнозів. У цілому другий розділ формує методичну архітектуру переходу від даних інформаційної моделі до інтегральної оцінки ефективності управлінських рішень.

У **третьому розділі** сформовано прикладну основу використання BIM-орієнтованого інструментарію та стратегічного масштабування BIM-підходів. Розроблено концептуальну схему оновленої BIM-моделі оцінювання ефективності управлінських рішень з аналітичним, управлінським та економічним рівнями. Апробацію інструментарію виконано на даних будівельного підприємства за наскрізною процедурою: фінансовий профіль підприємства – часткові показники результатів у часовій, плановій, витратній і результативній групах – нормування відносно найкращого значення – вагові коефіцієнти – інтегральний індекс ефективності управління. Встановлено, що

інтегральна ефективність управління зросла за будь-якого способу зважування, а найбільший внесок у її приріст забезпечили часові показники – тривалість підготовки управлінських рішень і час виявлення критичних відхилень. Показано, що середні величини змін показників послідовно зменшуються від часових через планові до витратних і результативних, що узгоджується з гіпотезою дослідження, а лаг реагування на відхилення скоротився. Сценарний розрахунок за часткою контрольованих витрат визначив умову беззбиткової діяльності підприємства та граничний річний обсяг витрат на цифрову інфраструктуру, за якого використання інструментарію економічно виправдане. Кількісні оцінки отримано за даними одного підприємства у відносному вимірі за два періоди, а частку контрольованих витрат задано сценарно, тому вони мають характер розрахункової оцінки. Сформовано восьмиетапний алгоритм цифрової діагностики ефективності управлінських рішень, що поєднує аналітичний і управлінський контури, та розроблено дорожню карту масштабування BIM-підходів з етапами пілотного впровадження, інтеграції процесів, масштабування аналітики та стратегічного BIM-коригування і критеріями переходу між ними на основі запропонованих показників. Визначено межі застосування інструментарію та перспективи його апробації за часовими рядами внутрішніх даних підприємств.

У тексті розділу викладено прикладні рекомендації щодо поетапного впровадження BIM-орієнтованого інструментарію: запровадження спільного середовища даних і контролю якості даних моделі на пілотних об’єктах, інтеграції інформаційної моделі з кошторисом, календарним планом і ERP-системою, поширення панелей ключових показників на підрозділи підприємства та переходу до сценарного прогнозування й систематичного коригування економіко-управлінських характеристик. Показано, що підприємство може розпочинати масштабування як з аналітичного контуру (системи показників, цифрової діагностики, сценарного аналізу), так і з інфраструктурного (інтеграції BIM з корпоративними інформаційними

системами), а аналітична перевірка BIM-даних, моніторинг відхилень і бізнес-аналітика становлять спільну основу обох напрямів. Реалізація рекомендацій узгоджується з Концепцією впровадження BIM-технологій в Україні, ДСТУ ISO 19650-1:2020 і ДБН А.3.1-5:2016.

Провідна інновація дослідження полягає у формуванні цілісного BIM-орієнтованого економіко-управлінського підходу до цифрової трансформації будівельного підприємства, який переносить оцінювання ефектів BIM з рівня окремого проєкту на рівень підприємства в цілому. На відміну від наявних підходів, орієнтованих на технологічні показники проєктування, запропонований підхід пов’язує відхилення, виявлені в інформаційній моделі, з часовими, плановими, витратними та результативними характеристиками підприємства через систему показників, інтегральну оцінку ефективності управління та сценарну оцінку економічного ефекту. Принципово новим є поєднання верифікації даних моделі, цифрового моніторингу відхилень, діагностики ефективності управлінських рішень і поетапного масштабування BIM-підходів із критеріями переходу між етапами. Це забезпечує перехід від ретроспективного відображення наслідків відхилень у фінансовій звітності до випереджального BIM-коригування економіко-управлінських характеристик будівельного підприємства.

Наукова новизна дисертації полягає у розробленні BIM-орієнтованого економіко-управлінського інструментарію цифрової трансформації будівельного підприємства, що поєднує концептуальні, методичні та прикладні положення оцінювання й коригування його економіко-управлінських характеристик на основі даних інформаційної моделі.

Вперше розроблено науково-методичний підхід до оцінювання ефективності BIM-коригування економіко-управлінських характеристик будівельного підприємства, який, на відміну від наявних підходів, що оцінюють ефекти BIM у межах окремого проєкту через кількість колізій, тривалість проєктування чи точність кошторисів, пов’язує відхилення, виявлені в інформаційній моделі, з часовими, плановими, витратними та

результативними характеристиками підприємства через систему часткових показників, інтегральний індекс ефективності управління як форму агрегування часткових показників (нормування відносно найкращого значення є змістовним за ряду щонайменше з трьох періодів або за зовнішнього еталона) та сценарну оцінку економічного ефекту за часткою контрольованих витрат, що дає змогу визначати нижню межу економічного ефекту і граничний рівень витрат на цифрову інфраструктуру.

В дисертаційній роботі **удосконалено:** понятійний апарат економіки цифрової трансформації будівельного підприємства шляхом уточнення змісту поняття «економіко-управлінські характеристики будівельного підприємства» як сукупності фінансово-економічних показників і характеристик системи управління, що формуються через параметри виконання будівельних робіт, введення поняття «BIM-коригування» як процесу випереджального коригування цих характеристик на основі відхилень, виявлених в інформаційній моделі, та обґрунтування складу BIM-орієнтованого економіко-управлінського інструментарію цифрової трансформації як єдності системи показників, механізму верифікації даних, інструментарію моніторингу й оцінювання, алгоритму цифрової діагностики та дорожньої карти масштабування.

Набули подальшого розвитку: механізм аналітичної верифікації BIM-даних, що поєднує організаційну верифікацію за стандартами серії ISO 19650, автоматизовану перевірку моделей за правилами та ризик-орієнтовану пріоритезацію перевірок з агрегуванням результатів перевірок у коефіцієнті якості даних як критерії придатності даних моделі для економічних розрахунків; дорожня карта масштабування BIM-підходів в управлінні будівельним підприємством, яка містить етапи пілотного впровадження, інтеграції процесів, масштабування аналітики та стратегічного BIM-коригування з критеріями переходу між етапами, сформованими на основі запропонованих показників, та узгоджена з Концепцією впровадження BIM-технологій в Україні, ДСТУ ISO 19650-1:2020 і ДБН А.3.1-5:2016.

Практична цінність результатів дисертації полягає у застосуванні розробленого BIM-орієнтованого інструментарію – методики оцінювання ефективності BIM-коригування, системи показників, механізму верифікації даних, алгоритму цифрової діагностики ефективності управлінських рішень і дорожньої карти масштабування – для своєчасного виявлення відхилень, кількісного оцінювання результатів управлінських рішень та обґрунтування бюджету цифрової трансформації будівельних підприємств. Запропонована система показників дає змогу оцінювати результати використання BIM за часовими, плановими, витратними та результативними характеристиками підприємства, а сценарний розрахунок – визначати нижню межу економічного ефекту та граничний обсяг витрат на цифрову інфраструктуру. Механізм верифікації даних і алгоритм цифрової діагностики забезпечують достовірність вихідної інформації та формування управлінської інформації в процесі виконання робіт, а дорожня карта масштабування визначає послідовність і критерії переходу до вищих рівнів BIM-зрілості. Кількісну апробацію виконано в ТОВ «Будівельна фірма «Альфа-Сервіс»» (довідка про впровадження від 14.04.2026 № 75); придатність архітектури цифрово інтегрованої системи управління підтверджено на якісному рівні в ТОВ «Марстон-Груп» (довідка від 12.05.2026 № 65-1); результати використано в Інституті місцевого розвитку (повідомлення про використання від 01.05.2026 № 54). Кількісні оцінки отримано за даними одного підприємства у відносному вимірі за два періоди і мають характер розрахункової оцінки.

Ключові слова: BIM; інформаційне моделювання будівель; цифрова трансформація; будівельне підприємство; економіко-управлінський інструментарій; економіко-управлінські характеристики; BIM-коригування; система показників; індекс інтегральної ефективності управління; верифікація даних; цифровий моніторинг; дорожня карта масштабування.

ABSTRACT

Rizun D. Yu. – **«BIM-oriented economic and managerial toolkit for the digital transformation of a construction enterprise»**. – Qualification scientific work in the form of a manuscript. – Dissertation for the Doctor of Philosophy degree in the field of knowledge 05 «Social and Behavioural Sciences» in the specialty 051 «Economics». – Kyiv National University of Construction and Architecture. – Kyiv, 2026.

The dissertation is devoted to substantiating the theoretical and methodological foundations and developing a BIM-oriented economic and managerial toolkit for the digital transformation of a construction enterprise, which ensures the adjustment of its economic and managerial characteristics on the basis of Building Information Modelling (BIM) data. The integration of information model parameters into a consistent system of indicators of management decision efficiency, a mechanism for verifying BIM data, a toolkit for digital monitoring and a roadmap for scaling BIM approaches in the management of a construction enterprise are substantiated.

The urgency of the study is determined by the need to improve the efficiency of construction enterprise management in the context of restoring destroyed infrastructure, limited financial and material resources and growing requirements for the transparency of management decisions. Building information modelling in Ukraine has received a regulatory basis in the form of the Concept for the implementation of BIM technologies and national standards harmonised with the ISO 19650 series; however, at the level of construction enterprises the effects of BIM are mostly assessed within individual projects – through the number of clashes, design duration or the accuracy of cost estimates. Digital transformation is thus regarded as a technological task rather than as a tool for managing the economic and managerial characteristics of the enterprise. Deviations in work volumes, durations and resource requirements detected in the information model are reflected in financial statements with a delay, when the possibilities for their correction are already limited. This necessitates the formation of an economic and

managerial toolkit capable of linking information model parameters with the characteristics of the enterprise as a whole and ensuring anticipatory adjustment of management decisions. Therefore, the urgency of the study is determined by the need to move from recording the consequences of deviations to their early detection, quantitative assessment and timely correction on the basis of a single source of data on the construction object.

The scientific and applied prerequisites of the study are formed by modern developments in building information modelling, BIM maturity assessment, lean construction, virtual design and construction, earned value management and automated rule-based checking of information models. At the same time, the specifics of construction enterprises, determined by the multi-project nature of their activities, the duration of construction cycles, a high share of borrowed capital and the sensitivity of the financial result to time and costs, require further development of the corresponding economic and managerial toolkit. The scientific and methodological problem lies in the insufficient elaboration of the relationship between the parameters formed in the information model and the economic and managerial characteristics of the enterprise, as well as in the fragmentation of existing indicators of BIM impact, each of which characterises only a particular aspect of the effect. The practical request is determined by the need of construction enterprises for reliable model data, timely detection of deviations, quantitative assessment of the results of management decisions and justification of expenditure on digital infrastructure. These provisions determined the focus of the study on forming a BIM-oriented toolkit that combines a system of indicators, a data verification mechanism, digital monitoring, an algorithm for diagnosing the efficiency of management decisions and phased scaling of BIM approaches.

The **first chapter** of the dissertation presents the conceptual and theoretical basis of the study. The evolution of BIM from a drawing automation tool to a methodology for managing the life cycle of an object, BIM maturity assessment models, the institutional conditions of BIM implementation worldwide and in Ukraine, and the relationship of the 4D and 5D dimensions with organisational and

technological design are analysed. Three directions of BIM research are identified – information-technological, organisational-managerial and the direction related to the problems of BIM implementation in Ukraine – and it is established that BIM effects are mostly assessed at the level of an individual project rather than the enterprise as a whole. The author's understanding of the economic and managerial characteristics of a construction enterprise as a set of interrelated financial and economic indicators and characteristics of the management system formed through the parameters of construction works is substantiated. The concept of «BIM-based adjustment» is proposed as a purposeful process of detecting deviations of organisational and technological parameters (work volumes, durations, resource requirements) formed and tracked in the information model of the object, assessing their impact on the economic and managerial characteristics of the enterprise and taking corrective decisions before the consequences of the deviations are reflected in financial statements. Unlike traditional controlling based on retrospective accounting data, BIM-based adjustment is anticipatory and relies on a single source of data on the object. The scientific hypothesis of the work is adopted: combining information model parameters with a consistent system of management decision efficiency indicators, verification of model data and digital monitoring of deviations makes it possible to reduce the time needed to detect deviations and prepare management decisions and, through it, to reduce the number of repeated plan adjustments and the unproductive costs of a construction enterprise.

The composition of the BIM-oriented economic and managerial toolkit for the digital transformation of a construction enterprise is substantiated as a unity of a system of indicators, a data verification mechanism, monitoring and assessment tools, a digital diagnostics algorithm and a scaling roadmap. The functional blocks of the business processes of a construction enterprise subject to BIM integration – planning, cost estimating, scheduling, procurement, quality control, logistics, risk management and operation – and the mechanisms of integration through open data exchange formats, application programming interfaces, cloud platforms and a common data environment are identified. The fragmentation of existing indicators

of BIM impact is established, which necessitates building a digital infrastructure with a BIM core and a consistent system of indicators.

The **second chapter** of the dissertation presents the methodological basis of the study and forms the instrumental basis of BIM-oriented management of a construction enterprise. The architecture of a digital management infrastructure with a BIM core, combining geometric-parametric, economic and managerial circuits through an application programming interface and a common data environment, is substantiated. A system of indicators for assessing its functioning is proposed: the information value increment index and the return on investment in BIM – to assess the effect of the transition to a digital model; the coefficients of digital coordination and synchronised updating and the managerial synchronisation index – to assess the consistency of time and cost parameters; the risk-adjusted cost of stages and the productivity increment index. A comparative evaluation of methods for assessing the BIM effect (return on investment, BIM maturity models, earned value management, KPI systems) showed that each of them characterises only a particular aspect of the effect, which justifies the expediency of integral assessment.

A mechanism of analytical verification of BIM data is developed, combining organisational verification by the states of information containers in the common data environment according to the ISO 19650 series, automated rule-based model checking with classification of rules by implementation complexity, and risk-oriented prioritisation of checks based on the integral object risk, the inertial impact of an error and the scenario response index. A data quality coefficient is proposed that aggregates the results of checks across the dimensions of completeness, correctness, consistency and timeliness and is applied as a criterion of the suitability of model data for calculating efficiency indicators. A toolkit for digital monitoring of resource and time parameters is formed, combining data collection at the operational level, its integration in BIM and ERP environments, control of deviations by earned value management, localisation of deviations using a 4D model, and probabilistic and simulation forecasting. A three-level system of

management decision efficiency indicators is proposed: partial indicators – the integral management efficiency index and the digital reactivity coefficient – the integrated return on management decisions, generalised in a complex efficiency index. The conditions for applying the entropy method to determine weights are substantiated, in particular the need to compare the result with the estimate obtained with equal weights for a short series of observations, together with a metric for checking forecast accuracy. In general, the second chapter forms a methodological architecture for moving from information model data to an integral assessment of the efficiency of management decisions.

The **third chapter** forms the applied basis for using the BIM-oriented toolkit and for the strategic scaling of BIM approaches. A conceptual scheme of an updated BIM model for assessing the efficiency of management decisions with analytical, managerial and economic levels is developed. The toolkit was tested on the data of a construction enterprise according to an end-to-end procedure: the financial profile of the enterprise – partial performance indicators in the time, planning, cost and performance groups – normalisation relative to the best value – weights – the integral management efficiency index. It is established that the integral management efficiency increased under any weighting method, and the largest contribution to its increase was made by time indicators – the duration of preparing management decisions and the time of detecting critical deviations. It is shown that the average magnitudes of indicator changes decrease successively from time indicators through planning indicators to cost and performance indicators, which is consistent with the research hypothesis, and that the response lag to deviations has been reduced. A scenario calculation based on the share of controlled costs determined the break-even condition of the enterprise and the maximum annual expenditure on digital infrastructure at which the use of the toolkit is economically justified. The quantitative estimates were obtained from the data of one enterprise in relative terms over two periods, and the share of controlled costs was set by scenarios, so they are of an estimated nature. An eight-stage algorithm for the digital diagnostics of management decision efficiency,

combining analytical and managerial circuits, is formed, and a roadmap for scaling BIM approaches is developed with the stages of pilot implementation, process integration, analytics scaling and strategic BIM-based adjustment and with transition criteria between them based on the proposed indicators. The limits of the toolkit's application and the prospects for its testing on time series of enterprises' internal data are determined.

The chapter sets out practical recommendations for the phased implementation of the BIM-oriented toolkit: introducing a common data environment and model data quality control on pilot objects, integrating the information model with the cost estimate, schedule and ERP system, extending KPI dashboards to the enterprise's divisions and moving to scenario forecasting and systematic adjustment of economic and managerial characteristics. It is shown that an enterprise can start scaling either from the analytical circuit (the system of indicators, digital diagnostics, scenario analysis) or from the infrastructure circuit (integration of BIM with corporate information systems), while analytical verification of BIM data, monitoring of deviations and business intelligence form the common basis of both directions. The implementation of the recommendations is consistent with the Concept for the implementation of BIM technologies in Ukraine, DSTU ISO 19650-1:2020 and DBN A.3.1-5:2016.

The leading innovation of the study lies in the formation of a holistic BIM-oriented economic and managerial approach to the digital transformation of a construction enterprise, which transfers the assessment of BIM effects from the level of an individual project to the level of the enterprise as a whole. Unlike existing approaches focused on technological design indicators, the proposed approach links deviations detected in the information model with the time, planning, cost and performance characteristics of the enterprise through a system of indicators, an integral assessment of management efficiency and a scenario assessment of the economic effect. Fundamentally new is the combination of model data verification, digital monitoring of deviations, diagnostics of management decision efficiency and phased scaling of BIM approaches with

transition criteria between stages. This ensures a transition from the retrospective reflection of the consequences of deviations in financial statements to anticipatory BIM-based adjustment of the economic and managerial characteristics of a construction enterprise.

The scientific novelty of the dissertation lies in the development of a BIM-oriented economic and managerial toolkit for the digital transformation of a construction enterprise, combining conceptual, methodological and applied provisions for assessing and adjusting its economic and managerial characteristics on the basis of information model data.

For the first time, a scientific and methodological approach to assessing the efficiency of BIM-based adjustment of the economic and managerial characteristics of a construction enterprise has been developed which, unlike existing approaches that assess BIM effects within an individual project through the number of clashes, design duration or cost estimate accuracy, links deviations detected in the information model with the time, planning, cost and performance characteristics of the enterprise through a system of partial indicators, an integral management efficiency index as a form of aggregating partial indicators (normalisation relative to the best value is meaningful for a series of at least three periods or an external benchmark) and a scenario assessment of the economic effect based on the share of controlled costs, which makes it possible to determine the lower bound of the economic effect and the maximum level of expenditure on digital infrastructure.

The dissertation improved: the conceptual framework of the economics of digital transformation of a construction enterprise by clarifying the content of the concept of «economic and managerial characteristics of a construction enterprise» as a set of financial and economic indicators and characteristics of the management system formed through the parameters of construction works, introducing the concept of «BIM-based adjustment» as a process of anticipatory adjustment of these characteristics on the basis of deviations detected in the information model, and substantiating the composition of the BIM-oriented economic and managerial

toolkit of digital transformation as a unity of a system of indicators, a data verification mechanism, monitoring and assessment tools, a digital diagnostics algorithm and a scaling roadmap.

Further development has been made of: the mechanism of analytical verification of BIM data, which combines organisational verification according to the ISO 19650 series, automated rule-based model checking and risk-oriented prioritisation of checks, with aggregation of the check results in a data quality coefficient as a criterion of the suitability of model data for economic calculations; the roadmap for scaling BIM approaches in the management of a construction enterprise, which contains the stages of pilot implementation, process integration, analytics scaling and strategic BIM-based adjustment with transition criteria between stages based on the proposed indicators and is consistent with the Concept for the implementation of BIM technologies in Ukraine, DSTU ISO 19650-1:2020 and DBN A.3.1-5:2016.

The practical value of the dissertation results lies in the application of the developed BIM-oriented toolkit – the methodology for assessing the efficiency of BIM-based adjustment, the system of indicators, the data verification mechanism, the algorithm for the digital diagnostics of management decision efficiency and the scaling roadmap – for timely detection of deviations, quantitative assessment of the results of management decisions and justification of the digital transformation budget of construction enterprises. The proposed system of indicators makes it possible to assess the results of BIM use by the time, planning, cost and performance characteristics of the enterprise, and the scenario calculation makes it possible to determine the lower bound of the economic effect and the maximum expenditure on digital infrastructure. The data verification mechanism and the digital diagnostics algorithm ensure the reliability of the initial information and the formation of management information in the course of work, while the scaling roadmap determines the sequence and criteria for moving to higher levels of BIM maturity. The quantitative approbation was carried out at LLC “Construction Firm “Alfa-Service”” (implementation certificate No. 75 of 14.04.2026); the suitability

of the digitally integrated management system architecture was confirmed qualitatively at LLC “Marston-Grup” (certificate No. 65-1 of 12.05.2026); the results were also used by the Institute of Local Development (notice of use No. 54 of 01.05.2026). The quantitative estimates were obtained from the data of one enterprise in relative terms over two periods and are of an estimated nature.

Keywords: BIM; building information modelling; digital transformation; construction enterprise; economic and managerial toolkit; economic and managerial characteristics; BIM-based adjustment; system of indicators; integral management efficiency index; data verification; digital monitoring; scaling roadmap.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України (категорія «Б»):

1) Поколенко В. О., Герасимчук Я. Л., Різун Д. Ю., Тищенко М. І., Щербак І. В. Теоретичні засади впровадження BIM-технологій в управлінні будівельними проєктами. Будівельне виробництво. 2025. № 80. С. 62–70. DOI: https://doi.org/10.36750/2524-2555.80.62-70.

(*Особистий внесок здобувача:* обґрунтування економіко-управлінських ефектів впровадження BIM-технологій та їх впливу на показники ефективності управління будівельними проєктами)

2) Різун Д. Ю., Поколенко В. О., Герасимчук Я. Л., Тищенко М. І. Коригування економічних та управлінських характеристик підприємства за допомогою BIM-моделювання. Просторовий розвиток. 2025. № 14. С. 392–403. DOI: https://doi.org/10.32347/2786-7269.2025.14.392-403.

(*Особистий внесок здобувача:* розроблення підходу до BIM-коригування економічних та управлінських характеристик будівельного підприємства і системи показників для оцінювання його результатів)

3) Різун Д. Ю. Механізми аналітичної верифікації даних і управління проєктною інформацією у середовищі BIM. Просторовий розвиток. 2025. № 15. С. 771–782. DOI: https://doi.org/10.32347/2786-7269.2025.15.771-782.

4) Різун Д. Ю. Інтеграція BIM-технологій у стратегію оптимізації бізнес-процесів будівельного підприємства. Шляхи підвищення ефективності будівництва. 2025. № 2 (56). С. 261–274. DOI: https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.56(2).261-274.

5) Різун Д. Ю. Інструментарій цифрового моніторингу ресурсних і часових параметрів за умов динамічної проєктної взаємодії. Шляхи підвищення ефективності будівництва. 2026. № 2 (57). С. 125–138. DOI: https://doi.org/10.32347/2707-501x.2026.57(2).125-138.

6) Чуприна Х. М., Мухін А. А., Різун Д. Ю., Микитченко Б. А. Аналітико-структурний огляд механізмів функціонування територіальних кластерів у системі державно-приватної взаємодії. Шляхи підвищення

ефективності будівництва. 2024. № 2 (54). С. 187–199. DOI: https://doi.org/10.32347/2707-501x.2024.54(2).187-199.

(*Особистий внесок здобувача:* аналіз цифрових засобів інформаційної взаємодії учасників територіальних кластерів, зокрема можливостей BIM-середовища для координації проєктів державно-приватного партнерства)

7) Рижакова Г. М., Білоус Б. В., Цай М. І., Різун Д. Ю. Аналітичне та функціональне оцінювання фінансових параметрів стратегічних інноваційних циклів у будівельних компаніях на основі концепцій method of cost allocation by activities. Шляхи підвищення ефективності будівництва. 2024. № 3 (53). С. 171–188. DOI: https://doi.org/10.32347/2707-501x.2024.53(3).171-188.

(*Особистий внесок здобувача:* обґрунтування використання даних BIM-моделі для розподілу витрат за видами діяльності та оцінювання фінансових параметрів інноваційних циклів будівельних компаній)

8) Петруха Н. М., Омельчук Р. С., Різун Д. Ю., Білоус Б. В., Литарев О. Г. Формування крос-функціональних команд та інші заходи економіко-управлінського реінжинірингу бізнес-процесів в контексті впровадження інноваційних заходів на будівельних підприємствах. Шляхи підвищення ефективності будівництва. 2023. № 3 (52). С. 110–132. DOI: https://doi.org/10.32347/2707-501x.2023.52(3).110-132.

(*Особистий внесок здобувача:* обґрунтування ролі BIM-технологій у формуванні крос-функціональних команд і реінжинірингу бізнес-процесів будівельних підприємств)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації: тези доповідей на конференціях:

9) Малихіна О. М., Різун Д. Ю. Формування цифрових засобів контролю ресурсних і часових параметрів у динамічних умовах проєктної взаємодії. Економіка та підприємництво в умовах сучасних викликів : матеріали IV Всеукр. наук.-практ. конф., 4 черв. 2026 р., м. Житомир.

Житомир : Поліський нац. ун-т, 2026. С. 353–355. URL: http://ir.polissiauniver.edu.ua/handle/123456789/18508.

10) Гроголь В. Я., Різун Д. Ю., Чуприна Х. М. Забезпечення адаптивної поведінки будівельного підприємства в умовах цифровізації та BIM-коригування економіко-управлінських характеристик будівельного підприємства. Актуальні проблеми освітнього процесу в контексті європейського вибору України : матеріали VIII Міжнар. конф. (м. Київ, 12 листоп. 2025 р.). Київ : Ліра-К, 2026. С. 615–617. URL: https://repositary.knuba.edu.ua/handle/123456789/18396.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....25

ВСТУП.....27

РОЗДІЛ 1. КОНЦЕПТУАЛЬНІ ОРІЄНТИРИ ВПРОВАДЖЕННЯ BIM У СИСТЕМУ ЕКОНОМІКО-УПРАВЛІНСЬКИХ ТРАНСФОРМАЦІЙ БУДІВЕЛЬНОГО ПІДПРИЄМСТВА.....37

1.1. Формування теоретичних і прикладних засад застосування BIM-технологій в управлінні проєктами будівельної галузі.....37

1.2. Адаптація економічних і управлінських характеристик будівельного підприємства в контексті BIM-моделювання.....56

1.3. Інтеграція BIM-технологій у стратегічну архітектоніку оптимізації бізнес-процесів будівельної організації.....73

Висновки до розділу 1.....85

РОЗДІЛ 2. АРХІТЕКТОНІКА ІНСТРУМЕНТІВ BIM ДЛЯ УПРАВЛІНСЬКОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ І АНАЛІТИЧНОЇ ПІДТРИМКИ РІШЕНЬ У БУДІВЕЛЬНІЙ КОМПАНІЇ.....87

2.1. Побудова цифрової інфраструктури управління будівельними підприємствами на основі BIM-моделювання.....87

2.2. Механізми аналітичної верифікації даних і управління проєктною інформацією у середовищі BIM.....103

2.3. Інструментарій цифрового моніторингу ресурсних і часових параметрів за умов динамічної проєктної взаємодії.....111

Висновки до розділу 2.....126

РОЗДІЛ 3. АПРОБАЦІЯ І СТРАТЕГІЧНЕ МАСШТАБУВАННЯ BIM ЯК ІНСТРУМЕНТУ ЕКОНОМІКО-ОРГАНІЗАЦІЙНОЇ АДАПТАЦІЇ БУДІВЕЛЬНОГО ПІДПРИЄМСТВА.....129

3.1. Пілотна реалізація BIM-моделі для оцінки економічної ефективності управлінських рішень у будівництві.....129

3.2. Діагностика показників ефективності на основі ключових KPI і сценарного аналізу в умовах BIM-впровадження.....140
3.3. Формування дорожньої карти масштабування BIM-підходів в архітектурі управління будівельною організацією.....154
Висновки до розділу 3.....165
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....167
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....170
ДОДАТКИ
Додаток А. Довідки про впровадження та повідомлення про використання результатів дисертаційного дослідження
Додаток Б. Список публікацій здобувача за темою дисертації
Додаток В. Проміжні результати розрахунку вагових коефіцієнтів методом ентропії
Додаток Г. Результати аналізу чутливості індексу IEU до зміни вагових коефіцієнтів

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

Скорочення, позначення	Розшифрування
4D, 5D, 6D, 7D	виміри інформаційної моделі: час, вартість, життєвий цикл і експлуатація, енергоефективність і сталий розвиток
AC	Actual Cost – фактичні витрати на виконані роботи
API	Application Programming Interface – прикладний програмний інтерфейс
BCF	BIM Collaboration Format – формат обміну зауваженнями до BIM-моделі
BEP	BIM Execution Plan – план виконання BIM
BI	Business Intelligence – бізнес-аналітика
BIM	Building Information Modeling – інформаційне моделювання будівель
CAD	Computer-Aided Design – система автоматизованого проєктування
CDE	Common Data Environment – спільне середовище даних
CDR	коефіцієнт цифрової реактивності
CIE	комплексний індекс ефективності управлінських рішень
COBie	Construction Operations Building Information Exchange – формат передачі даних для експлуатації об’єкта
CPI	Cost Performance Index – індекс виконання вартості
CRM	Customer Relationship Management – система управління взаємовідносинами з клієнтами
DCM	коефіцієнт цифрової координованості
DSR	коефіцієнт синхронізованого оновлення даних
EIR	Exchange Information Requirements – вимоги до обміну інформацією
ERP	Enterprise Resource Planning – система планування ресурсів підприємства
EV	Earned Value – освоєний обсяг
EVM	Earned Value Management – метод освоєного обсягу
ICVI	індекс приросту інформаційної цінності
IDS	Information Delivery Specification – специфікація постачання інформації

IEU	індекс інтегральної ефективності управління
IFC	Industry Foundation Classes – відкритий формат обміну даними BIM
IoT	Internet of Things – інтернет речей
IPD	Integrated Project Delivery – інтегрована реалізація проєктів
IPI	Investment Productivity Index – індекс приросту продуктивності
IRR*	інтегрована рентабельність управлінських рішень
ISO	International Organization for Standardization – Міжнародна організація зі стандартизації
K_{dq}	коефіцієнт якості даних BIM-моделі
KPI	Key Performance Indicators – ключові показники ефективності
MAPE	Mean Absolute Percentage Error – середня абсолютна відсоткова похибка
NBIMS	National BIM Standard – Національний стандарт BIM США
PMBOK	Project Management Body of Knowledge – звід знань з управління проєктами
PV	Planned Value – запланована вартість робіт
RCV	ризик-скоригована вартість етапу проєкту
ROI	Return on Investment – віддача від інвестицій
ROIBIM	показник віддачі від інвестицій у BIM
SCM	Supply Chain Management – управління ланцюгами постачання
SPI	Schedule Performance Index – індекс виконання строків
USI	узагальнений індекс управлінської синхронізації BIM
VDC	Virtual Design and Construction – віртуальне проєктування та будівництво
ДБН	державні будівельні норми
ДСТУ	національний стандарт України
ПОБ	проєкт організації будівництва
ППР	проєкт виконання робіт

ВСТУП

Актуальність теми дисертаційної роботи зумовлена необхідністю підвищення ефективності управління будівельними підприємствами в умовах відновлення зруйнованої інфраструктури, обмеженості фінансових і матеріальних ресурсів та зростання вимог до прозорості управлінських рішень. Специфіка будівельної діяльності характеризується мультипроєктним характером, тривалими будівельними циклами, високою часткою позикового капіталу та значною чутливістю фінансового результату до строків виконання робіт і витрат. За таких обставин навіть незначні відхилення обсягів робіт, тривалості чи потреби в ресурсах можуть суттєво погіршувати економічні та управлінські характеристики підприємства. Ключовим напрямом підвищення ефективності управління є цифрова трансформація будівельних підприємств, основою якої виступає інформаційне моделювання будівель (BIM), що забезпечує створення єдиного джерела даних про об’єкт упродовж усього життєвого циклу. Державну політику у сфері BIM визначає Концепція впровадження BIM-технологій в Україні, а нормативну основу управління інформацією становлять національні стандарти, гармонізовані зі стандартами серії ISO 19650. Теоретичні засади BIM, моделі оцінювання BIM-зрілості, управлінські ефекти BIM у поєднанні з ощадливим будівництвом і автоматизовану перевірку інформаційних моделей розкрито в працях Ч. Істмана, П. Тейхольца, Р. Сакса, К. Лістон, Б. Сукара, Л. Коскели, Дж. Кунца, М. Фішера, Д. Брайда, К. Барліш і К. Саллівана, а проблеми впровадження BIM і цифрової трансформації будівельних підприємств в Україні – у працях Л. О. Гудими, О. Ф. Ященко, О. В. Левченка, А. В. Михайленка, Г. М. Рижакової, Д. О. Чернишева, Н. Г. Кіщак, М. С. Мудрої та О. О. Приходька. Водночас у більшості досліджень ефекти BIM оцінюються на рівні окремого будівельного проєкту, а цифрова трансформація розглядається переважно як технологічне завдання. Відхилення, виявлені в інформаційній моделі, відображаються у фінансовій звітності із запізненням, коли можливості їх

коригування вже обмежені. Це актуалізує необхідність формування економіко-управлінського інструментарію, здатного пов’язати параметри інформаційної моделі з економічними та управлінськими характеристиками підприємства в цілому, кількісно оцінювати результати такого впливу за узгодженою системою показників і забезпечувати поетапне масштабування BIM-підходів. У цьому контексті розвиток BIM-орієнтованого економіко-управлінського інструментарію сприяє переходу від ретроспективного відображення наслідків відхилень до їх раннього виявлення, оцінювання та випереджального коригування.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Тематика, зміст та результати дисертаційної роботи відповідають пріоритетним напрямам науково-дослідної діяльності Київського національного університету будівництва і архітектури та плану науково-дослідних робіт кафедри менеджменту в будівництві в межах наукового напряму кафедри щодо розвитку аналітичного інструментарію управління будівельними підприємствами в умовах цифрової трансформації. Дослідження спрямоване на розвиток економіко-управлінських засад функціонування будівельних підприємств, підвищення результативності управлінських рішень і використання даних інформаційного моделювання будівель в управлінні підприємством. Дослідження також виконано в рамках науково-дослідної теми «Розвиток управлінської взаємодії інституційних учасників девелоперських проєктів» (номер державної реєстрації 0121U111793).

Дослідження відповідає Концепції впровадження BIM-технологій в Україні, національним стандартам серії ДСТУ ISO 19650 і вимогам ДБН А.3.1-5:2016 щодо організації будівельного виробництва, а також сучасним стратегічним орієнтирам цифровізації будівельної галузі. Таким чином, результати дисертаційної роботи спрямовані на розвиток економіко-управлінського забезпечення цифрової трансформації будівельних підприємств на основі єдиного джерела даних про об’єкт будівництва.

Мета дисертаційної роботи полягає в обґрунтуванні теоретико-методичних засад і розробленні BIM-орієнтованого економіко-управлінського інструментарію цифрової трансформації будівельного підприємства, що забезпечує коригування його економіко-управлінських характеристик на основі інтеграції параметрів інформаційної моделі в систему показників ефективності управлінських рішень. Досягнення поставленої мети передбачає поєднання системи показників, механізму верифікації BIM-даних, цифрового моніторингу відхилень, алгоритму діагностики ефективності управлінських рішень і дорожньої карти масштабування BIM-підходів. Робоча гіпотеза дослідження полягає в тому, що поєднання параметрів інформаційної моделі з узгодженою системою показників ефективності управлінських рішень, верифікацією даних моделі та цифровим моніторингом відхилень дає змогу скоротити час виявлення відхилень і підготовки управлінських рішень, а через нього – зменшити кількість повторних коригувань планів і непродуктивні витрати будівельного підприємства.

Для досягнення поставленої мети у дисертаційній роботі сформовано комплекс взаємопов’язаних **завдань дослідження**:

1. Проаналізувати теоретичні та прикладні засади застосування BIM в управлінні будівельними проєктами, моделі оцінювання BIM-зрілості та інституційні умови впровадження BIM.

2. Уточнити зміст понять «економіко-управлінські характеристики будівельного підприємства», «BIM-коригування» та «BIM-орієнтований економіко-управлінський інструментарій цифрової трансформації будівельного підприємства».

3. Визначити функціональні блоки бізнес-процесів будівельного підприємства, що піддаються BIM-інтеграції, та механізми такої інтеграції.

4. Обґрунтувати архітектуру цифрової інфраструктури управління з BIM-ядром і систему показників оцінювання її функціонування.

5. Розробити механізм аналітичної верифікації BIM-даних і показник якості даних інформаційної моделі.

6. Сформувати інструментарій цифрового моніторингу ресурсних і часових параметрів та трирівневу систему показників ефективності управлінських рішень з визначенням вагових коефіцієнтів методом ентропії за наявним обсягом спостережень і обов'язковим зіставленням з результатом за рівних вагових коефіцієнтів.

7. Апробувати запропонований інструментарій на даних будівельного підприємства, виконати діагностику показників, аналіз чутливості та сценарний аналіз, сформувати алгоритм цифрової діагностики ефективності управлінських рішень, розробити дорожню карту масштабування BIM-підходів і впровадити результати дослідження в практику будівельних підприємств.

Об'єктом дослідження є процеси цифрової трансформації управління економіко-управлінськими характеристиками будівельного підприємства на основі BIM.

Предметом дослідження визначено теоретико-методичні засади та BIM-орієнтований економіко-управлінський інструментарій цифрової трансформації будівельного підприємства – сукупність показників, моделей, механізмів верифікації даних і процедур цифрового моніторингу та діагностики, спрямованих на оцінювання й коригування економіко-управлінських характеристик підприємства.

Методи дослідження. Методичну основу дисертаційного дослідження становить комплекс загальнонаукових і спеціальних методів, застосування яких забезпечило системність, комплексність та обґрунтованість отриманих результатів. Для узагальнення теоретичних засад BIM, моделей BIM-зрілості та уточнення понятійного апарату використано аналіз і синтез, порівняльний аналіз, системний і структурно-функціональний підходи. Для побудови архітектури цифрової інфраструктури управління з BIM-ядром застосовано методи моделювання та порівняльної оцінки методів оцінювання ефекту

BIM. Механізм аналітичної верифікації BIM-даних сформовано з використанням методів автоматизованої перевірки моделей на основі правил і ризик-орієнтованої пріоритезації перевірок. Інструментарій цифрового моніторингу ресурсних і часових параметрів ґрунтується на методі освоєного обсягу, 4D-моделюванні, імовірнісних та імітаційних методах прогнозування. Для апробації інструментарію застосовано методи фінансового аналізу, нормування показників, метод ентропії для визначення вагових коефіцієнтів із зіставленням з рівними ваговими коефіцієнтами, аналіз чутливості та сценарний метод. Графічний метод використано для наочного подання результатів. Інформаційну базу дослідження становлять нормативно-правові акти та стандарти у сфері BIM, наукові праці вітчизняних і зарубіжних учених, дані фінансової звітності будівельного підприємства, оцінки результатів використання інструментарію, надані підприємствами, та довідки про впровадження результатів дослідження. Комплексне застосування зазначених методів сформувало методичну основу кількісного оцінювання та випереджального коригування економіко-управлінських характеристик будівельного підприємства на основі даних інформаційної моделі.

Наукова новизна одержаних у дисертації результатів полягає в обґрунтуванні та розробленні BIM-орієнтованого економіко-управлінського інструментарію цифрової трансформації будівельного підприємства, що переносить оцінювання ефектів BIM з рівня окремого проєкту на рівень підприємства в цілому та забезпечує випереджальне коригування його економіко-управлінських характеристик на основі даних інформаційної моделі. Сформований комплекс розробок поєднує систему показників, механізм верифікації даних, цифровий моніторинг відхилень, діагностику ефективності управлінських рішень і поетапне масштабування BIM-підходів, що забезпечує перехід від ретроспективного відображення наслідків відхилень у фінансовій звітності до їх раннього виявлення та кількісного оцінювання.

Вперше:

– розроблено науково-методичний підхід до оцінювання ефективності BIM-коригування економіко-управлінських характеристик будівельного підприємства, який, на відміну від наявних підходів, що оцінюють ефекти BIM у межах окремого проєкту (кількість колізій, тривалість проєктування, точність кошторисів), пов’язує відхилення, виявлені в інформаційній моделі, з часовими, плановими, витратними та результативними характеристиками підприємства через систему часткових показників, інтегральний індекс ефективності управління як форму агрегування часткових показників (нормування відносно найкращого значення є змістовним за ряду щонайменше з трьох періодів або за зовнішнього еталона) та сценарну оцінку економічного ефекту за часткою контрольованих витрат. Уточнено порядок зіставлення результату, отриманого з ентропійними ваговими коефіцієнтами, з оцінкою за рівних вагових коефіцієнтів за короткого ряду спостережень. За двох спостережень ентропійні вагові коефіцієнти відображають відносну величину зміни показників, а не їх інформативність, тому таке зіставлення є обов’язковим. Підхід дає змогу визначати нижню межу економічного ефекту і граничний рівень витрат на цифрову інфраструктуру, за якого використання інструментарію економічно виправдане.

Удосконалено:

– понятійний апарат економіки цифрової трансформації будівельного підприємства шляхом уточнення змісту поняття «економіко-управлінські характеристики будівельного підприємства» як сукупності фінансово-економічних показників і характеристик системи управління, що формуються через параметри виконання будівельних робіт, введення поняття «BIM-коригування» як процесу випереджального коригування цих характеристик на основі відхилень, виявлених в інформаційній моделі, та обґрунтування складу BIM-орієнтованого економіко-управлінського інструментарію цифрової трансформації як єдності системи показників, механізму верифікації даних, інструментарію моніторингу й оцінювання, алгоритму цифрової діагностики та дорожньої карти масштабування. На відміну від

традиційного контролінгу, що спирається на ретроспективні облікові дані, BIM-коригування має випереджальний характер і ґрунтується на єдиному джерелі даних про об’єкт.

Набуло подальшого розвитку:

– механізм аналітичної верифікації BIM-даних, що поєднує організаційну верифікацію за станами інформаційних контейнерів у спільному середовищі даних згідно зі стандартами серії ISO 19650, автоматизовану перевірку моделей за правилами та ризик-орієнтовану пріоритезацію перевірок. Розвинуто агрегування результатів перевірок за вимірами повноти, коректності, узгодженості та актуальності в коефіцієнті якості даних як критерії придатності даних моделі для економічних розрахунків. Це забезпечує достовірність вихідної інформації для оцінювання ефективності управлінських рішень;

– дорожня карта масштабування BIM-підходів в управлінні будівельним підприємством, яка містить етапи пілотного впровадження, інтеграції процесів, масштабування аналітики та стратегічного BIM-коригування з критеріями переходу між етапами, сформованими на основі запропонованих показників, та узгоджена з Концепцією впровадження BIM-технологій в Україні, ДСТУ ISO 19650-1:2020 і ДБН А.3.1-5:2016. Обґрунтовано можливість розпочинати масштабування як з аналітичного, так і з інфраструктурного контуру.

Практична цінність результатів дисертації полягає у можливості застосування BIM-орієнтованого економіко-управлінського інструментарію – методики оцінювання ефективності BIM-коригування, системи показників, механізму верифікації даних, алгоритму цифрової діагностики ефективності управлінських рішень і дорожньої карти масштабування – для своєчасного виявлення відхилень, кількісного оцінювання результатів управлінських рішень та обґрунтування бюджету цифрової трансформації будівельних підприємств. Запропонована система показників дає змогу оцінювати результати використання BIM за часовими, плановими, витратними та

результативними характеристиками підприємства, а сценарний розрахунок – визначати нижню межу економічного ефекту та граничний обсяг витрат на цифрову інфраструктуру. Механізм верифікації даних і восьмиетапний алгоритм цифрової діагностики забезпечують достовірність вихідної інформації та формування управлінської інформації в процесі виконання робіт, а не після завершення їх етапів. Дорожня карта масштабування визначає послідовність і критерії переходу до вищих рівнів BIM-зрілості. Кількісну апробацію інструментарію виконано в ТОВ «Будівельна фірма «Альфа-Сервіс»» (код ЄДРПОУ 22965175; довідка про впровадження від 14.04.2026 № 75), де використано систему часткових показників, методику оцінювання ефективності BIM-коригування та сценарний розрахунок економічного ефекту. У ТОВ «Марстон-Груп» (код ЄДРПОУ 41129232; довідка про впровадження від 12.05.2026 № 65-1) використано архітектуру цифрово інтегрованої системи управління з BIM-ядром, механізм аналітичної верифікації BIM-даних, підхід до цифрового моніторингу часових і ресурсних параметрів та алгоритм цифрової діагностики; довідка підтверджує їх придатність на якісному рівні, без кількісної оцінки ефекту. В Інституті місцевого розвитку (код ЄДРПОУ 26581632; повідомлення про використання від 01.05.2026 № 54) використано положення щодо інтеграції BIM-технологій у систему оптимізації бізнес-процесів будівельного підприємства та поєднання BIM з корпоративними інформаційними системами ERP, CRM і SCM. Кількісні оцінки ефекту отримано за даними одного підприємства у відносному вимірі за два періоди, а економічний ефект визначено сценарно як нижню межу за структурою витрат 2020 р., тому вони мають характер розрахункової оцінки (підрозділ 3.3). Документи про впровадження наведено в додатку А.

Освітньо-методична цінність результатів дослідження для підготовки здобувачів вищої освіти у будівельних закладах вищої освіти за спеціальністю 051 «Економіка» полягає у можливості використання розроблених показників, моделей та аналітичних інструментів під час

викладання дисциплін економічного, управлінського та цифрово-аналітичного спрямування. Запропоновані підходи можуть застосовуватися для формування практичних навичок оцінювання ефективності управлінських рішень на основі даних інформаційної моделі, верифікації BIM-даних і сценарного аналізу діяльності будівельних підприємств.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота є самостійно виконаним науковим дослідженням, у межах якого автором особисто сформовано та обґрунтовано основні теоретичні положення, методичні підходи, систему показників, механізм верифікації даних, алгоритм цифрової діагностики, дорожню карту масштабування і практичні рекомендації, що визначають наукову новизну та виносяться на захист. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, використано виключно ті положення та результати, які становлять особистий внесок здобувача. Особистий внесок автора у кожній праці, виконаній у співавторстві, конкретизовано у списку публікацій здобувача за темою дисертації (додаток Б).

Апробація результатів дисертації. Основні теоретичні положення, наукові результати та висновки дисертаційного дослідження пройшли апробацію в процесі їх представлення та обговорення на всеукраїнській і міжнародній науково-практичних конференціях. У ході апробації обговорювалися положення щодо BIM-коригування економіко-управлінських характеристик будівельного підприємства та формування цифрових засобів контролю ресурсних і часових параметрів у динамічних умовах проєктної взаємодії. Результати дослідження представлено на таких наукових заходах: IV Всеукраїнська науково-практична конференція «Економіка та підприємництво в умовах сучасних викликів» (м. Житомир, 4 червня 2026 р.); VIII Міжнародна конференція «Актуальні проблеми освітнього процесу в контексті європейського вибору України» (м. Київ, 12 листопада 2025 р.). Тези доповідей наведено у списку публікацій здобувача за темою дисертації (додаток Б).

Публікації. Основні результати дисертаційного дослідження опубліковано у 10 наукових працях, серед яких 8 статей у наукових фахових виданнях України, включених до категорії «Б» (з урахуванням особистого внеску здобувача їх заліковий обсяг становить 5,5 публікації), у тому числі: 3 одноосібні статті; 5 статей у співавторстві з трьома і більше авторами, які відповідно до встановлених вимог зараховуються як 0,5 публікації кожна; а також 2 тези доповідей, опублікованих у матеріалах всеукраїнської і міжнародної науково-практичних конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та чотирьох додатків. Загальний обсяг дисертації становить 198 сторінок, з яких основний текст викладено на 136 сторінках. Дисертація містить 17 таблиць та 36 рисунків. Список використаних джерел налічує 111 найменувань. Додатки містять довідки про впровадження та повідомлення про використання результатів дослідження, список публікацій здобувача за темою дисертації та матеріали, що доповнюють і конкретизують розрахунки розділу 3.

РОЗДІЛ 1. КОНЦЕПТУАЛЬНІ ОРІЄНТИРИ ВПРОВАДЖЕННЯ BIM У СИСТЕМУ ЕКОНОМІКО-УПРАВЛІНСЬКИХ ТРАНСФОРМАЦІЙ БУДІВЕЛЬНОГО ПІДПРИЄМСТВА

1.1. Формування теоретичних і прикладних засад застосування BIM-технологій в управлінні проєктами будівельної галузі

Інформаційне моделювання будівель (BIM – Building Information Modeling) є результатом еволюційного розвитку методів проєктування, будівництва та експлуатації будівель і споруд, яке трансформувало підходи до організації всього життєвого циклу об’єкта. Ідея BIM полягає в створенні, управлінні та використанні інтегрованої цифрової інформаційної моделі, яка об'єднує всі дані про об'єкт – від архітектурних, конструктивних і інженерних параметрів до фінансових, логістичних і часових аспектів. Цей підхід базується не лише на створенні тривимірної моделі, а на глибокій концептуальній зміні методології управління проєктами, в якій пріоритетним стає віртуальне керування і прийняття рішень на основі моделювання, аналізу та прогнозування варіантів розвитку подій.

Поняття BIM пройшло тривалу еволюцію від використання CAD-систем (Computer-Aided Design), які лише автоматизували креслення, до комплексних інформаційних моделей, що дозволяють об'єднати архітектурні, інженерні, будівельні, фінансові та експлуатаційні аспекти проєкту. Історично перші спроби створити цифрові представлення будівель з’явилися ще у 1970-х роках, коли Ч. Істман (C. Eastman) описав прототип системи Building Description System, у якій будівля подавалася як сукупність параметричних елементів з атрибутивними даними. Однак саме концепт інформаційного моделювання вийшов на якісно новий рівень у 1990–2000-х роках завдяки роботам Ч. Істмана, П. Тейхольца (P. Teicholz), Р. Сакса (R. Sacks) і К. Лістон (K. Liston), узагальненим у фундаментальному виданні

«BIM Handbook» [50], а також завдяки розвитку програмного забезпечення Autodesk Revit, Bentley Systems, Graphisoft ArchiCAD та інших [105].

BIM-модель не є простою візуалізацією об'єкта. Вона охоплює геометричні, функціональні, часові, вартісні та експлуатаційні характеристики. Кожен елемент у BIM-моделі несе за собою певні метадані – наприклад, матеріали, вартість, етап монтажу, тривалість експлуатації, потреби в обслуговуванні. Завдяки цьому BIM надає можливість віртуального тестування проєктних рішень до їх реалізації у фізичному середовищі. Це дає змогу уникнути конфліктів, зменшити витрати та скоротити строки виконання робіт.

У сфері управління будівельними проєктами BIM виконує роль інформаційного хабу, що дозволяє узгодити дії всіх учасників: замовника, проєктувальника, підрядника, інвестора, керівника проєкту. Впровадження BIM змінює саму логіку прийняття рішень – вона стає не лише реактивною, а й проактивною, тобто орієнтованою на прогнозування наслідків кожної дії та сценарного моделювання. Це особливо важливо в умовах високої складності проєктів, багатосторонніх контрактних відносин та обмежених ресурсів.

Поєднання BIM з класичними стандартами управління проєктами (PMBOK, PRINCE2, IPMA) знайшло відображення в концепції VDC (Virtual Design and Construction) – віртуального проєктування та будівництва, сформованій у Центрі інтегрованого проєктування об’єктів (CIFE) Стенфордського університету [73]. У межах VDC BIM виступає як цифрова платформа, яка поєднує архітектурно-конструкторське моделювання, часове планування (4D), бюджетування (5D), управління життєвим циклом (6D) та екологічний аналіз (7D). На практиці це дає змогу створити цифрового двійника об’єкта (digital twin), який відображає його реальний стан та дозволяє здійснювати керування ним упродовж десятків років експлуатації.

Суттєвий вплив на формування теоретичних основ BIM справили дослідження Р. Сакса (Технологічний інститут Ізраїлю – Техніон) та діяльність міжнародної організації buildingSMART International. Р. Сакс, Л.

Коскела, Б. Дейв і Р. Оуен обґрунтували взаємодоповнюваність BIM і концепції ощадливого будівництва (Lean Construction), побудувавши матрицю взаємодій між функціональними можливостями BIM та принципами Lean, яка засвідчила, що поєднання цих підходів забезпечує безперервне вдосконалення будівельних процесів [90]. Питання інтероперабельності – здатності різних BIM-систем обмінюватися даними через відкриті формати – вирішується на основі схеми даних IFC (Industry Foundation Classes), розвиток якої забезпечує buildingSMART International і яку закріплено міжнародним стандартом ISO 16739-1 [64].

Інше важливе питання полягає в методологічному підґрунті поняття «інформація» в BIM. У контексті проєктного управління це не лише технічні дані, а знання, які мають бути доступними в потрібний час, у потрібній формі та потрібному контексті для прийняття ефективних рішень. Саме тому поняття CDE (Common Data Environment – спільне інформаційне середовище) є ключовим у теоретичних основах BIM. Це середовище забезпечує централізований доступ до всіх даних про проєкт, контроль версій, розмежування прав доступу, що знижує ризики непорозумінь і дублювання інформації [7].

З точки зору концепції життєвого циклу проєкту, BIM охоплює етапи планування, проєктування, будівництва, введення в експлуатацію, обслуговування і навіть демонтажу об'єкта. Це дає змогу реалізувати ідею «total cost of ownership» – оцінку вартості володіння об’єктом у повному обсязі, з урахуванням не лише інвестицій, а й витрат на експлуатацію, ремонти, енергоефективність тощо. Саме тому BIM трансформує поняття ефективності у будівництві – воно більше не обмежується вартістю та строками, а включає якість, стійкість, екологічність та керованість ризиками.

BIM змінює також підхід до підготовки фахівців у сфері будівництва. Університети інтегрують BIM у навчальні плани, а професійні організації впроваджують програми сертифікації BIM-компетентностей, зокрема програму професійної сертифікації buildingSMART International. Для України

проблему кадрового забезпечення BIM – від користувачів програмних комплексів до BIM-менеджерів і експертів – розглянуто в працях О. В. Левченко та А. В. Михайленка [13; 14]. Це свідчить про визнання BIM не просто як інструмента, а як методології, що трансформує всі ланки будівельної галузі.

Водночас, не можна не згадати про виклики та ризики, що супроводжують широкомасштабне впровадження BIM. До таких належать складність цифрової трансформації традиційних компаній, опір змінам з боку персоналу, високі вимоги до навчання, значні початкові витрати, відсутність узгоджених національних стандартів (особливо в країнах, що розвиваються), проблеми з авторськими правами на модель, правовий статус BIM-документації у судах тощо. Проте ці ризики поступово долаються через створення нормативної бази (наприклад, ISO 19650, в Україні – ДСТУ ISO 19650-1:2020 [7]), розвиток спільнот практиків і накопичення позитивного досвіду впровадження.

Загалом, BIM доцільно розглядати як методологію управління інформацією в будівництві. Її впровадження трансформує всі складові діяльності галузі – від бізнес-моделей до повсякденних дій проєктних менеджерів. Саме тому питання сутності та еволюції BIM повинне розглядатися не як вузькотехнічне, а як міждисциплінарне – на перетині інформаційних технологій, менеджменту, права, економіки та урбаністики. Успішне впровадження BIM вимагає глибокого усвідомлення його теоретико-методологічних основ, що включають концепції інформаційної сумісності, життєвого циклу, цифрового двійника, відкритих стандартів, віртуального моделювання та управління знаннями в умовах складності та невизначеності.

Розуміння концептуальної сутності та міждисциплінарної природи BIM створює підґрунтя для глибшого аналізу його методологічних засад як інтеграційного механізму управління у будівництві.

Сучасне управління будівельними проєктами все більше орієнтується на необхідність інтеграції даних, процесів, людей та ресурсів у межах єдиного цифрового простору, здатного акумулювати знання про проєкт на всіх його етапах. У цьому контексті BIM (Building Information Modeling) виступає не лише як інструмент тривимірного моделювання, але і як багаторівнева методологія інтеграції, яка дозволяє об'єднати фрагментовані управлінські, інженерні та операційні практики в єдину системну модель. Методологічні основи використання BIM формуються на стику інженерного проєктування, інформаційних технологій, теорії управління та системного аналізу, що надає цьому підходу глибокий міждисциплінарний характер.

Центральним методологічним принципом BIM є системність. У межах цієї концепції будь-який будівельний об'єкт розглядається не як сукупність окремих креслень або специфікацій, а як складна динамічна система, що функціонує у конкретному середовищі, з визначеними залежностями, циклами життєдіяльності та взаємодією компонентів. Інформаційна модель стає ядром цієї системи, яке об'єднує структуровану інформацію про геометрію, логіку функціонування, ресурси, часові параметри та техніко-економічні характеристики. Саме це дозволяє BIM бути не лише засобом відображення, а й засобом керування проєктом [50].

Ще одним принципом є інтероперабельність – здатність різних програмних рішень і баз даних взаємодіяти через спільні стандарти обміну інформацією. У практичному контексті це вимагає застосування форматів IFC (Industry Foundation Classes), COBie (Construction-Operations Building Information Exchange) та інших відкритих форматів, які стандартизують обмін даними між учасниками проєкту, незалежно від використовуваного ПЗ. Це критично важливо в умовах залучення до будівництва багатьох суб'єктів із різними інструментами роботи – архітекторів, інженерів, будівельників, замовників, експертів, якісних контролерів.

BIM як методологія інтеграції спирається на концепцію «єдиного джерела правди» (single source of truth), згідно з якою вся критично важлива

інформація повинна бути представлена в централізованій, доступній, актуальній і контрольованій формі. У традиційних будівельних проєктах велика частка помилок виникає через дублювання інформації або втрату актуальності даних. Впровадження BIM дозволяє усунути ці бар'єри завдяки використанню CDE (Common Data Environment), що виконує функції не лише сховища даних, але і механізму управління версіями, правами доступу, аудитом змін і автоматичного оновлення інформації.

У методологічному розумінні, BIM поєднує різні управлінські підходи: водоспадну модель (Waterfall) – для планування ключових віх проєкту; гнучкі методології (Agile) – для адаптивного коригування моделей; Lean Construction – для оптимізації витрат і усунення втрат. Такий симбіоз концепцій є ознакою нової управлінської парадигми, що виходить за межі класичних моделей PMBOK або PRINCE2 і формує основи цифрового управління будівництвом. Саме через таку інтеграцію BIM перетворюється на універсальний засіб реалізації стратегій сталого розвитку, цифрової трансформації та підвищення прозорості будівельного середовища [90; 94].

Методологія BIM також базується на ідеї параметризації. Кожен елемент в моделі несе інформацію про матеріал, розміри, вартість, виробника, технологію монтажу, етап життєвого циклу, потенційну потребу в обслуговуванні. Це дозволяє не лише бачити «що буде побудовано», а й розуміти «як буде побудовано», «за скільки», «в які терміни» та «з якими наслідками». Саме ця параметризація стає фундаментом для сценарного аналізу – моделювання альтернатив розвитку подій на основі зміни вхідних параметрів. Наприклад, зміна матеріалу або підрядника автоматично змінює вартісну й часову модель, що дозволяє менеджерам приймати обґрунтовані рішення.

У рамках інтеграційної методології важливе місце посідає також концепція цифрового двійника (digital twin) – динамічної моделі реального об'єкта, яка оновлюється в режимі реального часу та дає змогу управляти об'єктом після завершення будівництва. Цей підхід є основою концепції 6D

та 7D BIM – управління життєвим циклом і оцінка екологічної ефективності. У будівельному середовищі цифровий двійник може відображати стан інженерних систем, зношеність матеріалів, енергоспоживання та інші критичні параметри, що забезпечує новий рівень обслуговування об'єктів.

Не менш важливим є методологічне обґрунтування зміни комунікаційної парадигми при впровадженні BIM. Якщо раніше обмін інформацією здійснювався через документи (креслення, специфікації, звіти), то в умовах BIM головною одиницею обміну стає сама модель. Це означає перехід від документоорієнтованої до модельноорієнтованої комунікації. Такий підхід дозволяє усунути конфлікти, підвищити швидкість прийняття рішень та уникнути втрати інформації при передачі між учасниками.

BIM також пропонує методологію формування нових ролей у проєкті – з’являються такі функції як BIM-координатор, BIM-менеджер, інформаційний модератор. Ці ролі несуть відповідальність за управління інформаційним потоком, валідацію даних, координацію моделей, що свідчить про структурну зміну самого управління проєктами. Це вимагає розробки нових компетенцій, змін в освітніх програмах, методів акредитації та сертифікації учасників [7; 50].

Дослідження методологічних основ BIM також включає обґрунтування нових моделей взаємодії між стейкхолдерами. У класичному трикутнику замовник – проєктант – підрядник BIM забезпечує прозорість, одночасний доступ до моделі, можливість узгодження рішень в режимі реального часу. Це дає змогу перейти до контрактних форм типу IPD (Integrated Project Delivery), де розподіл відповідальності та винагороди здійснюється колективно, на основі спільної моделі. Такий підхід знижує конфліктність, стимулює спільну відповідальність за результат, а також дозволяє залучати інвесторів на ранніх етапах проєктування.

Узагальнення методологічних засад BIM як інтеграційного інструменту управління будівельним проєктом наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1.

Методологічні аспекти BIM як інтеграційної системи управління у будівництві *(розроблено автором на основі [7; 50])*

1	Системність	Розгляд об’єкта як динамічної системи з взаємопов’язаними компонентами, які функціонують у конкретному середовищі.
2	Інтероперабельність	Забезпечення взаємодії різних ПЗ через відкриті формати обміну (IFC, COBie), зменшення фрагментації інформації.
3	Концепція «єдиного джерела правди»	Формування єдиного централізованого середовища (CDE) з контрольованим доступом та управлінням версіями.
4	Інтеграція управлінських підходів	Поєднання методів Waterfall, Agile, Lean для комплексного керування проєктом з різними фазами і сценаріями.
5	Параметризація моделі	Присвоєння кожному елементу моделі фізичних, часових, вартісних та експлуатаційних характеристик.
6	Цифровий двійник (Digital Twin)	Динамічна модель об’єкта, що відображає його реальний стан у реальному часі з можливістю моніторингу та аналізу.
7	Модельноорієнтована комунікація	Перехід від документообміну до безпосередньої роботи з інформаційною моделлю, що усуває інформаційні втрати.
8	Формування нових ролей у проєкті	Впровадження BIM-менеджера, координатора, модератора для управління потоками інформації та координації.
9	Взаємодія між стейкхолдерами	Реалізація контрактів IPD, прозорість дій, одночасна робота з моделлю та розподілена відповідальність.

Таким чином, методологія BIM – це багаторівнева структура, що поєднує принципи системного підходу, відкритих стандартів, параметризації,

інтегрованого управління, цифрового моделювання та управління життєвим циклом. Йдеться не лише про набір технічних засобів, а й про зміну управлінської логіки, яка дозволяє будівельній галузі переходити на якісно новий рівень організації праці, прийняття рішень, використання ресурсів та взаємодії з зовнішнім середовищем.

Глибина реалізації зазначених методологічних засад на конкретному підприємстві визначається рівнем зрілості BIM, що зумовлює потребу в аналізі підходів до його класифікації та оцінювання.

Одним із центральних теоретичних блоків у дослідженні методології впровадження BIM-технологій у будівельних проєктах є класифікація рівнів зрілості цих технологій. Під зрілістю у цьому контексті розуміється не лише ступінь використання цифрових інструментів, а глибина інтеграції інформаційного моделювання в системи управління проєктами, а також рівень зрозумілості, доступності, координованості та стійкості інформаційної моделі на різних етапах життєвого циклу об’єкта.

Ідея рівнів зрілості BIM отримала розвиток у результаті досліджень таких провідних організацій як buildingSMART, британська урядова ініціатива UK BIM Task Group та міжнародні експертні кола, зокрема через класифікації, представлені в стандартах PAS 1192, ISO 19650, а також у роботах таких дослідників, як Mark Bew і Mervyn Richards. Їхня модель "Bew-Richards BIM Maturity Model" стала базовою рамкою для оцінювання ступеня зрілості впровадження BIM в різних країнах та організаціях [62; 86].

Найпоширенішим є поділ на чотири основні рівні зрілості: Level 0, Level 1, Level 2 та Level 3. Кожен з них характеризується своїм підходом до обміну інформацією, глибиною інтеграції даних і ступенем взаємодії між учасниками проєкту. На нульовому рівні (Level 0) використовується виключно двовимірне креслення (2D), без централізованого управління даними. Це типово для застарілих або слабко цифровізованих організацій. Інформація зберігається в окремих документах і передається через друковані або цифрові копії, без узгодження версій або стандартів.

Перший рівень (Level 1) передбачає застосування комбінації 2D та 3D CAD-графіки з елементами стандартів управління даними. Хоча моделі вже містять певну геометрію, обмін даними все ще не є інтегрованим. Управління здійснюється на основі роздільних інформаційних систем. Вже тут з'являється елемент спільного середовища даних (Common Data Environment), однак взаємодія між суб'єктами проєкту ще не має ознак повної координації.

Другий рівень (Level 2), який став обов'язковим для державного сектору Великобританії з 2016 року, базується на застосуванні 3D-моделей, які створюються кожною організацією окремо, але об'єднуються в межах CDE через стандартизовані формати (наприклад, IFC). Це рівень, де BIM використовується як технологія координації, але ще не як повністю інтегрована система. Суттєвим досягненням цього рівня є налаштування спільної мови між проєктувальниками, підрядниками та замовниками, зменшення кількості колізій та помилок [62; 86].

Третій рівень (Level 3) характеризується переходом до повної інтеграції даних – так званий iBIM (integrated BIM). Усі учасники проєкту працюють над єдиною інформаційною моделлю в реальному часі. Дані не лише спільні, а й взаємозалежні. Цей рівень дає змогу досягнути повноцінного управління життєвим циклом об'єкта, з одночасним врахуванням проєктування, будівництва, експлуатації, реконструкції та навіть утилізації. На цьому рівні стає можливою реалізація концепції цифрових двійників, розумних будівель, моніторингу в режимі реального часу та адаптивного управління [58; 86].

Важливим напрямом подальшого розвитку стало уявлення про виміри BIM – 3D, 4D, 5D, 6D, 7D і навіть 8D BIM, які не є рівнями зрілості, а радше функціональними розширеннями можливостей BIM.

- 3D BIM — це геометрична модель,
- 4D — додає час (графіки, календарі),
- 5D — фінансові показники, кошториси,
- 6D — життєвий цикл і експлуатація,

- 7D — енергоефективність, сталий розвиток,
- 8D — безпека праці, соціальна відповідальність.

Кожен з цих вимірів дозволяє побачити будівництво не як лінійний процес, а як багатовимірну систему зі складними зв'язками. Вплив BIM-зрілості на ефективність будівельних процесів проявляється у кількох площинах. По-перше, це якість управлінських рішень – завдяки моделюванню сценаріїв менеджери можуть обрати оптимальний варіант реалізації, уникнути колізій і зменшити ризики. По-друге, вплив на фінансову ефективність – моделювання дозволяє точно прогнозувати обсяги ресурсів, розраховувати кошториси, планувати грошові потоки. По-третє, скорочення часу на реалізацію проєкту – координація дій між учасниками зменшує простої, дозволяє швидше реагувати на зміни.

Для будівельного виробництва визначальним є зв'язок вимірів 4D і 5D з організаційно-технологічним проєктуванням. Відповідно до ДБН А.3.1-5:2016 основу організації будівельного виробництва становлять проєкт організації будівництва (ПОБ) і проєкт виконання робіт (ППР), до складу яких входять календарні плани, будівельні генеральні плани, відомості потреби в матеріально-технічних ресурсах і технологічні карти [5]. BIM-модель дає змогу формувати ці документи не як окремі креслення й таблиці, а як похідні від єдиної інформаційної моделі: обсяги робіт визначаються безпосередньо з елементів моделі, календарний план прив'язується до конструктивних елементів і захваток, а потреба в ресурсах розраховується з урахуванням технологічної послідовності монтажу. Унаслідок цього зміна проєктного рішення відображається на тривалості робіт, завантаженні ресурсів і кошторисній вартості, що створює організаційно-технологічне підґрунтя для коригування економіко-управлінських характеристик будівельного підприємства.

Рівень зрілості BIM також визначає ступінь технологічної адаптації компанії. На низькому рівні фірми обмежуються використанням CAD-систем і електронного документообігу, а на високому – впроваджують хмарні

технології, мобільні рішення, датчики IoT, технології сканування та штучного інтелекту для аналізу моделей. Це трансформує архітектуру IT-інфраструктури компаній, змінює корпоративну культуру та вимагає нових компетенцій від персоналу.

Оцінювання рівня зрілості BIM здійснюється за допомогою спеціалізованих моделей та індексів. Модель BIM Capability Maturity Model, що входить до Національного стандарту BIM США (NBIMS), оцінює зрілість інформаційної моделі за одинадцятьма напрямами, зокрема за насиченістю даних, охопленням життєвого циклу, управлінням змінами, ролями учасників, бізнес-процесами та рівнем підтримки формату IFC [81]. Б. Сукар (B. Succar) запропонував розглядати BIM у трьох полях діяльності – технології, процесів і політики – та виокремив етапи зрілості, на основі яких сформовано матрицю оцінювання BIM-компетентності організацій [99]. Інструмент BIM QuickScan, розроблений нідерландською організацією TNO, поєднує кількісне та якісне оцінювання «жорстких» і «м'яких» аспектів BIM за чотирма розділами: організація та управління, ментальність і культура, інформаційна структура та потоки, інструменти й застосунки [91].

Інституційна підтримка також має суттєве значення. У Великій Британії, Сінгапурі, Фінляндії державні програми цифровізації будівництва пов'язують рівень BIM-зрілості з можливістю участі компаній у публічних закупівлях і вимогами до звітності [53]. В Україні впровадження BIM на рівні будівельних підприємств має переважно ініціативний характер і зосереджене у великих девелоперських та проєктних компаніях, тоді як обов'язкові вимоги до застосування BIM у державному секторі перебувають на етапі запровадження, а кадрове забезпечення галузі залишається недостатнім [4; 14]. Узагальнену класифікацію рівнів зрілості BIM, ступенів цифрової інтеграції та управлінських можливостей, що відкриваються на кожному рівні, наведено в табл. 1.2.

Таким чином, теоретична класифікація рівнів зрілості BIM дозволяє не лише розуміти стан цифрової трансформації організації, а й виступає

інструментом стратегічного управління змінами. Поступове просування від нижчих рівнів до інтегрованих моделей є не лише технологічним, а й організаційним процесом, що передбачає трансформацію мислення, процесів, компетенцій та систем управління.

Таблиця 1.2.

Класифікація рівнів зрілості BIM та їх характеристики

(розроблено автором на основі [86; 94])

Level 0	2D CAD	Використання лише двовимірної графіки без цифрової координації.	Відсутній	Обмін через документи, локальне зберігання, низька ефективність.
Level 1	Часткова координація	Комбінація 2D і 3D CAD, поява елементів CDE, управління даними нецентралізоване.	Обмежений	Базовий обмін даними, часткова стандартизація, обмежена інтеграція.
Level 2	Координоване моделювання	Створення 3D-моделей окремими командами, використання форматів IFC, об'єднання через CDE.	Помірний	Зниження кількості помилок, покращення координації, обґрунтованість рішень.
Level 3	Повна інтеграція (iBIM)	Робота з єдиною моделлю в реальному часі, повна координація між учасниками, інтеграція життєвого циклу.	Повний	Реалізація цифрового двійника, управління експлуатацією, сценарне планування.

Розуміння та вимірювання BIM-зрілості стає основою для формування дорожньої карти цифрового розвитку підприємства, що охоплює технічну, фінансову, управлінську та культурну складову будівельного бізнесу. Поступове підвищення рівня BIM-зрілості вимагає не лише технологічних рішень, а й цілісної інституційної підтримки.

Саме тому доцільно перейти до аналізу нормативних, правових і організаційних умов, що забезпечують ефективне впровадження BIM як системної практики в будівництві.

Запровадження технологій інформаційного моделювання будівель (BIM) неможливе без відповідної нормативної, організаційної та правової підтримки, яка створює умови для системної інтеграції нових підходів у будівельну практику. Теоретико-методологічна база BIM має не лише технічний, а й глибоко інституційний характер, оскільки її ефективне функціонування залежить від взаємодії нормативних актів, стандартів, регуляторних органів, процедур акредитації, державних стратегій і корпоративних практик. Впровадження BIM як управлінського та інженерного інструменту перетворюється на інституціональний процес, в якому задіяні державні установи, професійні об’єднання, наукові центри, освітні інституції, розробники ПЗ та бізнес-структури [53].

В міжнародній практиці перші приклади інституціоналізації BIM пов’язані з досвідом Великої Британії, яка на початку 2010-х років розпочала цілеспрямовану політику цифровізації будівельного сектору. Важливим кроком стало створення у 2011 р. UK BIM Task Group – урядової ініціативи, яка забезпечила розробку стандартів PAS 1192 та подальший перехід до міжнародного стандарту ISO 19650. З 2016 року на рівні державних закупівель у Великій Британії запроваджено обов’язковість використання BIM Level 2 для проєктів центрального уряду [62]. Це дало поштовх до масштабного впровадження BIM серед приватних компаній, які адаптувалися до нових вимог.

Схожі ініціативи реалізовані у Фінляндії, Нідерландах, Данії, Німеччині, Південній Кореї, Австралії та Сінгапурі. У Сінгапурі, зокрема, уряд запровадив Building and Construction Authority (BCA) BIM Roadmap – поетапну програму впровадження BIM, що включала фінансові стимули для компаній, освітні програми, акредитацію фахівців і підтримку стандартизації даних. У США аналогічну роль виконують NIBS (National Institute of Building Sciences) та програма NBIMS (National BIM Standard) [81]. На рівні Європейського Союзу узгодження підходів до впровадження BIM у публічному секторі забезпечує EU BIM Task Group, яка у 2017 р. оприлюднила настанову EU BIM Handbook, перекладену, зокрема, українською мовою [53], а розроблення відкритих форматів даних і сертифікацію фахівців здійснює міжнародна організація buildingSMART International.

Усі ці приклади демонструють важливість наявності державної стратегії цифровізації будівельної галузі як основи для впровадження BIM. Стратегія повинна містити чітко визначені цілі, етапи впровадження, вимоги до учасників, систему моніторингу, правовий захист цифрових моделей, стандарти документації та вимоги до безпеки даних. Такі стратегії в більшості країн поєднуються з реформою дозвільних процедур, переходом до електронних платформ перевірки документації, інтеграцією BIM у систему експертизи, а також формуванням цифрових кадастрів.

Правові аспекти BIM стосуються передусім прав власності на інформаційні моделі, розмежування відповідальності за внесення змін, використання моделі в арбітражі, а також забезпечення безпеки та захисту персональних і технічних даних. На рівні міжнародних стандартів ці питання регулюються через ISO 19650, що визначає принципи управління інформацією протягом життєвого циклу об’єкта. Стандарт передбачає, що кожен учасник проєкту має визначені ролі в моделі – автор, координатор, рецензент, і всі дії мають фіксуватись у CDE. Це створює основу для юридичної достовірності BIM-моделі як доказу у випадку конфлікту [7].

В Україні державну політику у сфері BIM визначає Концепція впровадження технологій будівельного інформаційного моделювання (BIM-технологій), схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 17 лютого 2021 р. № 152-р. Планом заходів з її реалізації передбачено внесення змін до актів законодавства, прийняття гармонізованих з міжнародними національних стандартів та реалізацію пілотних проєктів будівництва з використанням BIM-технологій до IV кварталу 2025 р. [22]. Нормативну основу управління інформацією становлять національні стандарти: з 1 квітня 2020 р. набрали чинності 16 стандартів, гармонізованих з міжнародними стандартами щодо BIM, а з 1 липня 2020 р. – ДСТУ ISO 19650-1:2020, ідентичний міжнародному стандарту ISO 19650-1:2018 [7].

Правові засади організації будівництва визначає Закон України «Про регулювання містобудівної діяльності» [21], а цифровізацію дозвільних і реєстраційних процедур забезпечує Єдина державна електронна система у сфері будівництва [6], що створює передумови для обміну інформаційними моделями між учасниками будівництва та органами державного контролю. Процедури управління інформацією на етапі реалізації активу, зокрема вимоги до обміну інформацією та план виконання BIM, деталізовано в стандарті ISO 19650-2 [65].

Разом з тим наявність стратегічних документів і стандартів ще не забезпечує масового застосування BIM на рівні будівельних підприємств. Ключовими бар’єрами залишаються незавершеність нормативного врегулювання статусу інформаційної моделі в процедурах експертизи проєктної документації та прийняття об’єктів в експлуатацію, відсутність методик оцінювання економічного ефекту від впровадження BIM для підрядних організацій, дефіцит BIM-фахівців і значні початкові витрати на програмне забезпечення та навчання персоналу [4; 13].

Організаційні аспекти впровадження BIM включають реорганізацію управлінських процесів у будівельних компаніях. Потрібно створювати спеціальні підрозділи (BIM-відділи), впроваджувати нові посади (BIM-

менеджер, інформаційний координатор), адаптувати структуру відповідальності та системи звітності. Це супроводжується змінами в бізнес-процесах – від розробки проєкту до авторського та технічного нагляду, включно з передачею об’єкта в експлуатацію.

На макрорівні реалізація BIM вимагає створення інформаційної інфраструктури – серверів, хмарних рішень, платформ для CDE, доступу до обчислювальних потужностей для візуалізації та симуляцій. У цьому контексті важливу роль відіграє державно-приватне партнерство, коли великі IT-компанії, освітні заклади, будівельні фірми та урядові структури формують спільні ініціативи – хаби цифрового будівництва, освітні платформи, openBIM-лабораторії.

Ключову роль у підтримці впровадження BIM відіграють заклади вищої освіти. У світі функціонують магістерські програми з BIM-менеджменту та системи міжнародної сертифікації фахівців. В Україні підготовку BIM-фахівців здійснює, зокрема, Київський національний університет будівництва і архітектури; необхідність поетапного формування компетентностей від рівня користувача програмних комплексів до рівня BIM-менеджера та експерта обґрунтовують О. В. Левченко та А. В. Михайленко [13; 14]. Впровадження BIM потребує не лише знання програмного забезпечення, а й розуміння логіки управління даними, координування між підрозділами, ризик-менеджменту та проєктного мислення. Основні елементи, від яких залежить ефективність інтеграції BIM у національну систему будівництва, узагальнено на рис. 1.1.

Таким чином, інституційні, правові та організаційні аспекти впровадження BIM є фундаментальними для формування стійкого середовища цифрового будівництва. Вони визначають, наскільки технології будуть не лише доступні, але й ефективно реалізовані у практиці, закріплені правовим полем і підтримані освітньо-кадровим потенціалом. Успіх цифрової трансформації в будівництві неможливий без стратегічного підходу

до формування нормативної бази, правового статусу моделей, оновлення освітньої системи та інституційної підтримки на національному рівні.

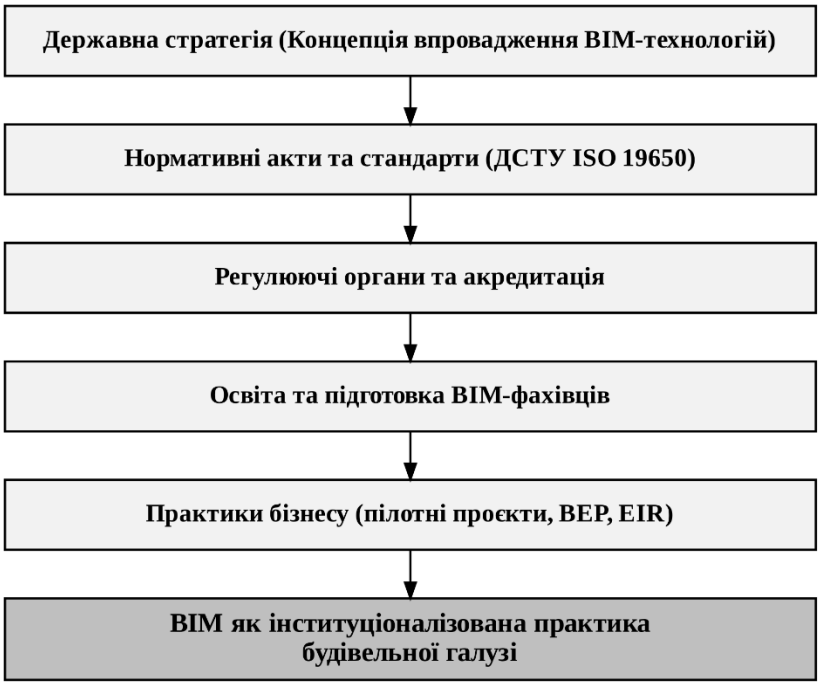


Рис. 1.1. Інституціоналізація BIM *(розроблено автором на основі [22; 53])*

Аналіз наукових праць дозволяє виокремити кілька напрямів дослідження BIM у будівництві. Перший напрям, представлений працями Ч. Істмана, П. Тейхольца, Р. Сакса, К. Лістон [50] і Б. Сукара [99], зосереджений на інформаційній та технологічній природі моделі, її структурі, рівнях зрілості й методах оцінювання BIM-компетентності. Другий напрям пов’язаний з організаційно-управлінськими ефектами BIM – поєднанням з концепцією ощадливого будівництва [90], віртуальним проєктуванням і будівництвом [73], контрактними моделями інтегрованої реалізації проєктів. Третій напрям, розвинутий у працях українських науковців, охоплює проблеми впровадження BIM в Україні: виклики для будівельної галузі [4], застосування програмних комплексів на базі BIM-технологій [12], кадрове

забезпечення [13; 14], оцінювання доцільності використання BIM для будівельного проєкту [1].

Узагальнюючі огляди вигод, ризиків і викликів упровадження BIM у будівельній галузі наведено в працях С. Азхара [35] та А. Гаффаріангосейні зі співавторами [55]; Р. Міеттінен і С. Паавола розглядають упровадження BIM не як одномоментну технологічну заміну, а як тривалий процес організаційних змін [79]. Специфіку застосування BIM для наявних будівель та інфраструктурних об'єктів проаналізовано в працях Р. Фолька [104], А. Бредлі [40], В. Шоу [93], а поступовий перехід від 3D-моделі до обчислюваних nD-моделей – у дослідженні Л. Діна [45]. Метрики оцінювання BIM-результативності організацій запропоновано Б. Сукаром, В. Шером і А. Вільямсом [101]. Макрорівневі чинники впровадження BIM, роль публічного сектору та державних стратегій розглянуто в працях Б. Сукара і М. Кассема [70; 100], П. Сміта [95] та Р. Іді [48], а обмеження впровадження BIM малими будівельними фірмами – у роботі А. Дейнті зі співавторами [44]. Теоретичні засади впровадження BIM-технологій в управлінні будівельними проєктами в умовах українських підприємств висвітлено в праці [18].

Водночас у більшості досліджень ефекти BIM оцінюються на рівні окремого будівельного проєкту – через скорочення кількості колізій, тривалості проєктування чи похибок кошторисних розрахунків. Недостатньо розробленими залишаються питання взаємозв'язку організаційно-технологічних параметрів, що формуються в інформаційній моделі (обсяги робіт, тривалість, ресурси), з економічними та управлінськими характеристиками будівельного підприємства в цілому; кількісного оцінювання такого впливу за допомогою узгодженої системи показників, верифікованої на реальних даних; методичного забезпечення поетапного масштабування BIM від пілотного проєкту до рівня підприємства. Розв'язання цих питань потребує, насамперед, уточнення змісту економіко-управлінських характеристик будівельного підприємства та механізму їх коригування засобами BIM-моделювання.

1.2. Адаптація економічних і управлінських характеристик будівельного підприємства в контексті BIM-моделювання

BIM (Building Information Modeling) є інструментом для управління будівельними проєктами, що дає змогу інтегрувати всі етапи проєктування, будівництва та експлуатації об'єкта в єдину цифрову модель. BIM-моделювання дає змогу отримувати точну інформацію про проєктні, економічні та управлінські характеристики підприємства на кожному етапі його життєвого циклу. Впровадження цієї технології дозволяє значно підвищити ефективність управління, забезпечити більшу точність у фінансових розрахунках і коригуванні проєктних рішень у реальному часі. BIM дає змогу інтегрувати дані про матеріали, ресурси, терміни виконання, витрати та якість виконаних робіт, що дозволяє забезпечити чітку координацію між усіма учасниками проєкту.

Одним із ключових аспектів коригування економічних характеристик підприємства є здатність BIM-моделі надавати інформацію про оптимальні витрати на матеріали, терміни виконання робіт і робочу силу. Моделювання дає змогу виявити можливі варіанти зменшення витрат, без втрати якості будівництва, що дозволяє керівництву підприємства коригувати бюджет проєкту і забезпечити його економічну ефективність [12]. Це, у свою чергу, дозволяє уникати перевитрат, своєчасно виявляти недоліки в організації робіт і приймати коригувальні заходи.

Основні економічні та управлінські характеристики підприємства, що коригуються за допомогою BIM-моделювання, та механізми такого коригування узагальнено в табл. 1.3.

Впровадження BIM-моделювання в управлінські та економічні процеси будівельного підприємства дає змогу вдосконалити управління проєктами на всіх етапах – від проєктування до експлуатації. Завдяки інтеграції даних в єдину модель, керівництво підприємства має доступ до актуальної інформації

про витрати, час виконання робіт, якість і використання ресурсів в реальному часі. Це дозволяє оперативно реагувати на будь-які зміни або відхилення від запланованих показників, оптимізувати розподіл ресурсів і коригувати стратегію для досягнення поставлених цілей.

Завдяки точним даним про економічні та управлінські характеристики, які надає BIM, підприємства можуть приймати обґрунтовані рішення щодо інвестицій, вибору підрядників, а також стратегії будівництва, що знижує ризики і підвищує ефективність. Крім того, BIM забезпечує прозорість на всіх етапах проєкту, що значно знижує ймовірність виникнення помилок і затримок. Це також підвищує довіру до будівельної компанії з боку інвесторів, замовників та інших стейкхолдерів [31].

Таблиця 1.3.

Економічні та управлінські характеристики, що коригуються за допомогою BIM-моделювання (*розроблено автором на основі [12]*)

Характеристика	Опис функціональності	Як BIM допомагає в коригуванні
Економічні витрати	Вартість матеріалів, робіт, часу та ресурсів	Оптимізація витрат через точне планування і контроль матеріалів і робочої сили
Часові витрати	Тривалість виконання проєкту на кожному етапі	Прогнозування та коригування термінів виконання робіт, зменшення затримок
Якість виконання робіт	Контроль за дотриманням стандартів якості та технічних вимог	Забезпечення високих стандартів якості через автоматизований контроль і виявлення дефектів на ранніх етапах
Управління ресурсами	Управління матеріалами, обладнанням і робочою силою	Моніторинг та оптимізація використання ресурсів, їх перерозподіл у разі необхідності
Управлінські процеси	Координація та інтеграція всіх етапів будівництва	Підвищення ефективності взаємодії між командами за допомогою спільної цифрової моделі

Поняття економічних та управлінських характеристик будівельного підприємства є комплексною категорією, що охоплює системно взаємопов'язані показники, які відображають як фінансово-економічний стан, так і організаційно-управлінський потенціал суб'єкта господарювання у сфері будівництва. Ці характеристики формують основу для оцінки ефективності функціонування підприємства, його здатності до реалізації стратегічних цілей, адаптації до ринкових змін і забезпечення сталого розвитку.

До економічних характеристик будівельного підприємства, як правило, відносять: прибутковість, рентабельність, ліквідність, оборотність активів, рівень собівартості, ефективність використання основних і оборотних засобів, фінансову стійкість [9]. Водночас управлінські характеристики охоплюють елементи організаційної структури, систему прийняття рішень, кадровий потенціал, інструменти стратегічного планування, використання інформаційних технологій в управлінні, а також рівень діджиталізації управлінських процесів, інноваційність і корпоративну культуру. Ключові групи цих характеристик наведено на рис. 1.2: фінансово-економічні показники, що визначають ефективність господарської діяльності, та управлінські характеристики, пов'язані з організаційною структурою й інструментами стратегічного розвитку.

У різні періоди економічної науки та практики трактування цього поняття трансформувалося відповідно до домінуючих концепцій управління підприємствами. Наприклад, у 1970–1980-х роках акцент у дослідженнях робився переважно на матеріально-технічному забезпеченні, фондоозброєності та капіталомісткості будівництва. Економічна ефективність тоді вимірювалась здебільшого за показниками продуктивності праці, фондовіддачі та обсягів реалізованої продукції [8]. Управлінські характеристики у той період обмежувались бюрократичною ієрархією, функціональною спеціалізацією підрозділів та контролем з боку вищих органів планування.

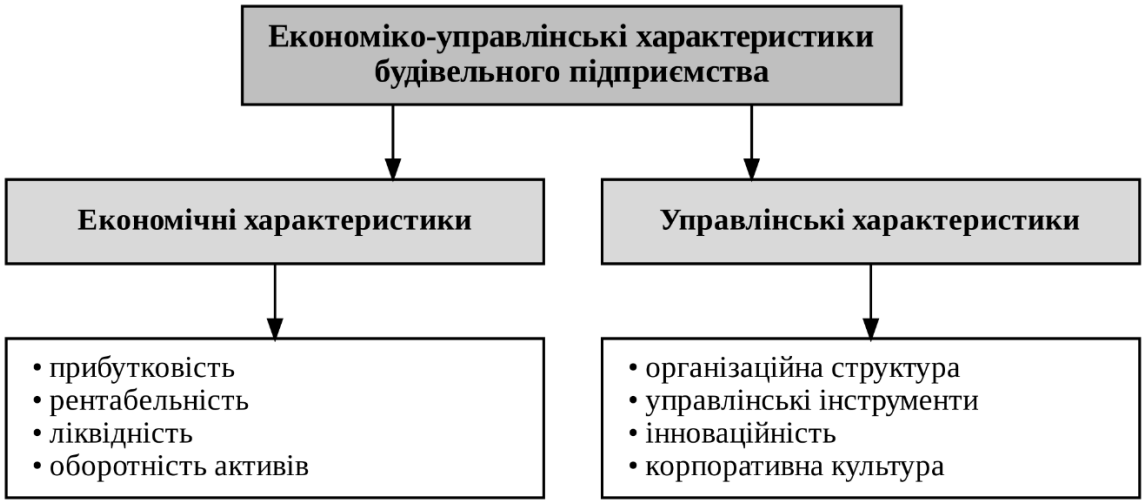


Рис. 1.2. Економічні та управлінські характеристики будівельного підприємства *(розроблено автором на основі [9])*

У 1990-х роках, у зв'язку з переходом до ринкової економіки, зміст поняття змінився: з'явилися нові акценти на платоспроможності, фінансовій незалежності, здатності до інвестиційної діяльності та організаційної мобільності. Економічні характеристики підприємства почали розглядати в контексті фінансових ризиків, інвестиційної привабливості та стійкості до зовнішніх впливів [8]. Водночас управлінські характеристики стали включати такі елементи, як стиль управління, система мотивації працівників, гнучкість управлінських структур.

З 2010-х років у наукових працях посилюється увага до інтеграції економічних і управлінських характеристик в єдину аналітичну систему, що забезпечує стратегічну стійкість будівельного підприємства [9]. Особлива увага приділяється впровадженню інструментів ERP, CRM, KPI, а також BIM-технологій, що дають змогу формувати цифрову модель підприємства з інтеграцією фінансових, технічних, ресурсних і управлінських даних. О. Ф. Ященко, Д. А. Макатора, Р. А. Кубанов та співавтори розмежовують три трактування BIM – як інформаційної моделі будівлі (Building Information

Model), процесу моделювання впродовж життєвого циклу (Building Information Modelling) та системи управління всім інвестиційно-будівельним процесом (Building Information Management) – і розглядають економічну ефективність впровадження BIM у будівельних компаніях як результат комплексного підходу до управління проєктами [109].

У сучасній практиці економічні та управлінські характеристики вже не розглядаються ізольовано. Вони інтегруються в єдину модель оцінки ефективності підприємства, що поєднує елементи операційної ефективності, ризик-менеджменту, стратегічного управління та корпоративної соціальної відповідальності. Такий підхід дає змогу не лише виявити слабкі місця в структурі підприємства, а й сформувати дорожню карту його сталого розвитку в умовах високої конкуренції, урбаністичних викликів та глобалізації.

Аналіз наведених підходів свідчить, що в економічній літературі характеристики будівельного підприємства переважно розглядаються як система результативних фінансово-економічних показників, тоді як у нормативних документах і працях з організації будівництва основну увагу приділено організаційно-технологічним параметрам – обсягам і трудомісткості робіт, тривалості будівництва, потребі в ресурсах [5]. Для будівельного підприємства ці дві групи тісно пов’язані: собівартість, рентабельність і оборотність активів формуються як наслідок організаційно-технологічних рішень щодо послідовності, тривалості та ресурсного забезпечення робіт. З урахуванням цього під економіко-управлінськими характеристиками будівельного підприємства доцільно розуміти сукупність взаємопов’язаних показників, що відображають фінансово-економічні результати діяльності (собівартість, рентабельність, ліквідність, оборотність активів, фінансову стійкість) і здатність системи управління забезпечувати ці результати (обґрунтованість і швидкість управлінських рішень, рівень цифрової інтеграції, організаційну структуру) та формуються через організаційно-технологічні параметри виконання будівельних робіт.

Коригування як функція управління пов’язане з циклом «планування – виконання – контроль – коригувальна дія», у межах якого виявлене відхилення фактичних параметрів від планових зумовлює управлінське рішення щодо його усунення; у практиці управління проєктами для вимірювання таких відхилень за вартістю та строками застосовується метод освоєного обсягу (Earned Value Management) [59]. Особливістю BIM-середовища є те, що відхилення фіксуються не в агрегованих звітах, а на рівні елементів інформаційної моделі та пов’язаних з ними робіт і ресурсів. З урахуванням цього BIM-коригування економіко-управлінських характеристик будівельного підприємства визначено як цілеспрямований процес виявлення відхилень організаційно-технологічних параметрів (обсягів робіт, тривалості, потреби в ресурсах), що формуються та відстежуються в інформаційній моделі об’єкта, оцінювання їх впливу на економічні та управлінські характеристики підприємства й ухвалення коригувальних рішень до моменту відображення наслідків відхилень у фінансовій звітності. На відміну від традиційного контролінгу, що спирається на ретроспективні облікові дані, BIM-коригування має випереджальний характер і ґрунтується на єдиному джерелі даних про об’єкт.

Підтримка управління будівельним підприємством засобами BIM-моделювання охоплює системне використання цифрових моделей будівельних об’єктів для підвищення ефективності управління процесами проєктування, планування, будівництва, експлуатації та демонтажу [50]. Така підтримка має аналітичний, координаційний, інформаційний і стратегічний характер і поширюється на всіх учасників будівельного процесу – від інженера до керівника проєкту.

BIM-моделювання забезпечує створення інтегрованої цифрової інформаційної моделі об’єкта, в якій містяться як геометричні параметри, так і дані про матеріали, обсяг робіт, фінанси, ризики та строки. Застосування BIM дає змогу значно зменшити кількість помилок, спрогнозувати вартість будівництва, оптимізувати логістику постачання, забезпечити прозору

взаємодію між підрядниками та замовниками, а також підвищити якість управлінських рішень. Основні напрями підтримки, яку BIM-моделювання надає будівельному підприємству в межах управлінського циклу, наведено на рис. 1.3.

Підхід до BIM-моделювання як до засобу підтримки управління трансформувався в кілька етапів. На початку 2000-х років BIM у практиці будівельних компаній розглядався переважно як інструмент візуалізації 3D-моделі об’єкта та розвиток CAD-систем, що дозволяє оцінити архітектурне рішення до початку будівництва [50]. Користь від моделі зводилася до покращення комунікації між проєктувальниками, а управлінський ефект сприймався як вторинний.

У 2010-х роках трактування розширилося завдяки концепції інтегрованої реалізації проєктів (IPD – Integrated Project Delivery). Автори BIM Handbook, зокрема Р. Сакс і К. Лістон, розглядають BIM як цифрову платформу, що підтримує управління всім життєвим циклом об’єкта – від планування й бюджетування до обслуговування та демонтажу [50]. У цей період BIM почали сприймати як джерело аналітичної підтримки, де 4D- (час), 5D- (вартість), 6D- (життєвий цикл і експлуатація) та 7D-моделі (енергоефективність і сталий розвиток) дозволяли прогнозувати й моделювати розвиток проєкту.

Емпіричні дослідження цього періоду дали оцінку управлінських ефектів BIM на рівні проєктів. Д. Брайд, М. Брокетас і Ж. М. Фольм за результатами аналізу низки будівельних проєктів встановили, що найчастіше вигоди від BIM проявляються у зниженні та контролі витрат, а також в економії часу [41]. К. Барліш і К. Салліван запропонували вимірювати вигоди від BIM шляхом порівняння показників проєктів, реалізованих із застосуванням BIM і без нього, з розрахунком віддачі на інвестиції [36]. У сучасних дослідженнях BIM-моделювання розглядається як мультифункціональний інструмент підтримки прийняття рішень на різних рівнях управління будівельним підприємством: моніторинг відхилень у

реальному часі, автоматизований аналіз ризиків, оптимізація ресурсів, формування системи KPI для виконавців, інтеграція з ERP-системами, а також побудова цифрових двійників, що дають змогу моделювати сценарії розвитку без реальних витрат [46].

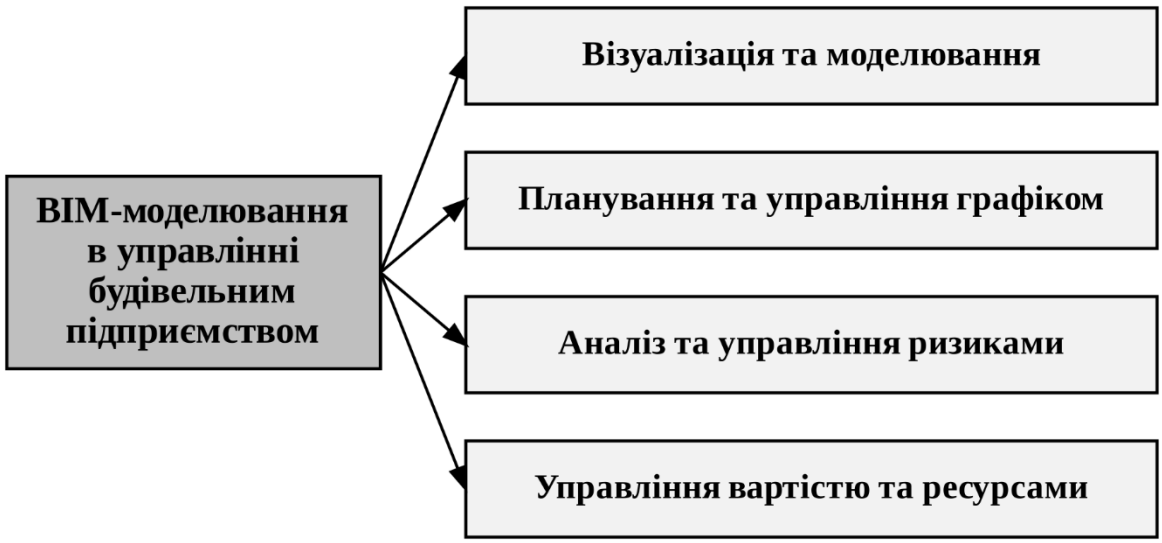


Рис. 1.3. Функції BIM-моделювання в управлінні будівельним підприємством *(розроблено автором на основі [50])*

Водночас у зазначених працях ефект BIM оцінюється переважно на рівні окремого проєкту і не пов’язується з економіко-управлінськими характеристиками підприємства в цілому.

Таким чином, підтримка управління засобами BIM-моделювання в сучасних умовах – це не лише технічний супровід процесу проєктування, а системна основа побудови адаптивного й аналітично орієнтованого управління в будівництві, що дозволяє будівельним підприємствам керувати часом, коштами, ресурсами та якістю на кожному етапі реалізації проєкту.

У сучасних умовах цифрової трансформації будівельної галузі питання взаємозв’язку між економічними та управлінськими характеристиками набуває нової якості, адже зміни, зумовлені впровадженням цифрових

технологій, зокрема BIM-моделювання, суттєво змінюють характер господарських процесів. Будівельне підприємство вже не є ізольованою організаційною одиницею з лінійною логікою управління – воно функціонує як адаптивна система, що оперує великими масивами даних, інтегрує інформацію в реальному часі та орієнтується на оптимізацію процесів.

Економічні характеристики, такі як прибутковість, рентабельність, платоспроможність, ліквідність, продуктивність праці та фондовіддача, більше не є лише результатом традиційного бухгалтерського аналізу. В умовах цифрового середовища ці показники починають динамічно змінюватися під впливом управлінських рішень, прийнятих на основі аналітичних інструментів. Водночас управлінські характеристики (організаційна структура, система прийняття рішень, стратегічне планування, гнучкість, інноваційність, рівень діджиталізації) не лише впливають на економічні показники, а й самі змінюються внаслідок аналізу економічних даних [20]. Цей взаємозв'язок є нелінійним і формується на основі нової логіки управління – логіки даних (data-driven logic). Вплив окремих управлінських характеристик на ключові економічні показники будівельного підприємства наведено в табл. 1.4.

Кожен управлінський інструмент або характеристика прямо корелює з одним чи кількома економічними показниками. Особливістю є те, що цей зв'язок відображає не лише причинно-наслідкову залежність, а й здатність системи до самонавчання – що притаманно саме цифрово трансформованим підприємствам. Таким чином, управлінські дії більше не є реактивними, вони стають проактивними, орієнтованими на попередження втрат і оптимізацію потенціалу.

Окрім цього, в умовах цифровізації розмивається межа між аналітикою та управлінням – економічна ефективність дедалі частіше залежить не від рішень окремих менеджерів, а від алгоритмів, закладених у BIM, ERP та BI-системи. Ці алгоритми дозволяють автоматично виявляти закономірності,

тренди, критичні точки перевитрат або відхилень у проєктах, і відповідно – рекомендувати сценарії коригування [20].

Таблиця 1.4.

Вплив управлінських характеристик на економічні показники підприємства в умовах цифрової трансформації (*розроблено автором на основі [20]*)

Управлінська характеристика	**Механізм впливу**	**Цільовий економічний показник**	**Очікуваний ефект**
Впровадження BIM-моделювання	Інтеграція обліку вартості, матеріалів і часу	Собівартість, рентабельність	Зниження витрат, зростання прибутку
Стратегічне планування з використанням CRM та ERP	Оптимізація проєктного циклу	Продуктивність праці, ліквідність	Прискорення обігу ресурсів
Матрична структура управління	Посилення контролю за виконавцями	Коефіцієнт використання ресурсів	Підвищення ефективності
KPI-моніторинг в реальному часі	Регулярна оцінка результатів та своєчасне коригування	Прибутковість, оборотність активів	Підвищення управлінської чутливості
Інноваційна культура	Залучення нових технологій	Інвестиційна привабливість	Зростання вартості підприємства

Модель взаємозв’язку управлінських і економічних характеристик будівельного підприємства в цифровому середовищі наведено на рис. 1.4.

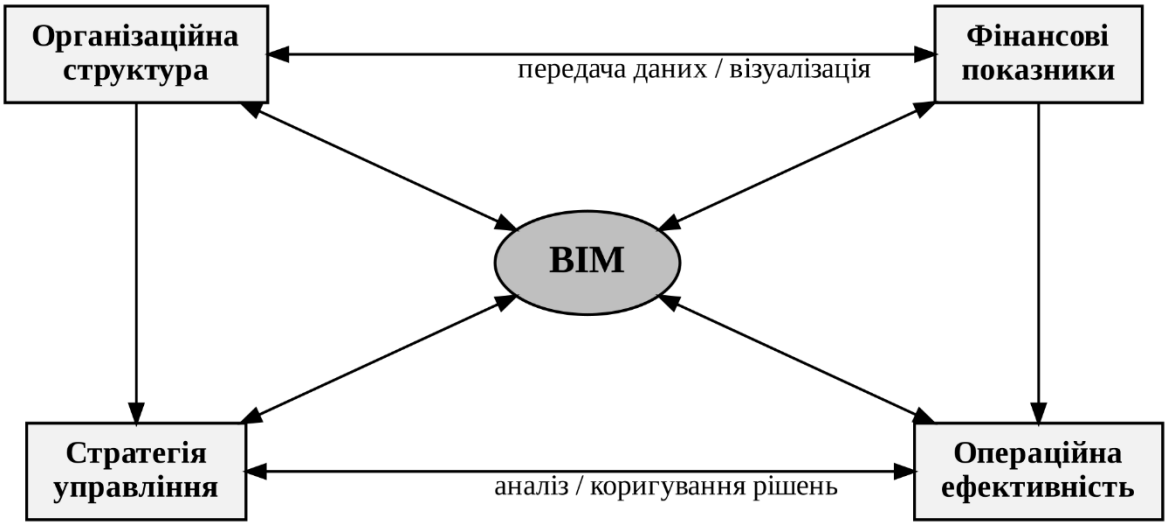


Рис. 1.4. Модель взаємозв'язку управлінських і економічних характеристик будівельного підприємства в цифровому середовищі *(розроблено автором на основі [20; 109])*

Взаємозв'язок між управлінськими та економічними характеристиками в умовах цифрової трансформації не є лінійним, а формується як динамічна система з двостороннім впливом. Управлінські дії, підтримані цифровими інструментами, зокрема BIM-моделюванням, створюють середовище, де економічні показники коригуються в реальному часі, а результати діяльності впливають на перегляд управлінських підходів.

Завдяки цьому формується цифрово орієнтований зворотний зв'язок, що дозволяє підприємству функціонувати як цілісна кіберфізична система, в якій цифрова модель (BIM) не лише дублює фізичний об'єкт, а й стає центром прийняття рішень. Усе це сприяє переходу від реактивного до проактивного управління: рішення приймаються не на основі постфактум-аналізу, а на базі прогнозів і моделювань, що враховують ризики, ресурси, строки та потенційні втрати.

Сучасні будівельні підприємства діють в умовах високої динаміки ринку, зростання ризиків, варіативності вартості матеріалів і ресурсів, що вимагає оперативного реагування на відхилення в реалізації проєктів. У

цьому контексті BIM-моделювання (Building Information Modeling) стає критично важливим інструментом не лише для візуалізації об’єкта, а й для ефективного управління фінансово-економічними показниками в реальному часі. BIM дозволяє об’єднати в одному цифровому середовищі дані про обсяги, вартість, строки, ресурси, логістику, що створює умови для прийняття управлінських рішень, заснованих на актуальних аналітичних розрахунках [109].

Оперативне коригування стає можливим завдяки трьом ключовим особливостям BIM: по-перше, безперервне оновлення даних, що дозволяє бачити відхилення в бюджеті ще до їх фактичного прояву у бухгалтерських звітах; по-друге, візуальне моделювання сценаріїв, яке дає змогу оцінити вплив змін до того, як їх реалізовано фізично; і по-третє, інтеграція з ERP-системами, що об’єднує бухгалтерський, технічний та управлінський облік у єдине аналітичне середовище. Саме така інтеграція формує основу для адаптивного управління. Основні канали передачі даних і зони, в яких відбувається коригування, наведено на рис. 1.5.

BIM-модель дає змогу виявляти відхилення за такими параметрами, як фактичні обсяги використання матеріалів, зміна вартості логістики, невідповідність реальних строків етапам проєкту. Наприклад, якщо фактичне споживання бетону перевищує запланований обсяг на 15%, система автоматично оновлює інформацію про вартість, коригує пов’язану логістику та перераховує вартість усього етапу. Таке прогнозне управління суттєво знижує фінансові ризики та дозволяє заздалегідь вживати заходів – змінювати підрядників, перерозподіляти бюджет, або вводити резервні графіки.

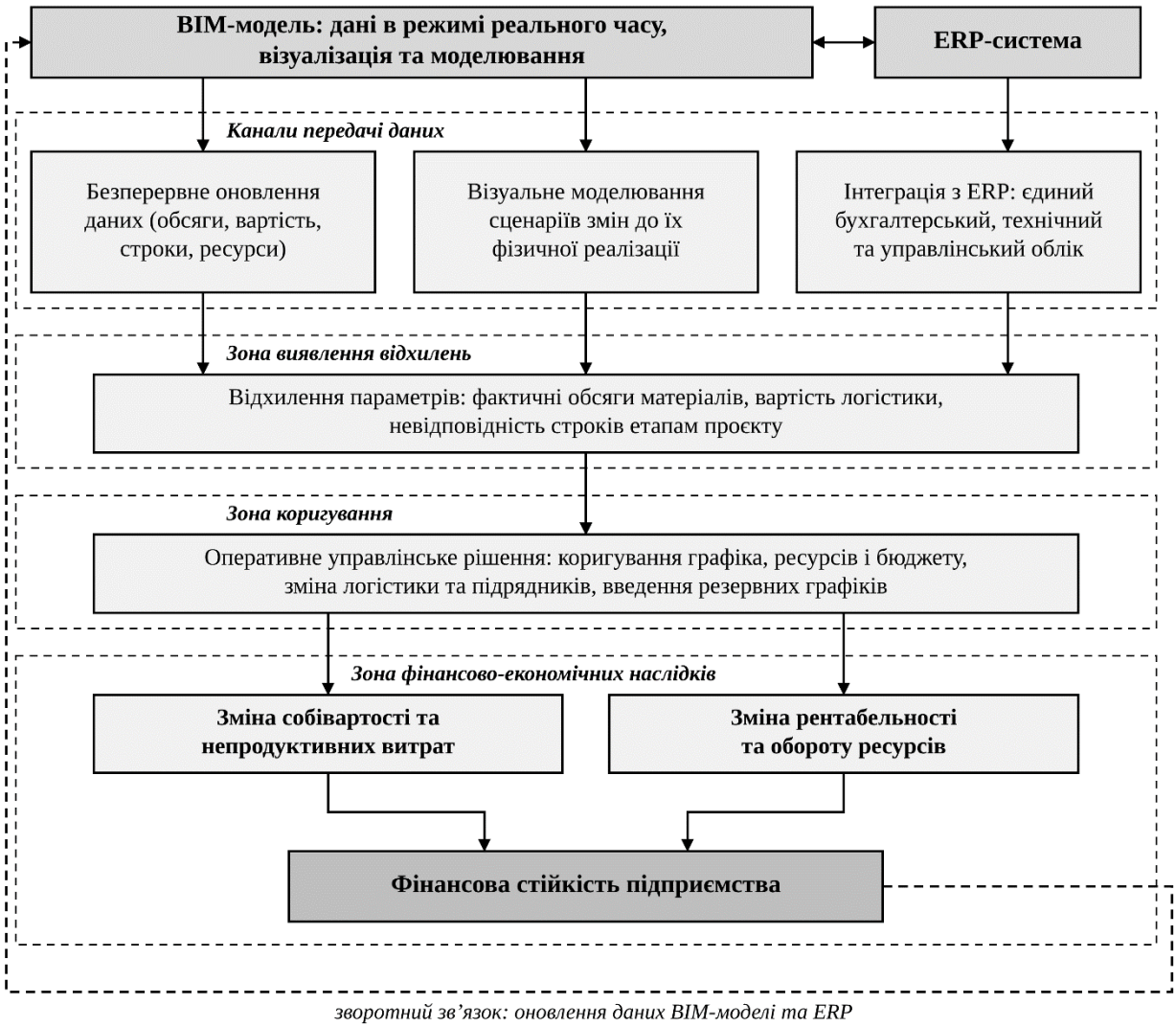


Рис. 1.5. Механізм впливу BIM-моделювання на оперативне управління фінансово-економічними показниками підприємства (*розроблено автором на основі [4]*)

Крім цього, BIM-моделювання формує основу для так званих "цифрових сценаріїв корекції", коли система дозволяє миттєво побачити вплив конкретної управлінської дії (зменшення бюджету, заміна технології, зміна постачальника) на загальну фінансову структуру проєкту. Це сприяє переходу від статичного фінансового управління до динамічного управління в реальному часі. Ключові фінансово-економічні показники будівельного

підприємства та способи їх коригування за допомогою BIM-моделі наведено в табл. 1.5.

Упровадження BIM-моделювання в систему фінансово-економічного управління підприємства суттєво трансформує підходи до ухвалення рішень. Завдяки багатовимірному аналізу (4D, 5D, 6D) управлінці отримують змогу не лише бачити поточний стан показників, а й прогнозувати майбутні відхилення, що значно розширює горизонт планування. Наприклад, використання 5D-моделювання дозволяє одночасно враховувати часові та вартісні фактори [98], створюючи багатофакторну систему моніторингу, де навіть незначні зміни в термінах або цінах матеріалів одразу відображаються на загальній фінансовій моделі проєкту.

Ще одним важливим аспектом є можливість сценарного аналізу, коли підприємство може протестувати кілька варіантів розвитку подій (наприклад, підвищення цін на сировину, зміна графіку робіт, зменшення обсягу фінансування) ще до того, як вони реалізуються. Це дозволяє приймати обґрунтовані рішення на випередження, підвищуючи адаптивність до ринкових і внутрішніх змін.

Крім того, використання BIM сприяє підвищенню прозорості внутрішніх фінансових процесів, оскільки всі елементи витрат, доходів, інвестицій та ризиків візуалізуються у єдиному цифровому середовищі. Це, в свою чергу, сприяє не лише кращому контролю, але й формує довіру з боку інвесторів, кредиторів та партнерів. У результаті підприємство отримує не лише оперативний контроль, але й стратегічну конкурентну перевагу, засновану на точності, передбачуваності та ефективності управління фінансами.

Інтеграція BIM-моделювання у практику управління будівельним підприємством відкриває нові горизонти для вдосконалення управлінських рішень. Це пов’язано з тим, що BIM-технології дають змогу поєднати технічне, економічне та організаційне планування в єдину інформаційну систему, що функціонує в режимі реального часу. BIM змінює не лише

форму збереження даних, а й сам характер управлінських дій — від інтуїтивного та досвідного підходу до аналітичного, цифрово підтвердженого і проактивного управління. Рішення, які раніше ґрунтувались на фрагментарних даних, тепер ухвалюються на основі повної, інтегрованої цифрової картини проєкту.

Таблиця 1.5.

Коригування фінансово-економічних показників підприємства за допомогою BIM-моделювання *(розроблено автором на основі [4])*

Фінансово-еконо-мічний показник	**Джерело відхилення**	**Механізм ідентифікації у BIM**	**Дія кори-гування через BIM**	**Очіку-ваний ефект**
Собівар-тість етапу	Пере-витрата матеріалів	Автоматичне оновлення об’ємів	Перерахунок бюджету, зміна підрядника	Зменшення вартості реалізації
Рента-бельність проєкту	Диспро-порція між витратами і доходами	Порівняння запланованих/ фактичних обсягів	Аналіз альтерна-тивних сценаріїв	Вирівню-вання прибутко-вості
Оборотні-сть активів	Затримка в логістиці	Візуальне моделювання маршрутів	Перерозподіл логістичних потоків	Збільшення швидкості обігу
Фінансова стійкість	Незбалансо-ваність графіку витрат	Контроль cash flow у 4D-форматі	Зміна етапності фінансування	Підвищення платоспромо-жності
Інвести-ційна прива-бливість	Високий ризик перевитрат	Оцінка ризиків у 5D-моделі	Впрова-дження резервного бюджету	Покращення рейтингу інвестування

Найбільш помітно це проявляється у таких сферах, як календарно-ресурсне планування, координація між підрозділами, розрахунок вартості, логістика, контроль виконання та оцінка ризиків. BIM дозволяє бачити

взаємозалежність між усіма елементами будівельного процесу, включаючи часові обмеження, бюджетні параметри, кадрові ресурси та матеріально-технічне забезпечення. Типи управлінських рішень, що вдосконалюються завдяки BIM-моделюванню, та їх вплив на організаційну структуру підприємства наведено в табл. 1.6.

Таблиця 1.6.

Вдосконалення управлінських рішень завдяки інтеграції BIM-моделювання *(розроблено автором на основі [4])*

Тип управлінського рішення	**Вдосконалення через BIM**	**Вплив на структурну організацію підприємства**
Планування календарно-ресурсне	Моделювання графіків у 4D-форматі з прив'язкою до ресурсів	Формування проєктного офісу або PMO зі спеціалізацією на 4D-плануванні
Бюджетування та кошторисне управління	Динамічний аналіз витрат у 5D-просторі	Введення нової функції – BIM-контролера бюджетів
Контроль виконання робіт	Порівняння фактичного та запланованого виконання на основі моделі	Інтеграція контролю якості в цифрову вертикаль управління
Логістика та постачання	Моделювання ланцюгів поставок і матеріальних потоків	Оптимізація складської логістики, скорочення зайвих ланок
Управління ризиками	Автоматизоване виявлення зон ризику в моделі (наприклад, через колізії)	Формування аналітичного відділу з BIM-ризик-менеджером
Координація між відділами	Спільний доступ до цифрової моделі у хмарному середовищі	Посилення ролі горизонтальних зв'язків, міждисциплінарні команди

У результаті такого функціонального вдосконалення, змінюється і структура управління будівельним підприємством. Замість вертикально-

ієрархічної моделі, у якій рішення приймаються на основі багаторівневої звітності, формується мережева цифрова структура, в якій відділи мають спільний доступ до моделі, працюють паралельно в реальному часі й координують дії без бюрократичних затримок.

Також змінюється роль окремих управлінських функцій. Наприклад, плановий відділ трансформується у BIM-аналітичну службу, а контролінг – у центр динамічного моніторингу. Традиційні посади доповнюються новими, такими як BIM-менеджер, координатор 5D, аналітик цифрових ризиків. Така еволюція не лише оптимізує управлінське середовище, а й відкриває нові можливості для стратегічного розвитку підприємства в умовах цифрової економіки.

Економічну доцільність упровадження BIM досліджено з використанням показника віддачі на інвестиції: Б. Гіл і Р. Ісса оцінили ROI застосування BIM у будівельних проєктах [56], В. Лу зі співавторами – співвідношення витрат і вигід на основі кривих розподілу трудовитрат за стадіями проєкту [76], П. Лав зі співавторами запропонували рамку управління реалізацією вигід від BIM для власників активів [75]. Мотиви та критичні чинники успішного впровадження BIM на рівні організацій і проєктів визначено в працях Д. Цао [43], Дж. Вона [108], Б. Озоргона й У. Карахана [85]. Українські дослідники розглядають економіко-аналітичний базис цифрової трансформації процесів адміністрування будівельними підприємствами [11], оцінювання фінансових параметрів інноваційних циклів будівельних компаній [23] та механізм коригування економічних і управлінських характеристик підприємства засобами BIM-моделювання [27]. Для будівельних підприємств України вартісна складова 5D-моделі має узгоджуватися з Настановою з визначення вартості будівництва [10].

Отже, економіко-управлінські характеристики будівельного підприємства в умовах BIM-моделювання набувають динамічного характеру: їх значення формуються через організаційно-технологічні параметри, що фіксуються в інформаційній моделі, і можуть коригуватися до моменту

відображення відхилень у фінансовій звітності. Це зумовлює потребу в інтеграції BIM у систему бізнес-процесів будівельного підприємства та у формуванні показників, які дозволяють кількісно оцінити результати такої інтеграції.

1.3. Інтеграція BIM-технологій у стратегічну архітектоніку оптимізації бізнес-процесів будівельної організації

Сучасне будівельне підприємство функціонує у висококонкурентному середовищі, де динамічні зміни ринку, стрімка урбанізація, зростання попиту на якісні об’єкти та необхідність забезпечення ефективного ресурсного менеджменту зумовлюють потребу в оновленні стратегічних підходів до управління. Одним із найперспективніших напрямів трансформації є інтеграція цифрових технологій у бізнес-процеси, зокрема технологій інформаційного моделювання будівель (Building Information Modeling — BIM). Цей підхід забезпечує не лише візуалізацію проєктів у тривимірному середовищі, а й формує нову парадигму управління, де аналітика, прогнозування, координація та контроль функціонують у синхронізованому цифровому просторі. Положення підрозділу узагальнюють і розвивають результати, опубліковані автором у праці [25].

BIM-технології перестали бути виключно інженерним або архітектурним інструментом. У межах сучасної стратегії оптимізації вони трансформуються у ядро цифрової платформи управління підприємством. Завдяки інтеграції BIM із ERP-системами, CRM-модулями, календарним плануванням, бюджетуванням, контролем якості та логістикою відбувається перенесення класичних управлінських функцій у єдину візуально-аналітичну оболонку. Це відкриває нові можливості для гнучкого управління будівельними процесами, зменшення втрат, прискорення термінів виконання робіт і підвищення прозорості прийняття рішень.

На рівні стратегії підприємства BIM виконує роль технологічного інтегратора між підрозділами: архітектурним, інженерним, комерційним, фінансовим і юридичним. Інформаційна модель забезпечує безперервний обмін даними, дозволяючи кожному учаснику бізнес-процесу працювати з актуальною версією об’єкта. Це мінімізує ризики помилок, затримок та дублювання інформації, характерних для традиційних форм управління. Таким чином, BIM створює умови для формування процесно-аналітичної моделі, де бізнес-логіка підприємства формується навколо реального (та змодельованого) об’єкта будівництва.

Окремо варто підкреслити, що в умовах зростаючої складності об'єктів будівництва та зменшення допустимого рівня операційних втрат, BIM виступає не лише інструментом оптимізації, а й детермінантою конкурентоспроможності. У міжнародній практиці великі будівельні корпорації впроваджують BIM як складову корпоративної стратегії цифрової трансформації та оцінюють його результативність за показниками зниження вартості й контролю витрат, скорочення термінів реалізації, зменшення кількості змін у проєктах і покращення логістики на будівельному майданчику [36; 41].

Інтеграція BIM у стратегію оптимізації бізнес-процесів потребує визначення функціональних блоків управління, які найбільшою мірою піддаються цифровій трансформації, та характеру впливу цієї трансформації на ефективність, швидкість і прозорість управлінських рішень.

BIM-технології мають потенціал суттєво покращити операційні, планово-економічні та виконавчі бізнес-процеси підприємства. Передусім ідеться про такі функціональні блоки [41; 50]:

1. Планування і проєктування – на цьому етапі BIM дає змогу візуалізувати весь об’єкт у цифровому вигляді до початку будівництва, перевірити узгодженість усіх елементів, створити адаптивну модель розвитку, а також проаналізувати сценарії впливу змін. Завдяки функціям clash detection можливо завчасно виявити конфлікти між системами

(наприклад, вентиляцією і конструкцією) та оптимізувати просторові рішення.

2. Кошторисне ціноутворення та фінансове планування – BIM-модель дозволяє автоматично генерувати об'єми робіт (BOQ – Bill of Quantities), які надалі інтегруються з системами оцінки вартості, бюджетування та фінансового моніторингу. Таке рішення істотно зменшує похибки в обчисленнях і прискорює формування економічних моделей проєкту [98].

3. Графіки реалізації (4D) – інтеграція календарного планування з просторовими елементами моделі дозволяє синхронізувати строки виконання робіт із візуальним контролем за їхнім просуванням. Цей підхід забезпечує високу прозорість для інвесторів та замовників, а також формує основу для вчасного виявлення відхилень і затримок. Календарний план при цьому залишається складовою ПОБ і ППР, а 4D-модель забезпечує його просторову ув’язку з конструктивними елементами, захватками та потребою в ресурсах [5].

4. Закупівлі та управління постачанням – через BIM можливо автоматично формувати специфікації матеріалів, кількості, строків поставки, що дозволяє більш точно планувати логістику та знижувати складські втрати. У міжнародних компаніях ця функція пов'язується з системами управління ланцюгами постачання (SCM), що дає змогу будувати гнучкі ланцюги поставок.

5. Контроль за якістю виконання та авторський нагляд – BIM забезпечує візуальний контроль відповідності будівельних елементів до проєктних рішень. Завдяки цифровому зв’язку з будівельним майданчиком та використанню мобільних пристроїв з доступом до моделі в реальному часі, технічні спеціалісти можуть швидше фіксувати недоліки, вносити зміни та вести журнал змін із прив'язкою до елементів об’єкта.

6. Логістика і координація ресурсів – 4D-модель у поєднанні з будівельним генеральним планом дозволяє здійснювати не лише візуальний

контроль за переміщенням матеріалів і механізмів, а й формувати сценарії поставок, черговості монтажу, резервування техніки. Це особливо важливо для проєктів з обмеженим доступом, стислим графіком або складною геометрією.

7. Управління ризиками – BIM може бути інтегровано з модулями оцінки ризиків, зокрема у вигляді цифрових сценаріїв (what-if analysis), які візуалізують потенційні відхилення в об'ємі, кошторисі або часі реалізації. Це формує основу для системного ризик-менеджменту.

8. Управління експлуатацією (6D) – після завершення будівництва модель використовується для обслуговування об'єкта, планування ремонтів, енергоефективності, технічного моніторингу. Це забезпечує повну трансформацію підходу до експлуатації, перетворюючи її на керовану та аналітично підтверджену функцію.

Зв'язки між основними управлінськими процесами підприємства та модулями BIM-інтеграції – плануванням, кошторисом, календарним плануванням, логістикою, якістю, постачанням, ризиками й експлуатацією – наведено на рис. 1.6.

Усі ці блоки в реальному середовищі будівельного підприємства не є ізольованими – вони функціонують у тісній взаємодії та повинні бути синхронізовані через єдину BIM-модель. Саме така модель слугує центральним цифровим ядром, до якого під'єднуються системи ERP, фінансового контролінгу, логістики, HR-аналітики, технічного аудиту тощо. Результатом є формування єдиної платформи управління, де кожна дія та ресурс відображаються у цифровому середовищі з повною логікою взаємозв'язків [109]. Це дає змогу вивести управління будівельним підприємством на принципово новий рівень ефективності: знизити дублювання інформації, зменшити затримки, оптимізувати використання ресурсів, а також забезпечити прозорість як для внутрішнього, так і для зовнішнього контролю.

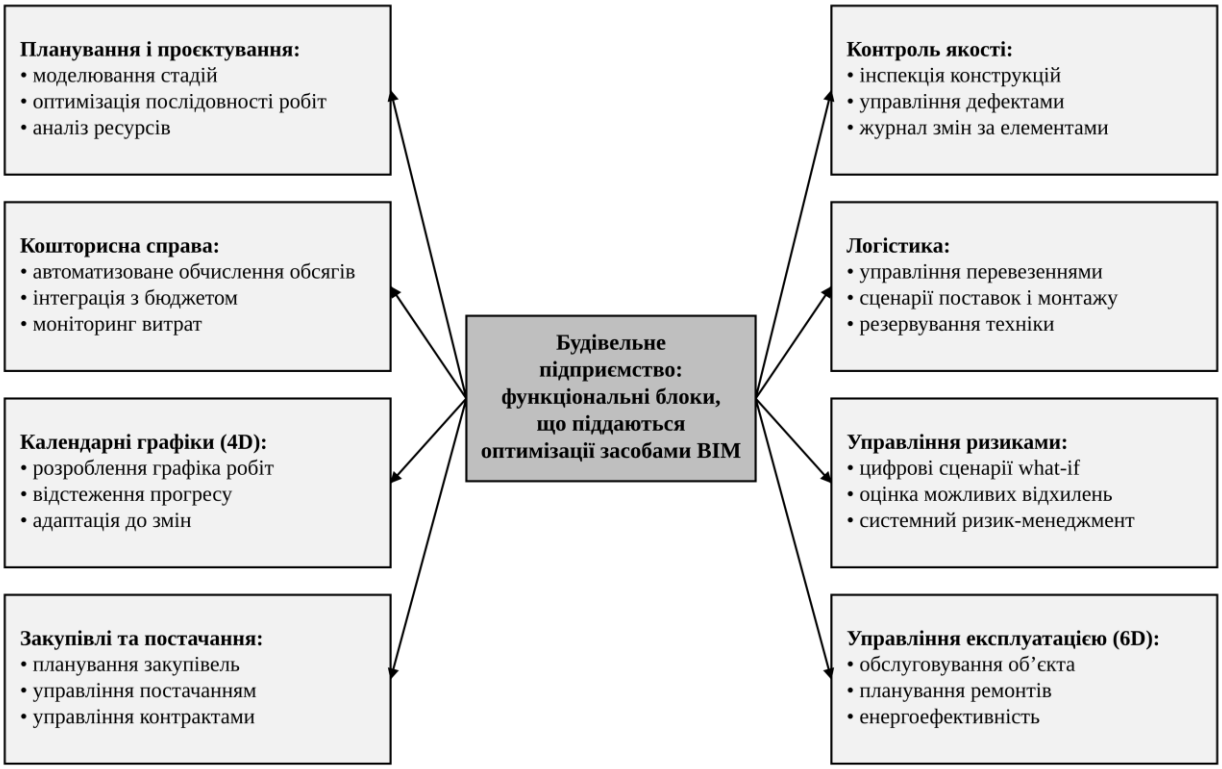


Рис. 1.6. Функціональні блоки будівельного підприємства, що піддаються оптимізації за допомогою BIM-технологій *(розроблено автором на основі [47])*

Глибина інтеграції BIM у бізнес-процеси будівельного підприємства визначається рівнем його BIM-зрілості (табл. 1.2). На рівні Level 1 підприємство здійснює лише базову цифрову трансформацію – автоматизацію креслень і формування специфікацій. Перехід до Level 2 означає початок управління змінами в моделі, коли учасники працюють у спільному координаційному середовищі, а модель пов'язується з календарними планами та кошторисом. На рівні Level 3 BIM стає частиною цифрової платформи підприємства, в якій дані безперервно оновлюються й використовуються в управлінні ресурсами, ризиками, логістикою, фінансами та експлуатацією. Оцінювання рівня BIM-зрілості дозволяє визначити пріоритети розвитку підприємства – навчання персоналу, оновлення IT-інфраструктури, розроблення внутрішніх стандартів, інтеграцію з наявними

системами ERP і CRM – та сформувати дорожню карту впровадження BIM [81; 99].

Інтеграція BIM із сучасними управлінськими платформами — ERP, CRM, SCM — є однією з ключових умов створення єдиного цифрового інформаційного середовища будівельного підприємства. Така інтеграція дає змогу забезпечити прозору, синхронізовану та адаптивну модель управління на всіх етапах життєвого циклу об’єкта — від передпроєктного аналізу до експлуатації та демонтажу [29].

Суть цього підходу полягає в тому, що BIM-модель перестає бути ізольованим інженерним або архітектурним файлом, а перетворюється на ядро цифрової платформи, яке живиться даними з різних джерел і, у свою чергу, генерує вхідну інформацію для інших модулів управління. Це забезпечує оперативне оновлення даних, зменшує дублювання введень, автоматизує прийняття рішень та створює цифровий слід кожного етапу управління.

У системах ERP інтеграція BIM здійснюється через поєднання з модулями управління ресурсами, бюджетом, витратами, графіками виконання робіт і контрольними точками. Наприклад, об’єми матеріалів з BIM-моделі автоматично передаються до системи SAP чи Oracle ERP, де розраховується вартість, резерви, план закупівель і постачання. У свою чергу, система ERP передає назад у BIM-модель оновлені дані про залишки ресурсів, терміни їх поставки або фінансові обмеження. Таким чином формується двосторонній зв’язок, що забезпечує узгоджене фінансово-технічне планування.

Щодо CRM-систем, то вони взаємодіють із BIM переважно на стадії комерціалізації проєкту, продажів, управління клієнтськими запитами та обслуговування об’єкта. Наприклад, клієнт у режимі реального часу може переглянути візуалізацію своєї квартири, зробити вибір оздоблення, замовити зміни в конфігурації. Дані з BIM оновлюють CRM щодо актуального статусу об’єкта, а CRM фіксує побажання клієнтів, які повертаються до моделі у

вигляді коментарів до плану. Це дозволяє створити персоналізований підхід до покупця, підвищити рівень задоволеності та скоротити час на погодження.

У контексті SCM-платформ, BIM відіграє вирішальну роль у плануванні та координації ланцюгів постачання. Моделі дозволяють точно визначити строки, об’єми та місця постачань, а SCM-модуль забезпечує оптимальний маршрут, вибір постачальника, вартість логістики та прогнозування затримок. Таким чином, BIM-модель є джерелом даних для автоматичного запуску ланцюга закупівель, формування заявок, трекінгу доставок і управління контрактами з логістичними партнерами. У міжнародній практиці такі рішення реалізуються через інтеграцію BIM із платформами типу IBM Maximo, Trimble Connect, Autodesk Construction Cloud тощо.

На архітектурному рівні інтеграція BIM-технологій із управлінськими системами досягається через побудову гнучкої й відкритої цифрового середовища, де передбачено структуровану взаємодію між різними модулями, платформами, форматами обміну даними й сервісами підтримки рішень. Така інтеграція формує основу для побудови єдиного інформаційного середовища управління, що охоплює всі процеси будівельного підприємства — від проєктування до експлуатації об’єкта [28].

• Відкриті формати обміну (IFC, COBie, gbXML) є базовими стандартами, які дають змогу досягати сумісності між різними програмними продуктами. Формат IFC (Industry Foundation Classes) розроблений для забезпечення нейтрального, нефірмового обміну даними між BIM-середовищами, такими як Revit, ArchiCAD, Tekla, Bentley тощо. IFC дозволяє зберігати не лише геометричну інформацію, а й атрибутивні дані (характеристики матеріалів, призначення елементів, логіку взаємозв’язків). Формат COBie (Construction-Operations Building Information Exchange) орієнтований на передачу інформації з BIM-моделі до систем управління експлуатацією (FM) і підтримує структурований перелік елементів, обладнання, інструкцій, відповідальних осіб тощо. Формат gbXML (Green

Building XML) використовується для обміну даними про енергоефективність, теплообмін, вентиляцію та інші інженерні показники, що особливо актуально для моделей енергоефективного будівництва [64]. Використання відкритих форматів забезпечує міжплатформну узгодженість, що знижує ризики втрати інформації при переході між системами та підвищує прозорість даних.

• API-зв'язки та модулі інтеграції між BIM-програмами та ERP/CRM/SCM-платформами дають змогу створити безшовну взаємодію між проєктним середовищем і управлінськими модулями. Через API (Application Programming Interface) програми типу Revit або Navisworks можуть обмінюватися даними із SAP, Oracle NetSuite, Microsoft Dynamics, Salesforce тощо [50]. Це відкриває можливості для двосторонньої синхронізації: BIM-модель автоматично оновлюється після затвердження змін у бюджеті, термінах чи закупівлях, а інформація з ERP-модулів транслюється в оновлені атрибути об'єктів у моделі. Такі зв'язки забезпечують контроль за розподілом ресурсів, фінансовими потоками, графіками, ризиками, а також автоматичне формування звітності.

• Хмарні платформи є ключовими у реалізації концепції інформаційного середовища нового покоління. Рішення на базі Autodesk Construction Cloud, Trimble Connect, BIM 360, Bentley iTwin дозволяють зберігати, редагувати, переглядати та обмінюватися BIM-моделями в режимі реального часу з будь-якого пристрою. Це не лише прискорює процес прийняття рішень, а й мінімізує помилки, пов'язані з різними версіями документів. Хмарна архітектура підтримує масштабованість, що дозволяє будівельному підприємству обслуговувати декілька об'єктів одночасно без ризику перевантаження інфраструктури. До переваг хмарного середовища належать: зменшення витрат на локальне зберігання даних, постійне резервне копіювання, гнучкий контроль доступу, а також підтримка штучного інтелекту для автоматичного виявлення помилок і прогнозування відхилень.

• Common Data Environment (CDE) — концепція спільного середовища даних, у якому BIM та інші управлінські системи функціонують як єдине

цифрове ціле. В межах CDE усі учасники проєкту мають доступ до актуальної інформації, що синхронізується між усіма системами. Це середовище забезпечує версійність документів, контроль статусів, електронні підписи, маршрутизацію затверджень, трасування змін. CDE функціонує як центральний серверний простір або як розподілена платформа з API-доступом, в якому модулі ERP, CRM, BIM, SCADA, GIS тощо працюють на єдиному інформаційному каркасі [7]. Основні принципи CDE — прозорість, доступність, контрольованість та стандартизація процесів.

Інтеграція всіх перелічених компонентів створює архітектуру цифрової взаємодії, що дозволяє:

- уникнути інформаційної ізольованості підрозділів;
- знизити витрати часу на передачу і перевірку даних;
- скоротити ризики дублікації, втрат або викривлення інформації;
- забезпечити наскрізний контроль за якістю, термінами, бюджетом і технічним виконанням проєкту;
- оперативно формувати звітність для внутрішнього контролю, аудиту, інвесторів і замовників.

У підсумку, на архітектурному рівні інтеграція BIM із управлінськими платформами та формування CDE — це не лише технічне рішення, а стратегічна інфраструктура, яка забезпечує системну цифрову трансформацію будівельного бізнесу, його адаптивність, аналітичність і готовність до роботи в умовах проєктної складності та мінливої зовнішньої реальності.

Центральне положення BIM-моделі в цифровому середовищі будівельного підприємства та потоки даних між модулями ERP (ресурси, бюджет, кошторис), CRM (взаємодія з клієнтом), SCM (логістика, постачання), модулем ризик-менеджменту та експлуатації об’єкта наведено на рис. 1.7.

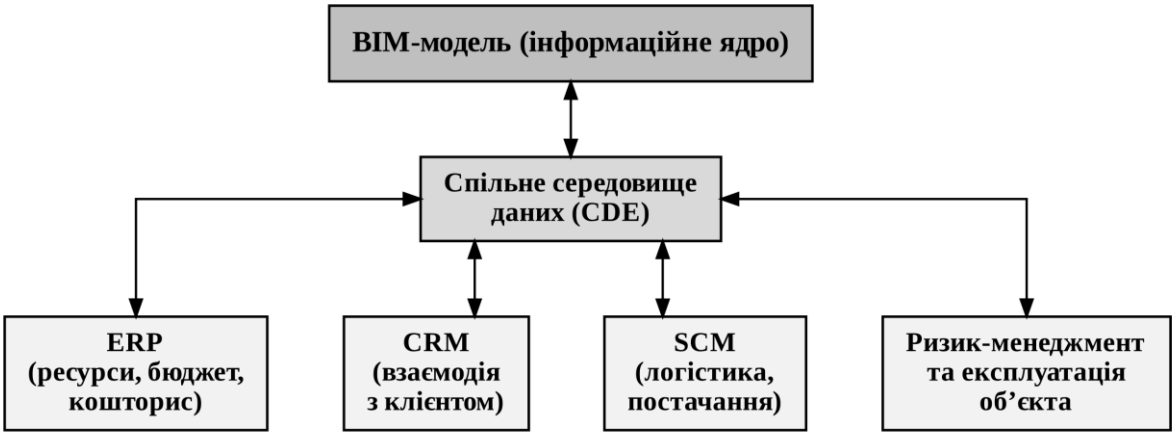


Рис. 1.7. Інтеграційна архітектура BIM і управлінських платформ у будівельному підприємстві *(розроблено автором на основі [7; 50])*

Таким чином, інтеграція BIM з ERP, CRM та SCM передбачає не лише технологічну взаємодію, а й зміну архітектури управління будівельною компанією, що забезпечує аналітичність, гнучкість, економічність та прозорість процесів на всіх рівнях. У сучасних умовах така інтеграція стає критичним фактором конкурентоспроможності та готовності до роботи в умовах цифрової економіки.

Визначення ефективності впровадження BIM-рішень у бізнес-процеси будівельного підприємства потребує чіткої системи оцінювання. З огляду на багатофункціональність BIM-моделі та її інтеграцію в управлінське середовище, необхідно аналізувати як кількісні, так і якісні індикатори, які безпосередньо відображають результативність і доцільність цифрової трансформації.

Кількісні показники пов'язані з безпосередніми числовими результатами впровадження — це зміни у витратах, строках, прибутковості, кількості помилок, обсягах інформації. Вони легко піддаються моніторингу та аналітичному аналізу через ERP-системи або BIM-інтерфейси.

Якісні показники, натомість, відображають більш стратегічні ефекти: підвищення прозорості, задоволеності замовника, інноваційності, швидкості

прийняття рішень. Вони часто формуються на основі експертного оцінювання або візуалізуються через аналітичні дашборди [36].

Для системного управління доцільно формувати KPI-систему (Key Performance Indicators), яка відображає результативність BIM у межах конкретних бізнес-процесів: планування, кошторису, виконання робіт, логістики, контролю якості та експлуатації.

Приклади KPI та індикаторів ефективності впровадження BIM у різні сфери діяльності будівельного підприємства наведено в табл. 1.7.

Застосування BIM в окремих функціональних блоках детально досліджено в науковій літературі. Для управління безпекою праці запропоновано автоматичну перевірку моделей і календарних графіків на відповідність вимогам безпеки [111], а систематизацію таких застосувань наведено в огляді М. Мартінес-Айрес зі співавторами [78].

Сфери застосування та вимоги до даних BIM в експлуатації об’єктів визначено Б. Бечерік-Гербер зі співавторами [37], практику впровадження BIM в управлінні майновим комплексом – М. Кассемом зі співавторами [69], траєкторію розвитку BIM в управлінні експлуатацією – Е. Парн [87]. Взаємозв’язок BIM з вимогами сталого будівництва розглянуто в огляді Я. Лу зі співавторами [77], а взаємодію впровадження BIM з принципами ощадливого проєктування – у праці Я. Арайічі зі співавторами [34]. Питання реінжинірингу бізнес-процесів будівельних підприємств, інтеграції BIM у стратегію їх оптимізації та розвитку будівельних кластерів висвітлено в працях [17; 25; 30].

Отже, інтеграція BIM у бізнес-процеси будівельного підприємства охоплює функціональні блоки планування, кошторисного ціноутворення, календарного планування, постачання, контролю якості, логістики, управління ризиками та експлуатації й реалізується через відкриті формати обміну даними, API-зв’язки, хмарні платформи та спільне середовище даних.

Таблиця 1.7.

Система кількісних та якісних показників оцінки впливу BIM на результативність бізнес-процесів *(розроблено автором на основі [36; 41])*

Напрям бізнес-процесу	Кількісні показники (KPI)	Якісні індикатори ефективності
Проєктування та планування	▪ % зменшення проєктних змін після узгодження ▪ Скорочення термінів проєктування (%)	▪ Якість взаємодії між підрозділами ▪ Прозорість передачі даних
Бюджетування та кошторис	▪ Зниження похибки у розрахунках обсягів ▪ Зменшення витрат на етапі проєктування (у грн / %)	▪ Точність прогнозу вартості на різних фазах ▪ Узгодженість фінансових і технічних рішень
Графік виконання робіт	▪ Зменшення затримок (% об'єктів завершено в строк) ▪ Кількість днів резерву	▪ Гнучкість адаптації графіка ▪ Автоматичне оновлення термінів
Управління логістикою	▪ Зниження втрат ресурсів (%) ▪ Оптимізація маршрутів (у годинах, км)	▪ Координація між логістичними й будівельними модулями ▪ Повнота ланцюга постачання в моделі
Контроль якості та ризиків	▪ % зниження виявлених дефектів ▪ Скорочення часу на реакцію на відхилення	▪ Прогнозування ризиків у реальному часі ▪ Прозорість відповідальності за помилки
Клієнтська взаємодія (CRM)	▪ % клієнтів, які отримали візуалізацію об'єкта ▪ Середній час на погодження змін	▪ Ступінь індивідуалізації послуг ▪ Рівень задоволеності покупців

Водночас наведені показники оцінювання впливу BIM мають фрагментарний характер: вони характеризують окремі бізнес-процеси, не пов’язані між собою за вагомістю, і не дають змогу отримати узагальнену оцінку результатів BIM-коригування на рівні підприємства. Це зумовлює

необхідність побудови цифрової інфраструктури управління з BIM-ядром і розроблення узгодженої системи показників, що поєднує організаційно-технологічні, економічні та управлінські параметри будівельного підприємства.

Висновки до розділу 1

1. Аналіз теоретичних і прикладних засад застосування BIM показав, що інформаційне моделювання еволюціонувало від засобу автоматизації креслень до методології управління життєвим циклом об'єкта, яка поєднує вимірювання 4D–7D, спільне середовище даних і моделі оцінювання зрілості. В Україні сформовано нормативне підґрунтя впровадження BIM – Концепцію, схвалену розпорядженням Кабінету Міністрів України № 152-р, та національні стандарти, гармонізовані з ISO 19650, однак практичне впровадження на рівні будівельних підприємств має переважно ініціативний характер і стримується дефіцитом кадрів та відсутністю методик оцінювання економічного ефекту.

2. Визначено зв'язок вимірювань 4D і 5D з організаційно-технологічним проєктуванням: інформаційна модель дозволяє формувати складові проєкту організації будівництва та проєкту виконання робіт – календарні плани, будівельні генеральні плани, відомості потреби в ресурсах – як похідні від єдиного джерела даних, що створює організаційно-технологічне підґрунтя для коригування економіко-управлінських характеристик підприємства.

3. Виокремлено три напрями досліджень BIM – інформаційно-технологічний, організаційно-управлінський та напрям, пов'язаний з проблемами впровадження BIM в Україні, – і встановлено, що ефекти BIM переважно оцінюються на рівні окремого проєкту. Невирішеними залишаються питання взаємозв'язку параметрів інформаційної моделі з характеристиками підприємства в цілому та кількісного оцінювання такого впливу.

4. Уточнено зміст поняття «економіко-управлінські характеристики будівельного підприємства» та запропоновано поняття «BIM-коригування» як цілеспрямованого процесу виявлення відхилень організаційно-технологічних

параметрів в інформаційній моделі, оцінювання їх впливу на економічні та управлінські характеристики й ухвалення коригувальних рішень до відображення наслідків відхилень у фінансовій звітності. На відміну від традиційного контролінгу, BIM-коригування має випереджальний характер.

5. Визначено функціональні блоки бізнес-процесів будівельного підприємства, що піддаються BIM-інтеграції, – планування, кошторисне ціноутворення, календарне планування, постачання, контроль якості, логістика, управління ризиками та експлуатація – і встановлено, що наявні показники оцінювання впливу BIM мають фрагментарний характер. Це зумовлює потребу в побудові цифрової інфраструктури з BIM-ядром і узгодженої системи показників.

Основні результати досліджень, викладених у розділі 1, опубліковано в працях автора [3; 17; 18; 25; 27; 30].

РОЗДІЛ 2. АРХІТЕКТОНІКА ІНСТРУМЕНТІВ BIM ДЛЯ УПРАВЛІНСЬКОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ І АНАЛІТИЧНОЇ ПІДТРИМКИ РІШЕНЬ У БУДІВЕЛЬНІЙ КОМПАНІЇ

2.1. Побудова цифрової інфраструктури управління будівельними підприємствами на основі BIM-моделювання

Управління будівельним підприємством в умовах цифрової трансформації більше не зводиться до планування термінів, кошторисів та взаємодії учасників процесу. Основоположним елементом нового управлінського ландшафту стає інформаційна модель об’єкта будівництва — BIM, або Building Information Modeling, яка виступає як багаторівнева, параметрична та динамічна система опису всіх характеристик об’єкта — від фізичних геометричних форм до юридичного статусу, енергетичних параметрів, життєвого циклу обслуговування, гарантійних умов і ризиків. Її теоретичне підґрунтя пов’язане з концепцією «цифрового двійника» (digital twin), що все частіше використовується в управлінні складними інфраструктурними системами.

Будівельна інформаційна модель є своєрідним інформаційним гіперграфом, де кожен вузол — це об’єкт із властивостями, а кожне ребро — функціональний чи логічний зв’язок. Основна перевага BIM — здатність до симулятивного прогнозування поведінки об’єкта в майбутньому, що дає змогу оптимізувати сценарії управління проєктом до його початку. Тому BIM не є інструментом візуалізації, а форматом структурування даних із можливістю трансформації на всіх рівнях управління підприємством. Автори BIM Handbook розглядають інформаційну модель як основу побудови інтегрованого процесного ланцюга в архітектурі управління будівельним підприємством [50].

Особливе значення має адаптація BIM до інформаційної інфраструктури підприємства. Це охоплює питання сумісності з ERP-

системами, аналітичними платформами BI, хмарними сервісами для обробки даних, системами календарного планування та інструментами обліку ресурсів. Таку сукупність логічно моделювати у вигляді архітектури, де BIM є «ядром знань», з яким взаємодіють процесні модулі, фінансові системи, документообіг, система ризиків і панелі прийняття рішень.

Для оцінювання ефективності BIM порівняно з традиційними інструментами управління використано індекс приросту інформаційної цінності ICVI, що враховує зважений відносний приріст ефективності від переходу до цифрової моделі:

$$\mathrm{ICVI} = \sum_{i=1}^{n} c_i \times \left(\frac{P_{ir} - P_{ih}}{P_{ir}}\right), \qquad (2.1)$$

де c_i — ваговий коефіцієнт важливості функції; P_{ir} — базовий показник витрат чи складності в традиційній системі; P_{ih} — аналогічний показник у BIM-моделі. Цей індекс дозволяє аналітично вимірювати економічний і нефінансовий ефект від BIM, наприклад, скорочення термінів погодження або кількості проєктних колізій. Сума вагових коефіцієнтів c_i дорівнює одиниці; P_{ir} і P_{ih} вимірюються в однакових одиницях (дні, години, кількість колізій, грошові одиниці) для показників, зменшення яких є бажаним.

Управлінський вплив BIM на будівельне підприємство можна також оцінити за допомогою моделі ROI цифрової трансформації, адаптованої для BIM-контексту. Показник ROI_{BIM} визначає віддачу від інвестицій у BIM-технології з урахуванням економії витрат і підвищення доходу:

$$ROI_{BIM} = \frac{(H_{BIM} - H_{Base}) - (V_{BIM} - V_{Base})}{V_{BIM}}, \qquad (2.2)$$

де H_{BIM} — доходи підприємства після впровадження BIM; H_{Base} — дохід за традиційної моделі; V_{BIM}, V_{Base} — витрати підприємства відповідно з використанням і без використання BIM, причому V_{BIM} включає витрати на

впровадження BIM (програмне забезпечення, навчання персоналу, розроблення моделей). Цей показник дає змогу ухвалювати стратегічні рішення щодо доцільності впровадження BIM на рівні фінансової структури компанії.

Для оцінювання узгодженості часових і вартісних параметрів цифрової моделі та виявлення вузьких місць використано коефіцієнт цифрової координованості DCM:

$$\mathrm{DCM} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta f_i \times \Delta d_i}{\sum_{i=1}^{n} f_i \times d_i}, \qquad (2.3)$$

де Δf_i, Δd_i — відхилення за часом і вартістю для і-ої операції, а f_i, d_i — планові значення. Значення DCM→0 свідчить про високий ступінь цифрової узгодженості в моделі, що є критично важливим для проєктів високої складності. Оскільки чисельник і знаменник мають однакову розмірність (добуток тривалості та вартості), коефіцієнт є безрозмірним, а добуток відхилень робить його чутливим до операцій, на яких одночасно порушено і строки, і бюджет.

Ці формули не є лише аналітичними інструментами — вони демонструють нову логіку мислення в управлінні будівельним підприємством, що переходить від реактивного контролю до проактивного передбачення. Завдяки BIM можливо побудувати симуляційні середовища, в яких рішення приймаються не лише на основі інтуїції, а через багатофакторне цифрове моделювання. Зміна будь-якого елемента у моделі автоматично запускає оновлення пов’язаних процесів — це створює передумови для побудови самонастроюваної системи управління [68].

На концептуальному рівні BIM також поєднується з іншими цифровими підходами – Lean-концепціями, Agile-моделями управління, мультиагентними системами оптимізації та методами штучного інтелекту, зокрема в задачах прогнозного аналізу (predictive analytics), коли модель на

основі накопичених даних прогнозує ризики зриву строків або дефіциту ресурсів [46; 96].

Побудова цифрової архітектури управління на основі BIM-моделі вимагає не лише інтеграції інформаційних потоків, але й урахування економічних, симулятивних і стратегічних компонентів [2]. Ключові логічні блоки взаємодії BIM як ядра знань із цифровими двійниками, прогнозними модулями, аналітичними панелями та показниками ICVI, ROI_{BIM} і DCM, що вимірюють ефективність і узгодженість управлінських рішень, наведено на рис. 2.1.

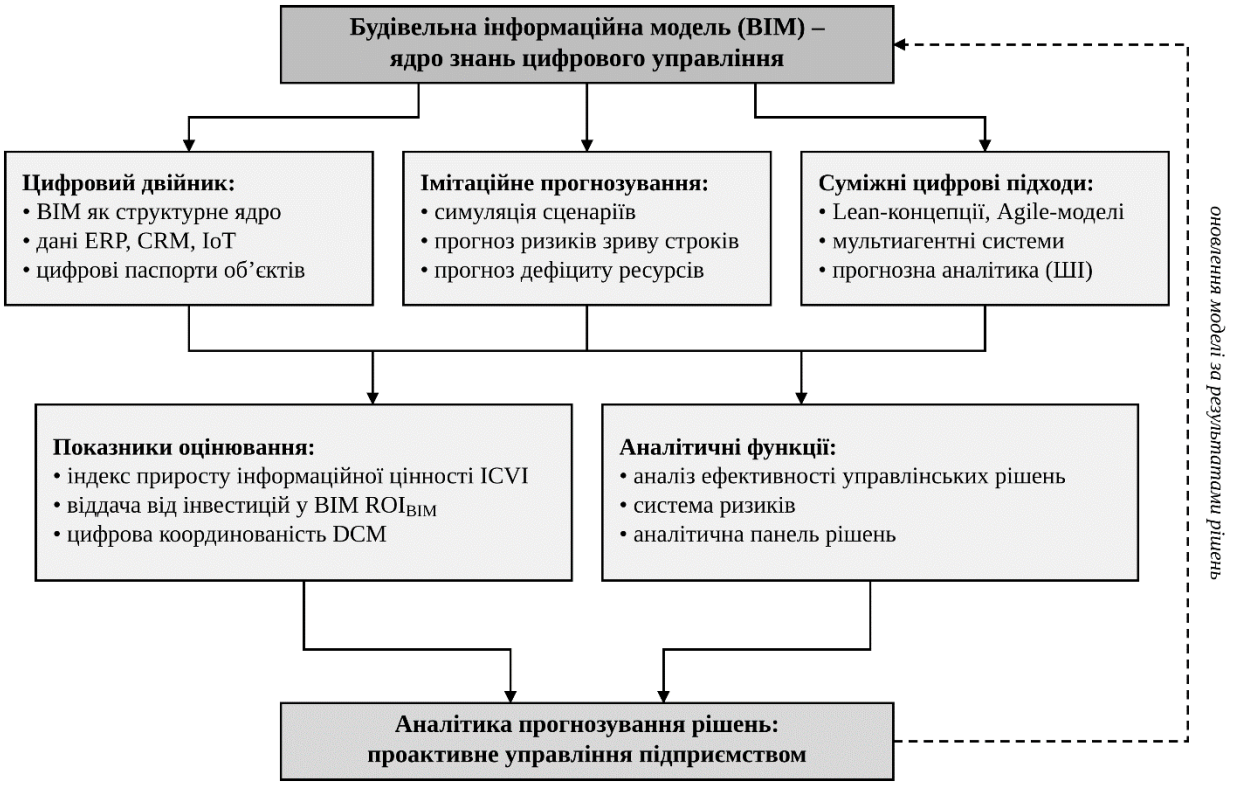


Рис. 2.1. Архітектура інформаційного управління будівельним підприємством на основі BIM з формульною підтримкою ефективності*(розроблено автором на основі [2])*

Таким чином, теоретична рамка BIM не обмежується лише технологічною площиною — вона інтегрується в управлінську, економічну,

правову, логістичну, ризик-орієнтовану архітектуру. Побудова цифрової інфраструктури з BIM у центрі вимагає перегляду не лише інструментарію, а й самих принципів організації підприємства. Стратегія управління стає багатопроцесною, ієрархічною, і водночас адаптивною до змін, що є основою цифрової стійкості сучасного будівельного бізнесу.

Утвердження BIM як аналітичного та організаційного ядра управлінської моделі будівельного підприємства вимагає глибшого розгляду її технічної реалізації в межах цифрової інфраструктури. Саме тому наступним логічним кроком є аналіз архітектури такої інфраструктури з урахуванням її інформаційних контурів, функціональної структури та реактивної поведінки.

Цифрова трансформація будівельного підприємства є не лише технологічним зрушенням у методах проєктування або контролю, а радше принципово новим способом організації всієї системи управління. У центрі цього процесу опиняється побудова цифрової інфраструктури, яка не функціонує як набір окремих програм або інформаційних модулів, а як інтегрована інформаційна архітектура, побудована на основі наскрізного обміну даними. У цій інфраструктурі ключову роль відіграє BIM-модель, яка, будучи основою багатошарової координації проєкту, виступає не тільки інструментом візуалізації, а й аналітичним ядром для прийняття управлінських рішень. Структура такої архітектури формується в контексті постійного обміну, актуалізації та зворотного контролю інформації, що проходить через усі функціональні шари організації — від технічного проєктування до логістики, закупівель, контрактингу, моніторингу виконання робіт і експлуатації [52].

На концептуальному рівні архітектура цифрової інфраструктури із BIM-ядром описується як система, що поєднує декілька інформаційних контурів. Перший контур — це геометричний та параметричний шар, у якому фіксуються характеристики об’єктів: розміри, матеріали, взаємне розташування, технічні властивості, стандарти, фази будівництва. Цей шар

відповідає класичному уявленню про 3D і 4D-моделювання. Другий контур — економічний, пов'язаний із вартісною оцінкою, бюджетуванням, формуванням ресурсних потоків та обчисленням економічних ефектів. Його реалізація забезпечується 5D-моделюванням, зокрема через такі інструменти, як RIB iTWO, CostX або Trimble Vico. Третій контур — управлінський, у якому BIM-середовище з'єднується з ERP-системами (SAP S/4HANA, Oracle Construction Cloud), системами управління проєктами (PMIS), а також інформаційними платформами CRM та SCM. Тут ключову роль відіграє структурований API-шар, що забезпечує передачу даних у режимі реального часу між модулями, з урахуванням прав доступу, валідації змін та управління конфігурацією.

Особливістю цифрової архітектури з BIM-ядром є те, що кожна зміна в моделі, навіть мінімальна — наприклад, переміщення внутрішньої перегородки, — автоматично призводить до каскадних оновлень у всіх пов'язаних системах: змінюється обсяг матеріалу, вартість робіт, змінюється календар, і навіть оновлюються обґрунтування у фінансовому плані. Така реактивність системи є її стратегічною перевагою, адже забезпечує ухвалення рішень на основі актуальних, повністю синхронізованих даних. Але водночас це породжує високі вимоги до архітектури самої інфраструктури: кожен її компонент має бути здатним до гнучкої адаптації, масштабування, конфігураційного управління та захисту.

У цьому зв'язку виникає необхідність вимірювати ступінь інтеграції й ефективності такої архітектури. Одним із найбільш показових індикаторів є коефіцієнт синхронізованого оновлення DSR, який дозволяє оцінити, яка частка змін у BIM-моделі була автоматично синхронізована з усіма пов'язаними системами. Цей показник визначається за формулою:

$$DSR = \frac{\sum_{i=1}^{n} b_i}{\sum_{i=1}^{n} m_i}, \qquad (2.4)$$

де b_i — кількість оновлених параметрів, що були інтегровані автоматично, m_i — загальна кількість змін, які потребували обробки. Значення, близьке до 1, свідчить про високу ефективність інформаційного обміну і адаптивність цифрової архітектури до змін, тоді як низьке значення вказує на «розриви» між модулями, які вимагають ручного втручання або дублювання даних, що сповільнює цикл прийняття рішень. Показник розраховується за даними журналу змін спільного середовища даних і протоколів обміну між BIM та ERP за звітний період.

Класична проблема, яку намагається вирішити BIM-архітектура, — це так зване «інформаційне тертя», коли різні модулі системи працюють з відмінними версіями одних і тих самих даних. Наприклад, відділ проєктування бачить версію А, кошторисники — версію В, а закупівельники — взагалі версію С, через що відбуваються зриви, дублювання закупівель, конфлікти на об’єкті. Завдяки централізованій BIM-платформі, яка функціонує в хмарному середовищі, із вбудованим CDE (Common Data Environment), можна унеможливити такі суперечності: усі учасники працюють із єдиним джерелом істини (single source of truth), яке контролюється через автоматичні оновлення, цифрові журнали змін, механізми підтвердження версій і алгоритми блокування конфліктних дій [46; 65].

Структуру цифрової інфраструктури будівельного підприємства з BIM-ядром, що забезпечує наскрізну взаємодію між інформаційними контурами та управлінськими модулями в реальному часі, наведено на рис. 2.2.

Архітектурна побудова цифрового середовища також охоплює засоби автоматизованого моніторингу, включаючи обробку телеметричних даних з будівельного майданчика. Інтеграція IoT-пристроїв, які відслідковують температуру бетону, вологість повітря, рівень шуму, навантаження на конструкції або переміщення працівників, дозволяє BIM-моделі працювати як «живій системі». Ці дані зчитуються в реальному часі і обробляються через аналітичні панелі — зокрема Power BI, Qlik, Tableau або

внутрішньокорпоративні панелі в середовищах ERP. На основі цих даних здійснюється не лише контроль, а й прогнозування критичних ситуацій, що дає змогу перейти від реактивної до проактивної логіки управління.

Здатність такої інфраструктури реагувати на зовнішні збурення – подорожчання ресурсів, зміну регламентів, затримки поставок – характеризується часовим лагом між виявленням відхилення в моделі та коригувальною дією системи управління. Саме цей лаг покладено в основу коефіцієнта цифрової реактивності, що застосовується під час оцінювання ефективності управлінських рішень у BIM-середовищі.

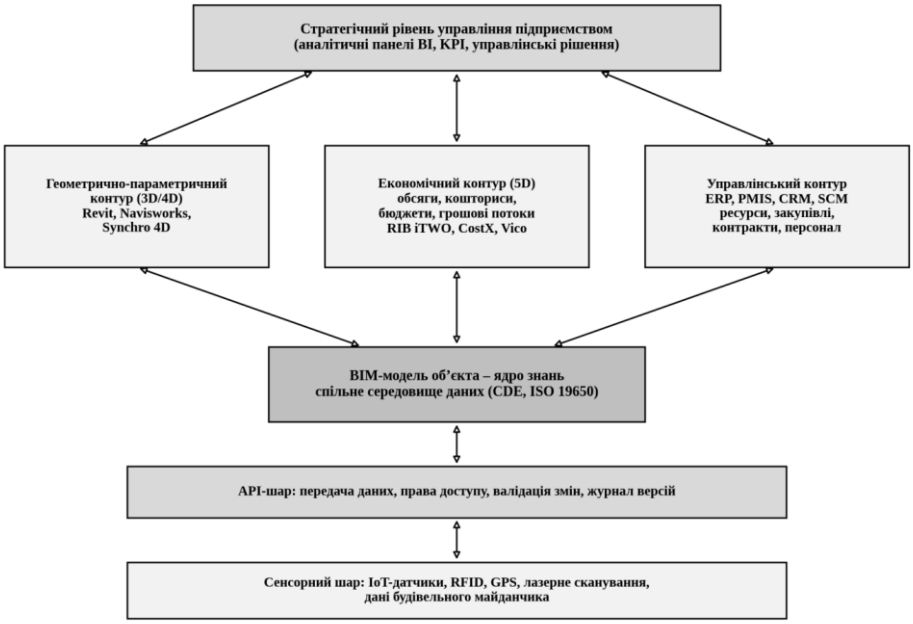


Рис. 2.2. Структура цифрової інфраструктури будівельного підприємства з ядром на базі BIM *(розроблено автором на основі [46])*

У практичному вимірі архітектура цифрової інфраструктури будівельного підприємства має мати такі обов'язкові характеристики: модульність (тобто можливість підключення нових компонентів без переробки всієї системи), масштабованість (перехід від одиничного об'єкта до портфеля проєктів без втрати керованості), розподіленість (сумісна робота

в кількох містах, регіонах чи країнах), гнучкість (зміна структури під конкретний тип проєкту), зворотна сумісність (підтримка старих форматів, у т.ч. PDF, DWG, DXF, IFC) та прозорість (наявність систем журналювання, цифрових підписів, інтеграції з державними реєстрами) [67].

В основі управління будівельними проєктами лежить не лише планування ресурсів, бюджетів і строків, а передусім системна обробка складної множини даних, що описують фізичну, організаційну, правову, фінансову і технологічну природу об'єкта. Саме в цьому контексті BIM-модель набуває особливого значення як інформаційний каркас, у межах якого формується багаторівнева логіка управління — від оперативного диспетчеризаційного контролю до стратегічної оцінки ефективності проєкту на довгострокову перспективу [80].

Алгоритми управління на основі BIM починають діяти вже на етапі передпроєктного аналізу, де інформаційна модель дозволяє змоделювати різні сценарії реалізації на основі наявної ділянки, інженерних умов, містобудівної документації. Це дає змогу оцінити потенційні ризики ще до розробки креслень, застосовуючи геоінформаційні дані, історичну аналітику, статистику типових збоїв або відхилень. Алгоритм такого моделювання базується на багатокритеріальній оптимізації з урахуванням доступних потужностей, цін на матеріали, очікуваних погодних умов і часових вікон виконання.

Після затвердження концепції алгоритмічна база переходить на стадію проєктування. У цей момент ключовим є формування алгоритмів координації між учасниками, що передбачає узгодження архітектурної, конструктивної, електротехнічної, інженерної, оздоблювальної та кошторисної документації. Застосовується технологія clash-detection — автоматичного виявлення колізій у моделі, що дає змогу зменшити кількість проблем на будівельному майданчику, які в минулі роки виникали через невідповідність проєктів. Алгоритми такого типу функціонують на базі графових структур, де кожна одиниця — вузол, а взаємозв'язки — ребра. Аналізуючи їхню взаємну

геометричну та параметричну поведінку, система визначає порушення допустимих відстаней, об’ємів, нормативів.

Коли модель переходить у фазу виконання, BIM-інформація стає основою для календарно-мережевого планування. Саме тут застосовуються алгоритми типу 4D-синхронізації, які поєднують будівельний графік з геометричною моделлю. Наприклад, у системах Navisworks або Synchro використовуються алгоритми імітаційного розрахунку критичного шляху, які дозволяють не лише змоделювати затримки, а й запропонувати альтернативні сценарії будівництва. Дані з календарного графіка, які раніше існували у вигляді Gantt-діаграм, тепер інтегруються у BIM і візуалізуються просторово, з прив’язкою до конкретних етапів, що сприймаються візуально [60; 72; 106].

Сучасне управління будівельними проєктами неможливе без поетапної реалізації алгоритмів, що інтегруються у BIM-середовище. У кожному з етапів життєвого циклу проєкту алгоритмічна логіка виконує визначальні функції — від аналітики до управлінських рішень, ґрунтуючись на даних цифрової моделі. Ключові етапи BIM-управління з відповідними алгоритмічними діями та їх результатами узагальнено в табл. 2.1. Алгоритмічна модель стає ще більш складною на стадії реалізації завдяки включенню сенсорних даних. Тут вмикається принцип зворотного інформаційного кола, коли BIM-модель не лише видає план будівництва, а й отримує зворотні сигнали про виконання. Наприклад, за допомогою технологій IoT можна фіксувати фактичний прогрес робіт, вимірювати масу встановлених елементів, фіксувати навантаження на тимчасові конструкції або порівнювати запланований графік із фактичним. Алгоритми машинного навчання на основі таких даних навчаються розпізнавати типові відхилення та формувати попередження у випадку ризику зриву строків або перевитрат.

Таблиця 2.1.

Алгоритмічні етапи BIM-управління будівельними проєктами

(розроблено автором на основі [106])

Передпроєктний аналіз	Моделювання сценаріїв на основі GIS, історичних даних, статистики відхилень і оптимізаційних алгоритмів	Виявлення ризиків, оптимізація ресурсів, формування альтернативних сценаріїв
Проєктування	Clash-detection на основі графових структур; координація архітектурної, конструктивної, інженерної документації	Усунення конфліктів у проєктах, зменшення колізій, підвищення відповідності моделі реальному об’єкту
Календарно-мережеве планування	4D-синхронізація, імітаційне моделювання критичного шляху, інтеграція графіків у BIM	Просторове відображення графіка, гнучкість управлінських рішень, візуалізація етапів виконання
Фаза реалізації	Збір сенсорних IoT-даних, фіксація маси, навантажень, фактичного прогресу, динамічне оновлення BIM	Оперативне управління змінами, контроль реального виконання, зворотній зв’язок у реальному часі
Зворотній цифровий контроль	Машинне навчання для розпізнавання типових відхилень, формування попереджень і аналітичної реакції системи	Прогнозування ризиків зриву, адаптивне реагування на перевитрати та порушення строків

У межах такого середовища важливою стає кількісна оцінка рівня відхилення від запланованих параметрів. Для цього використано узагальнений індекс управлінської синхронізації BIM (USI), що визначається як середнє значення відносних відхилень фактичних термінів і витрат від планових за етапами проєкту:

$$USI_{BIM} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{|C_{ri}-C_{ti}|}{C_{ri}} + \frac{|M_{ri}-M_{ti}|}{M_{ri}}\right), \qquad (2.5)$$

де C_{ri} і M_{ri} — заплановані терміни та витрати для і-го етапу, а C_{ti} і M_{ti} — фактичні. Цей індекс дозволяє відстежити середню величину відхилень за проєктом у часово-фінансовому розрізі. Мінімізація USI є одним із головних завдань цифрового контролю. Відхилення беруться за модулем, щоб перевитрати та економія на різних етапах не компенсували одне одного; n — кількість етапів; USI = 0 відповідає повному збігу плану і факту. За змістом показник узгоджується з методом освоєного обсягу, у якому відхилення за строками та вартістю оцінюються індексами SPI і CPI [59].

Окремо слід розглянути алгоритмічні компоненти, пов'язані з управлінням ресурсами. Інтеграція BIM із SCM (Supply Chain Management) дозволяє на основі параметрів моделі формувати автоматичні запити на постачання, контролювати залишки, будувати логістичні ланцюги та розраховувати найекономніші шляхи доставки. Це можливо завдяки тому, що кожен елемент моделі має унікальні властивості: код товару, масу, габарити, строки доставки, місце установки. Алгоритми маршрутизації в таких випадках використовують логіку комівояжера (TSP – Traveling Salesman Problem), адаптовану до обмежень календаря проєкту [74].

Фінансові алгоритми в BIM-проєктах реалізуються через 5D-системи, які автоматично генерують бюджети, кошториси та прогнозують грошові потоки. Особливо цінною функцією є сценарне моделювання змін курсу валют, цін на матеріали, податкових ставок. Наприклад, зміна валюти контракту у модулі ERP автоматично оновлює кошторис у BIM і сигналізує про потребу в коригуванні фінансових резервів. Це відбувається завдяки включенню алгоритмів мультифакторної оцінки вартості, з урахуванням інфляції, сезонних індексів і ризикових надбавок.

Для такого аналізу використано коефіцієнт ризик-скоригованої вартості етапу проєкту:

$$RCV_a = D_a \times (1 + \sum_{b=1}^{m} g_{ab} \times k_b), \qquad (2.6)$$

де D_a — початкова вартість a-го етапу; g_{ab} — очікуване відносне збільшення вартості a-го етапу внаслідок реалізації ризику b-го типу (правового, технічного, кліматичного), що визначається як добуток імовірності ризику на частку приросту вартості; k_b — ваговий коефіцієнт важливості b-го типу ризику для конкретного об'єкта; m — кількість типів ризиків. Формула дає змогу отримати ризик-скориговану вартість і включити її до загального бюджетного плану.

BIM-середовище виконує не лише функцію візуалізації будівельного об'єкта, а й слугує обчислювальним ядром для реалізації керованих алгоритмів в управлінні проєктом [38]. Логіку проходження інформації через ключові етапи цифрового управління – від передпроєктного аналізу до ресурсного балансування – з інтеграцією показників оцінювання відхилень і ризиків наведено на рис. 2.3.

Управління будівельними підприємствами в умовах цифрової трансформації більше не може базуватися виключно на класичних принципах калькуляції витрат, контролю виконання робіт та оперативного реагування на ризики. Економічна ефективність сьогодні розглядається не як підсумковий показник завершеного циклу, а як динамічна функція здатності підприємства формувати й адаптувати інформацію про свій виробничо-організаційний стан у режимі реального часу. У цьому сенсі цифрова інфраструктура, побудована на основі BIM-моделей, виконує не лише функцію контролю, а й функцію аналітичною платформою, що генерує нову якість управлінських рішень, оптимізує фінансові потоки, мінімізує ризики й забезпечує конкурентоспроможність на ринку проєктів і підрядів [54].

Основу економічного ефекту формує принцип зворотного цифрового управління. Це означає, що рішення ухвалюється не після події, а до її настання — шляхом симуляції, прогнозування й автоматичного виявлення відхилень. Наприклад, замість того, щоб фіксувати перевитрати через тиждень, система виявляє аномалії в структурі витрат безпосередньо після виникнення відхилення й подає сигнал на керуючий рівень. Це можливо

лише в тому випадку, якщо всі компоненти підприємства — технічні, ресурсні, логістичні, фінансові, часові — об'єднані в єдиний інформаційний контур, побудований на основі цифрового двійника. Саме BIM є структурним ядром цього двійника, на який нашаровуються дані з ERP, CRM, IoT, API сервісів ринку, цифрових паспортів об'єктів, правових регламентів та моделей ризикової поведінки.

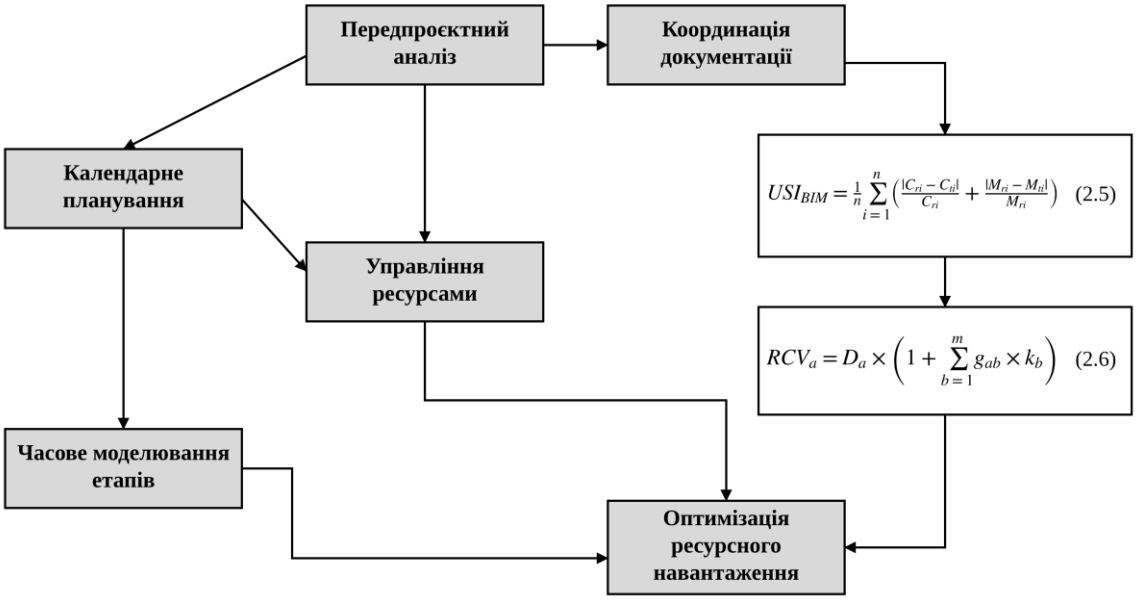


Рис. 2.3. Структура алгоритмічного управління будівельним проєктом на основі BIM-моделі та цифрових показників ефективності *(розроблено автором на основі [38])*

Фінансово ця перевага проявляється передусім у скороченні непродуктивних витрат. Емпіричні дослідження свідчать, що найчастіше вигоди від BIM проявляються саме у зниженні та контролі витрат, а також у скороченні тривалості робіт [36; 41]. Це обумовлено скороченням повторних робіт, зменшенням помилок у проєктній документації, автоматизацією закупівель, покращенням контролю ресурсів і вчасним реагуванням на зовнішні збурення. Крім того, зменшується середня тривалість реалізації

об’єкта, що забезпечує швидше виведення інвестиційного капіталу з циклу і дозволяє розпочати наступний проєкт раніше. Таким чином, ефект проявляється не лише на рівні окремого об’єкта, а й у мультиплікативному прискоренні всієї бізнес-моделі девелопера [102].

Для кількісної оцінки цього ефекту використано індекс приросту продуктивності (Investment Productivity Index, IPI), що визначається як відношення продуктивності виконання робіт за умов впровадження BIM до продуктивності за традиційної системи:

$$IPI = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} \frac{D_i^{out}}{R_i}\right)_{BIM}}{\left(\sum_{i=1}^{n} \frac{D_i^{out}}{R_i}\right)_{Base}}, \qquad (2.7)$$

де D_i^{out} — обсяг виконаних робіт за і-й період; R_i — витрати часу на їх реалізацію; чисельник — показники за умов впровадження BIM, знаменник — у традиційній системі. Значення IPI > 1 свідчить про підвищення продуктивності виконання робіт за рахунок впровадження цифрової інфраструктури. Показник розраховується для однорідних видів робіт з однаковими одиницями виміру обсягів в обох варіантах.

Ще однією важливою складовою ефекту є прозорість витрат, яка дозволяє швидше і точніше розподіляти бюджети, виявляти надлишкові витрати та усувати фінансові дубляжі. Замість того, щоб шукати розбіжності між платіжними документами вручну, система автоматично звіряє BIM-кошторис, рахунки постачальників і графік виконання, знаходячи відхилення. Алгоритми обробки працюють на основі моделі цифрової відповідності, в якій кожен елемент має свій унікальний ідентифікатор і пов’язаний зі своїм фінансовим потоком. Це дає змогу формувати звітність нового типу, де витрати не лише агрегуються, а й пояснюються причинами їх появи — поетапно, структуровано, із врахуванням технологічного контексту.

Обґрунтування вибору показників потребує їх зіставлення з наявними методами оцінювання ефекту впровадження BIM. Порівняльну характеристику цих методів наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2.

Порівняльна характеристика методів оцінювання ефекту впровадження BIM *(розроблено автором на основі [36; 41; 59; 81; 99])*

Розрахунок ROI впровадження BIM [36]	Фінансова віддача інвестицій у BIM на рівні проєкту	Простота, зрозумілість для інвесторів	Не враховує часові та організаційні ефекти; потребує порівнянного базового проєкту
Моделі BIM-зрілості (NBIMS CMM, BIM QuickScan, матриця Б. Сукара) [81; 99]	Рівень розвитку BIM-компетентностей організації	Комплексність, можливість бенчмаркінгу	Переважно якісний характер; відсутній зв'язок із фінансовими результатами
Метод освоєного обсягу (EVM) [59]	Відхилення за строками та вартістю	Стандартизованість, кількісні індекси SPI і CPI	Не відображає рівня цифрової інтеграції та швидкості реагування системи управління
Системи KPI впровадження BIM [41]	Окремі операційні ефекти (колізії, зміни, строки)	Конкретність, доступність даних	Фрагментарність; відсутність агрегування в узагальнену оцінку
Інтегральне оцінювання на основі системи показників ICVI, DCM, DSR, USI, RCV, IPI	Узгоджений вплив організаційно-технологічних, економічних і управлінських параметрів	Поєднує кількісні оцінки різних груп параметрів, забезпечує узагальнену оцінку на рівні підприємства	Потребує обґрунтування вагових коефіцієнтів і верифікованих даних BIM та ERP

Як видно з табл. 2.2, кожен із наявних методів характеризує лише окремий аспект ефекту BIM, тоді як завдання коригування економіко-

управлінських характеристик будівельного підприємства потребує їх поєднання в межах однієї системи показників.

Розвитком цифрової інфраструктури з BIM-ядром є концепція цифрового двійника, яка передбачає безперервне оновлення даних моделі відповідно до фактичного стану об'єкта: її засади для будівництва сформульовано К. Бойє зі співавторами [39], а інформаційні системи будівництва на основі цифрових двійників запропоновано Р. Саксом зі співавторами [89], а систему управління будівельними проєктами з інформаційною системою цифрового двійника – Г. Рижаковою зі співавторами [88].

Отже, цифрова інфраструктура управління будівельним підприємством з BIM-ядром поєднує геометрично-параметричний, економічний і управлінський контури, пов'язані через API-шар і спільне середовище даних. Для кількісного оцінювання її функціонування обґрунтовано систему показників: ICVI та ROI_{BIM} характеризують ефект переходу до цифрової моделі; DCM, DSR і USI – узгодженість і синхронізацію часових та вартісних параметрів; RCV – ризик-скориговану вартість етапів; IPI – продуктивність виконання робіт. Достовірність цих показників залежить від якості даних інформаційної моделі, що зумовлює потребу в механізмах аналітичної верифікації даних.

2.2. Механізми аналітичної верифікації даних і управління проєктною інформацією у середовищі BIM

Ефективність BIM-коригування економіко-управлінських характеристик будівельного підприємства безпосередньо залежить від достовірності даних інформаційної моделі, оскільки обсяги робіт, тривалості,

вартість і потреба в ресурсах, на основі яких розраховуються показники ICVI, DCM, DSR, USI, RCV та IPI, формуються з атрибутів елементів моделі. Помилка в атрибуті – неправильно заданий матеріал, відсутній код кошторисної позиції чи хибна прив'язка елемента до етапу календарного плану – поширюється на кошторис, графік і потребу в ресурсах. Тому ключовим завданням управління проєктною інформацією в BIM-середовищі є аналітична верифікація даних, тобто підтвердження того, що інформація є повною, коректною, узгодженою та актуальною для завдань проєктування, кошторисного розрахунку, календарного планування й експлуатації. Положення підрозділу узагальнюють і розвивають результати, опубліковані автором у праці [26].

Методологічною основою оцінювання якості даних є багатовимірний підхід Р. Ванга і Д. Стронг, за яким якість даних визначається не лише їх точністю, а й низкою контекстних, репрезентативних характеристик і характеристик доступності, значущих для користувача даних [107]. Стосовно інформаційної моделі будівельного об'єкта доцільно виокремити чотири виміри якості даних: повноту (наявність обов'язкових атрибутів відповідно до рівня потреби в інформації), коректність (відповідність значень атрибутів нормативним і проєктним вимогам), узгодженість (відсутність геометричних колізій і суперечностей між дисциплінарними моделями) та актуальність (відповідність версії моделі поточному стану проєкту). Необхідний обсяг і деталізацію інформації для кожної стадії та кожного призначення визначає концепція рівня потреби в інформації (Level of Information Need), закріплена стандартом EN 17412-1 [51].

Організаційний механізм управління проєктною інформацією визначає серія стандартів ISO 19650. Вимоги замовника формулюються у вимогах до обміну інформацією (EIR) і реалізуються виконавцем через план виконання BIM (BEP), а інформаційні контейнери у спільному середовищі даних послідовно проходять стани «в роботі» (work in progress), «спільний доступ» (shared), «опубліковано» (published) та «архів» (archived); перехід між

станами супроводжується перевіркою, оглядом і затвердженням інформації [7]. Таким чином, верифікація вбудовується в життєвий цикл інформації, а кожна зміна отримує автора, дату, статус і запис у журналі погоджень. Послідовність станів інформаційних контейнерів і контрольні точки верифікації наведено на рис. 2.4.

Технологічну основу аналітичної верифікації становлять системи автоматизованої перевірки моделей на основі правил (rule-based checking). Ч. Істман, Дж. Лі, Й. Чон і Дж. Лі виокремили чотири етапи такої перевірки: інтерпретацію правил і їх логічне структурування, підготовку моделі до перевірки, виконання перевірки та формування звіту про результати [49]. На практиці цей підхід реалізовано в програмних засобах перевірки моделей, зокрема Solibri, а виявлені невідповідності передаються учасникам проєкту у форматі BCF (BIM Collaboration Format), що забезпечує прив’язку зауваження до конкретного елемента моделі та відповідального виконавця. Етапи автоматизованої перевірки BIM-моделі наведено на рис. 2.5.

Складність автоматизації перевірки залежить від типу правила. В. Солігін і Ч. Істман класифікували правила автоматизованої перевірки на чотири класи: правила, що потребують одного або кількох явно заданих значень атрибутів; правила, що оперують простими похідними значеннями; правила, які потребують розширеної структури даних, зокрема аналізу просторових зв’язків; правила, що вимагають доведення відповідності рішення за допомогою моделювання чи розрахунку [97].



Рис. 2.4. Стани інформаційних контейнерів і контрольні точки верифікації даних у спільному середовищі даних *(розроблено автором на основі [7])*

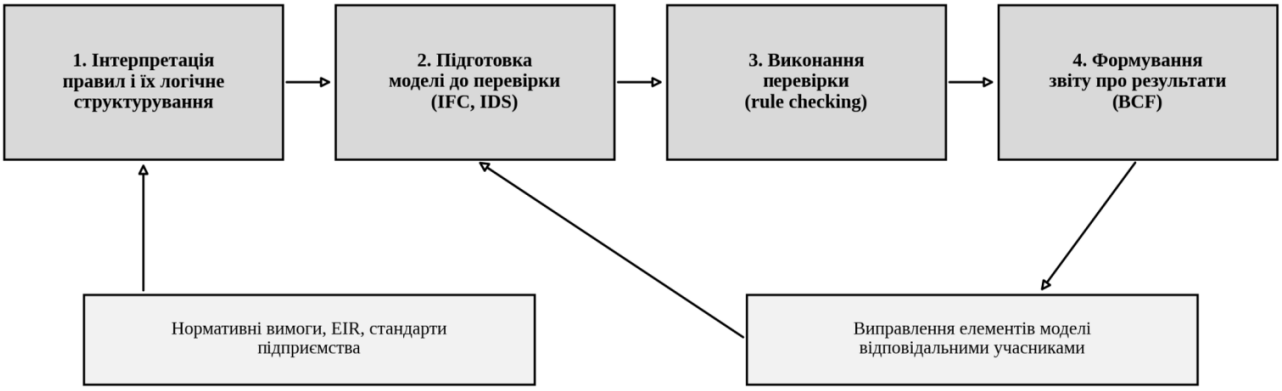


Рис. 2.5. Етапи автоматизованої перевірки BIM-моделі на основі правил *(розроблено автором на основі [42; 49])*

Для формалізації нормативних вимог у придатному до машинної перевірки вигляді застосовується методика семантичної розмітки RASE (Requirement, Applicability, Selection, Exception), яка виокремлює в тексті норми вимогу, умову її застосовності, об’єкти вибору та винятки [61], а вимоги до складу атрибутів моделі дедалі частіше подаються у

машинозчитуваному форматі IDS (Information Delivery Specification), що дозволяє автоматично перевіряти повноту інформації в IFC-моделях [42]. Для будівельного підприємства ця класифікація визначає досяжний рівень автоматизації: правила перших двох класів перевіряються автоматично, тоді як правила третього й четвертого класів потребують участі фахівця (рис. 2.6).

Для кількісного оцінювання придатності даних моделі до розрахунку показників ефективності запропоновано коефіцієнт якості даних BIM-моделі K_{dq}, який агрегує результати перевірок за вимірами якості:

$$K_{dq} = \sum_{j=1}^{m} w_j \cdot \frac{N_j^{pass}}{N_j}, \qquad (2.8)$$

де m – кількість вимірів якості даних (повнота, коректність, узгодженість, актуальність); w_j – ваговий коефіцієнт j-го виміру, сума вагових коефіцієнтів дорівнює одиниці; N_j – кількість виконаних перевірок за j-м виміром; N_j^{pass} – кількість успішно пройдених перевірок. Коефіцієнт змінюється від 0 до 1.

Дані моделі використовуються для розрахунку показників ефективності та ухвалення коригувальних рішень лише за умови, що значення K_{dq} не нижче порогового рівня, встановленого у вимогах до обміну інформацією (EIR) або плані виконання BIM (BEP); в іншому разі модель повертається на доопрацювання до стану «в роботі». Тим самим верифікація даних стає вхідною умовою достовірності кількісного оцінювання результатів BIM-коригування.

Фундаментальним інструментом аналітичної верифікації в системах перевірки на основі правил є здатність формалізувати різні типи відхилень у вигляді кількісних індикаторів, що дозволяють не лише виявляти порушення, але й проводити їх класифікацію за масштабом і критичністю.

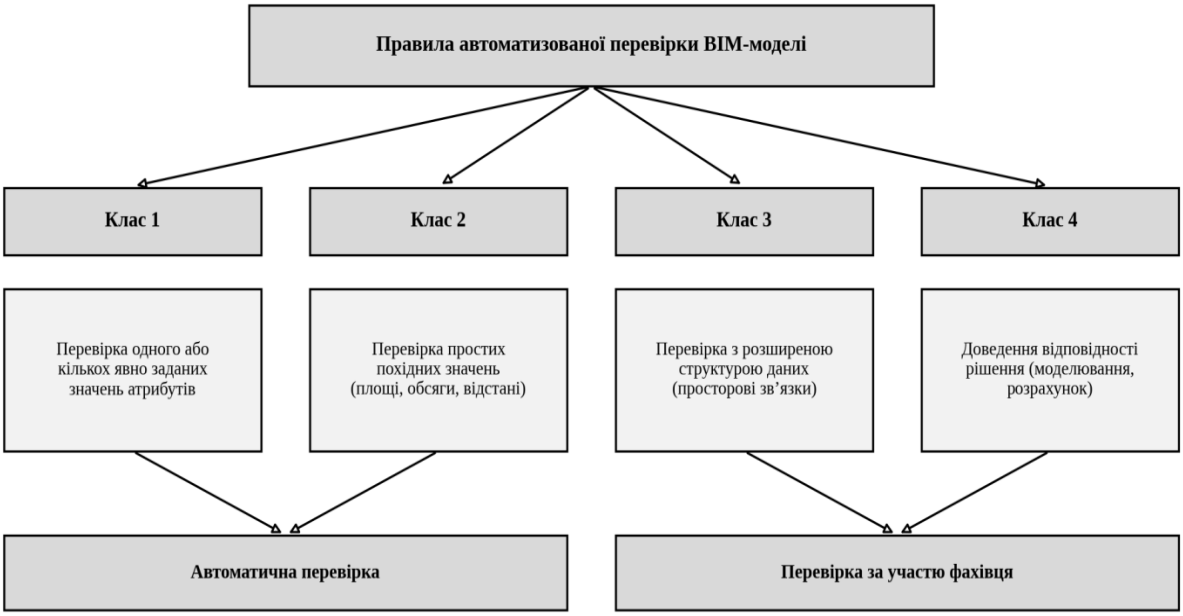


Рис. 2.6. Класифікація правил автоматизованої перевірки BIM-моделі *(розроблено автором на основі [97])*

Базовим елементом є геометричне відхилення — розрахунок, що визначає наскільки координати об'єкта (наприклад, точки вставки вентиляційного елемента) відрізняються від нормативних або шаблонних значень. Для цього використовується формула:

$$\Delta_{geom} = \sum_{i=1}^{n} \left| x_i - x_i^{ref} \right|, \qquad (2.9)$$

де x_i — фактичне значення координати (наприклад, X, Y, Z), а x_i^{ref} — нормативне або очікуване значення для тієї самої координати. Ця формула дозволяє визначити просторові зсуви, які можуть спричинити колізії або порушення монтажної логіки. Відхилення вимірюється в міліметрах і зіставляється з допустимими відхиленнями, встановленими нормативними документами для відповідного виду робіт.

Однак перевірка лише геометрії є недостатньою. Не менш важливим є облік логічних порушень, що виникають, коли поведінка або стан об'єкта не

відповідає заданому набору правил. Таке відхилення описується через індекс логічної невідповідності, який враховує кількість порушених правил, їх вагу (ризиковість) та силу впливу:

$$\Delta_{\text{logic}} = \sum_{i=1}^{n} R_i \cdot V_i, \qquad (2.10)$$

де R_i — коефіцієнт ризику кожного порушення (тобто, наскільки критичним є конкретне правило для безпеки, експлуатації тощо), а V_i — числове представлення сили впливу порушення (наприклад, ступінь відхилення від нормативного значення або частота повторення). Сума таких добутків дає змогу агрегувати логічне навантаження помилок у формі одного узагальненого показника.

Оскільки ресурси верифікації обмежені, перевірки доцільно пріоритезувати за ризиком: та сама за формою помилка має різні наслідки залежно від того, на які розрахунки та управлінські рішення впливає відповідний атрибут. Так, відсутність класу вогнестійкості в елементі шляху евакуації формально є незначною неповнотою даних, проте має високу ризикогенність, тоді як неточність в атрибутах декоративного оздоблення не впливає ні на безпеку, ні на вартість робіт. Для такої пріоритезації запропоновано ризик-орієнтовану модель, яка враховує нормативну значущість атрибута, частоту повторення похибки, кількість залежних об’єктів і залишковий час до реалізації проєктного рішення (рис. 2.7).

Змінні моделі мають такий зміст: RC_i – коефіцієнт ризику для і-го атрибута об’єкта, що визначається на основі його нормативної значущості; F_i – частота повторення похибки в моделі; L_j – логічна глибина впливу j-го параметра (кількість пов’язаних з ним об’єктів); I_j – коефіцієнт інерції, що характеризує ймовірність пізнього прояву похибки у фізичному середовищі. Першим показником є інтегральний ризик об’єкта:

$$R_{obj} = \sum_{i=1}^{n} RC_i \cdot F_i, \quad (2.11)$$

У цій моделі кожне відхилення зважується за частотою повторення і нормативною ризиковістю. Формула дозволяє оцінити, наскільки об’єкт є небезпечним з точки зору потенційних наслідків помилок.

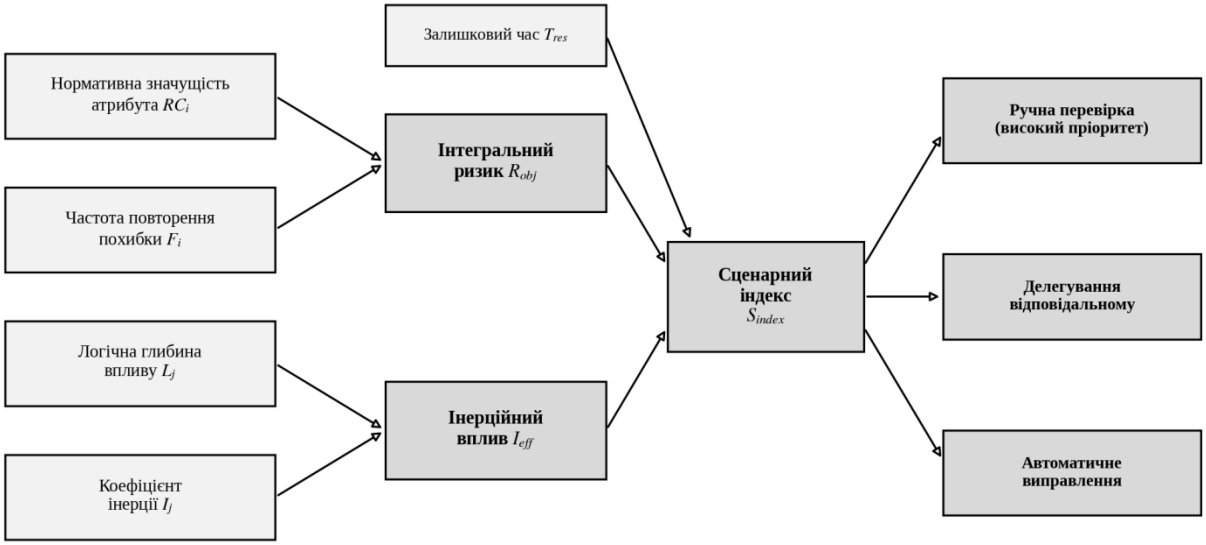


Рис. 2.7. Ризик-орієнтована пріоритезація верифікації BIM-даних *(розроблено автором)*

Наступним є розрахунок інерційного впливу похибки, що вираховується як:

$$I_{eff} = \sum_{j=1}^{m} L_j \cdot I_j, \quad (2.12)$$

де L_j — логічна глибина впливу (кількість об’єктів, які залежать від параметра), а I_j — коефіцієнт інерції (ймовірність пізньої реалізації похибки). Цей підхід дає змогу ідентифікувати ті відхилення, які можуть "спрацювати" пізніше, після здачі об’єкта. Завершальною формулою є сценарний індекс реакції, який дозволяє автоматично визначати тип втручання:

$$S_{index} = \frac{R_{obj} * I_{eff}}{T_{res} + 1}, \qquad (2.13)$$

де T_{res} — залишковий термін до реалізації проєктного рішення (у днях або етапах). Значення індексу дозволяє системі обрати автоматичну корекцію, делегування або ручну перевірку. Високі значення S_{index} відповідають помилкам з великою кількістю залежних об'єктів і коротким залишковим часом до реалізації рішення, що потребує першочергової ручної перевірки; низькі значення допускають автоматичне виправлення або планову перевірку. Вхідними даними для розрахунку інтегрального ризику об'єкта за формулою (2.11) та інерційного впливу похибки за формулою (2.12) є геометричні та логічні відхилення, визначені за формулами (2.9) і (2.10), а сценарний індекс реакції за формулою (2.13) поєднує обидві оцінки.

Отже, аналітична верифікація даних у BIM-середовищі поєднує організаційний механізм управління інформацією за ISO 19650, автоматизовану перевірку моделей на основі правил і ризик-орієнтовану пріоритезацію перевірок. Запропонований коефіцієнт якості даних K_{dq} пов'язує результати верифікації з достовірністю показників ефективності: коригування економіко-управлінських характеристик будівельного підприємства здійснюється лише на основі даних, що пройшли перевірку. Верифіковані дані моделі стають основою для цифрового моніторингу ресурсних і часових параметрів у процесі реалізації проєкту.

2.3. Інструментарій цифрового моніторингу ресурсних і часових параметрів за умов динамічної проєктної взаємодії

Управління ресурсами та часовими обмеженнями в межах будівельного проєкту є не лише технічним завданням, а й складним інформаційним процесом, який вимагає постійного моніторингу, аналітичного реагування та

адаптивного управління. Саме тому цифровий інструментарій моніторингу, як сукупність методів, технологій, програмних засобів і алгоритмів, що дозволяють фіксувати, аналізувати та прогнозувати параметри проєктної динаміки, набуває ключового значення в умовах сучасної диджиталізованої економіки. Цей інструментарій включає в себе не лише засоби фіксації інформації про наявні ресурси або використаний час, а й алгоритми їхньої обробки, візуалізації, сценарного аналізу та предиктивного управління. Положення підрозділу узагальнюють і розвивають результати, опубліковані автором у праці [24].

На початкових етапах розвитку цифрових інструментів домінували моделі статичного контролю, які передбачали ручне введення параметрів у формалізовані таблиці чи графіки. Проте сучасні інструменти ґрунтуються на принципах динамічного моніторингу, коли дані надходять у систему в реальному часі за допомогою сенсорів, геолокаційних модулів, SCADA-систем, IoT-архітектур та інтегрованих BIM-моделей. У таких системах інформація про витрати матеріалів, навантаження на ресурси, зміни у графіку або відхилення від планових показників автоматично збирається, обробляється аналітичними модулями та надходить до користувача у вигляді візуальних індикаторів, дашбордів або сценарних попереджень [32].

Інструментарій цифрового моніторингу ресурсів і часу в сучасному проєктному середовищі набуває ієрархічної структури, де кожен рівень управління використовує специфічний набір засобів. На операційному рівні — це системи збору даних через сенсори, дрони, мобільні застосунки, сканери об’єктів і RFID-мітки. На тактичному рівні реалізуються інтеграційні рішення на основі ERP-систем, які дають змогу поєднувати дані з логістики, обліку матеріалів і фінансових витрат у єдиний потік. На стратегічному рівні застосовуються інструменти аналітичного аналізу та симуляційного прогнозування, серед яких використовуються платформи типу Oracle Primavera, Power BI, Autodesk Insight, Synchro 4D та інші. Така багаторівнева архітектура дозволяє не лише відслідковувати статус виконання задач, а й

будувати предиктивні моделі, які виявляють ризики ще до їх фактичної появи [19].

Таким чином, класифікація інструментів цифрового моніторингу не є лише технічним завданням — вона базується на теоретичних моделях оцінки продуктивності, ефективності, ресурсної динаміки та часової реактивності. Її реалізація потребує синергії між прикладними програмними рішеннями, формалізованими математичними підходами та організаційною структурою управління, здатною адаптуватися до зміни даних у реальному часі. Саме на цьому перетині формуються сучасні архітектури цифрового моніторингу, які забезпечують проєктну стійкість, ресурсну збалансованість і управлінську прозорість [110].

Ієрархію цифрового інструментарію моніторингу, що поєднує операційний (збір даних), тактичний (інтеграція даних і контроль відхилень) і стратегічний (узагальнене оцінювання і прогнозування) рівні, наведено на рис. 2.8.

Щоб глибше зрозуміти, як саме реалізується ця багаторівнева система на практиці, розглянемо функціонально-аналітичну взаємодію основних цифрових платформ у межах проєктного моніторингу.

Функціонально-аналітична побудова цифрового моніторингу в сучасному будівельному середовищі є наслідком глибокої інтеграції інформаційних, облікових і сенсорних технологій, що охоплюють увесь цикл проєктної взаємодії — від передпроєктного планування до завершення будівництва і експлуатації об’єкта. У цій структурі ключову роль відіграє функціональне злиття трьох домінантних класів інструментів: BIM як просторово-інформаційної основи, ERP як обліково-ресурсної архітектури та IoT як сенсорного шару, що пов’язує фізичну реальність із цифровими моделями. Ця тріада інструментів не є окремо функціонуючими блоками, а реалізує синергійну структуру з постійним обміном даними, де кожна зміна на одному рівні автоматично оновлює інші, забезпечуючи цілісність цифрового середовища управління.

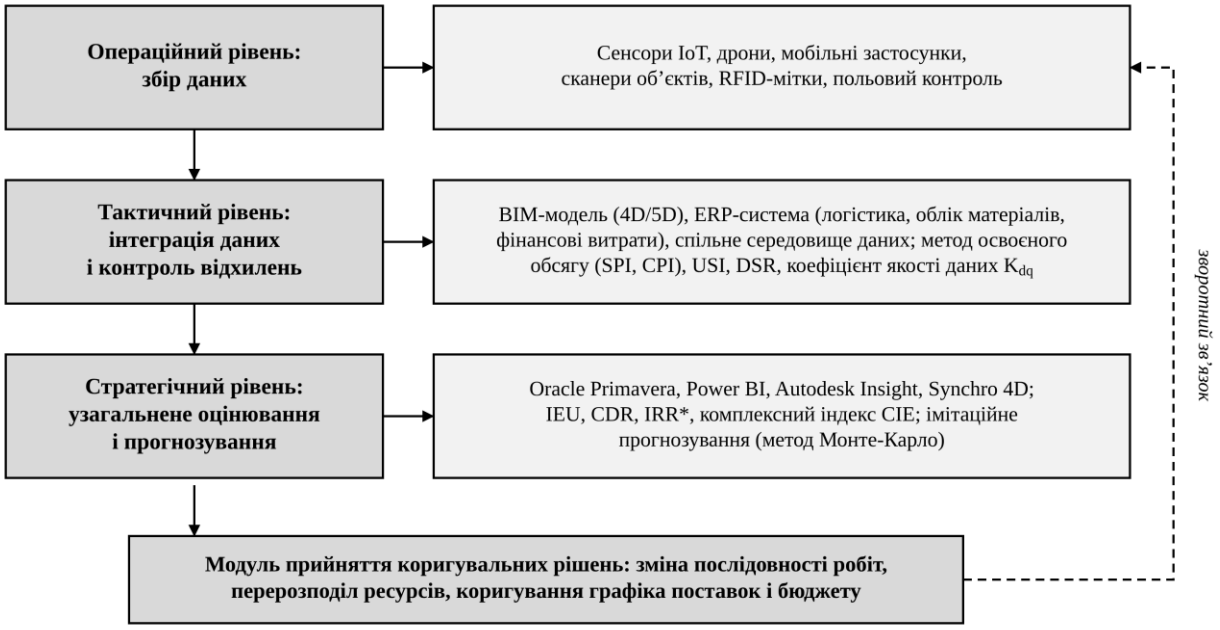


Рис. 2.8. Структурна модель цифрового моніторингу ресурсів і часу в будівельному проєкті *(розроблено автором на основі [5; 59])*

Будівельний проєкт у динаміці проходить десятки циклів змін — від коригування креслень до неочікуваних логістичних перебоїв, змін у нормативному середовищі, раптових коливань цін і форс-мажорів. Саме в таких умовах моніторинг стає не фіксацією, а процесом передбачення і реактивної аналітики. Функціональність систем типу Autodesk BIM 360 або Trimble Quadri полягає не лише у візуалізації конструкцій, а й у можливості зчитувати з моделі часові кластери, накладати на них фактичні показники і прогнозувати потенційні конфлікти між виконавцями або графіками. Наприклад, якщо система виявляє, що етап армування запланований одночасно з електромонтажем у тій самій зоні, вона генерує попередження ще до моменту розгортання робіт. Ці попередження базуються на вбудованих правилах, шаблонах взаємодій, а також розрахунках часу виконання, які у свою чергу залежать від ресурсного навантаження. Поява хмарних сервісів

дала змогу оновлювати ці моделі миттєво для всіх учасників, незалежно від їхнього фізичного розташування [82].

У структурі ERP-систем функціональність реалізується зовсім іншим шляхом — тут головним є нормалізація потоків ресурсів, фінансів, кадрових процесів та контрактних зобов'язань. Наприклад, у системах типу SAP S/4HANA чи Oracle Fusion Cloud кожне переміщення товару фіксується як транзакція, яка формує запис у загальному ланцюгу вартості. Фінансові витрати пов'язуються із закупівлею, остання — із планом постачань, а той — із графіком виконання робіт. Це формує складну карту відповідностей, у якій кожна подія має причинно-наслідкові зв'язки, що виводяться на інтерфейс у вигляді ризиків, затримок або пропозицій оптимізації. Для прикладу, якщо ресурс поставлений із затримкою, то ERP може ініціювати перегляд графіка, надіслати сигнал у BIM-модель і автоматично змінити критичний шлях. Така взаємодія потребує постійної аналітичної перевірки сумісності графіків, ресурсних таблиць та фінансових прогнозів.

IoT-компонента в цій архітектурі виступає гарантом достовірності. У той час як BIM і ERP оперують передусім цифровими відображеннями реальності, саме сенсори надають ці дані в режимі реального часу. Наприклад, сенсор температури може зафіксувати перегрів бетонної суміші, що порушує умови твердіння, а отже система автоматично переносить графік монтажу. GPS-трекери фіксують переміщення будівельної техніки, датчики навантаження реєструють вібраційні коливання, що можуть свідчити про перевантаження. Ці дані агрегуються у хмарні сховища, де піддаються автоматичній валідації і порівнюються з плановими значеннями. Такий рівень верифікації дозволяє уникнути хибної звітності, запізнілого реагування або помилкових рішень [32].

Для кількісного контролю часових і вартісних параметрів на організаційно-технологічному рівні доцільно застосовувати метод освоєного обсягу (Earned Value Management), інтегрований з 4D- і 5D-моделями. Метод оперує трьома базовими величинами: запланованою вартістю робіт на дату

контролю (PV – planned value), освоєним обсягом, тобто кошторисною вартістю фактично виконаних робіт (EV – earned value), і фактичними витратами на їх виконання (AC – actual cost) [59]. У BIM-середовищі величина PV визначається за 4D-моделлю як вартість елементів, монтаж яких запланований до дати контролю, EV – як вартість елементів, що мають статус «змонтовано» за даними польового контролю, а AC – за даними ERP-системи. Індекс виконання строків визначається за формулою:

$$SPI = \frac{EV}{PV}, \qquad (2.14)$$

а індекс виконання вартості – за формулою:

$$CPI = \frac{EV}{AC}, \qquad (2.15)$$

де SPI – індекс виконання строків (schedule performance index); CPI – індекс виконання вартості (cost performance index). Значення SPI < 1 свідчить про відставання від календарного плану, CPI < 1 – про перевищення витрат над кошторисною вартістю виконаних робіт. Поєднання методу освоєного обсягу з 4D-моделлю дає змогу локалізувати відхилення до конкретних конструктивних елементів і захваток та визначити, чи лежать вони на критичному шляху календарного плану, що є підставою для коригувальних організаційно-технологічних рішень – зміни послідовності робіт, перерозподілу бригад і механізмів, коригування графіка поставок. Графічну інтерпретацію показників освоєного обсягу наведено на рис. 2.9.

Таким чином, функціонально-аналітичний огляд інструментарію цифрового моніторингу в системах BIM, ERP і IoT дозволяє зробити висновок, що ефективність сучасного управління базується не на окремих рішеннях, а на їхній здатності працювати в єдиному координаційному середовищі. Цей інструментарій не є усталеним — він постійно змінюється,

адаптується до нових умов, враховує ризики, що виникають у зв'язку з нестабільністю середовища, і формує динамічну аналітичну інфраструктуру, в якій керівне рішення є функцією взаємодії цифрової моделі, реального об'єкта та обчислювального механізму прогнозування.

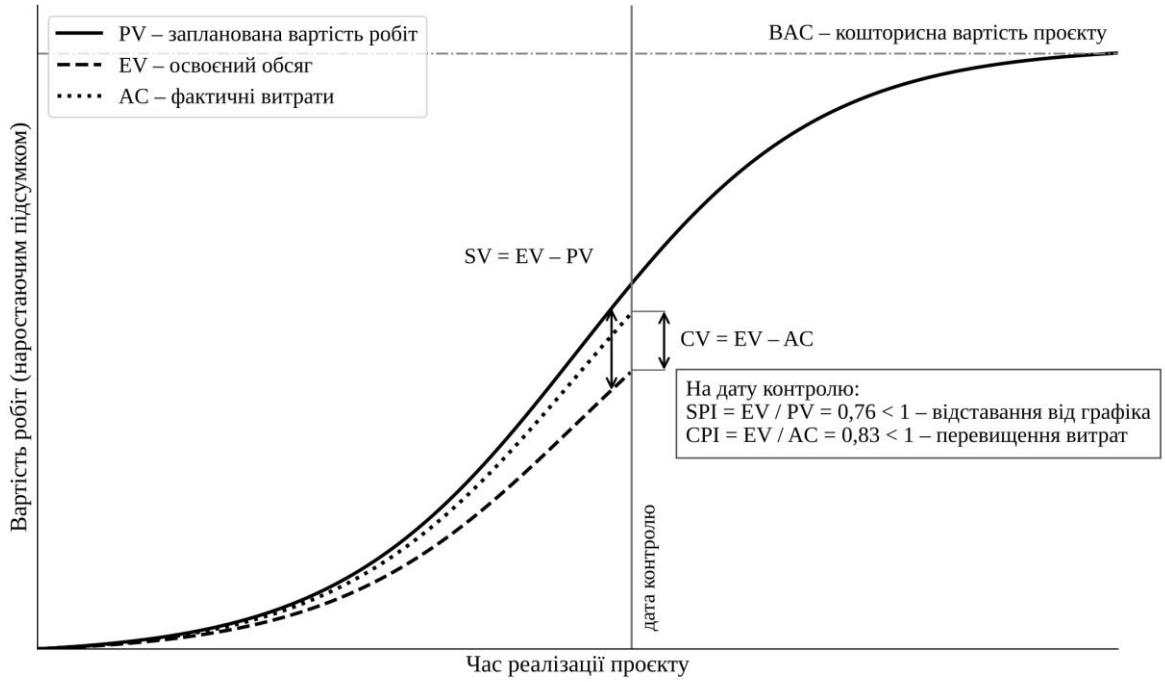


Рис. 2.9. Графічна інтерпретація показників освоєного обсягу в цифровому моніторингу будівельного проєкту *(розроблено автором на основі [59])*

Водночас аналіз архітектури цифрового моніторингу в системах BIM, ERP і IoT окреслює складну багаторівневу взаємодію між просторовими моделями, ресурсним обліком і сенсорними потоками даних, що формує цілісну інформаційно-аналітичну інфраструктуру будівельного управління. Проте однієї фіксації показників, навіть у реальному часі, недостатньо для забезпечення високої адаптивності до зовнішніх ризиків, змін середовища та внутрішньої невизначеності проєктної реалізації. Саме тому в сучасних системах виникає потреба переходу від статичного контролю до динамічного прогнозування. Цей зсув акцентів відкриває новий вимір цифрового

інструментарію — орієнтованого вже не на факт, а на ймовірність. У цьому контексті доцільно перейти до розгляду методів і моделей, які дають змогу прогнозувати і попереджати критичні відхилення, забезпечуючи проактивну логіку прийняття управлінських рішень у будівельному проєкті [32].

Прогнозування та попередження відхилень у процесі управління будівельними проєктами перетворилось на одну з центральних функцій сучасного цифрового моніторингу. У середовищі динамічної проєктної взаємодії, де час і ресурси є змінними з високим ступенем чутливості до зовнішніх впливів, традиційні інструменти обліку вже не здатні забезпечити необхідну передбачуваність. На зміну ретроспективним системам прийшли інтегровані цифрові моделі прогнозування, які використовують штучний інтелект, стохастичні алгоритми, статистичні трендові функції, методи нечіткої логіки, а також симуляційні та агентні підходи. В центрі цього інструментарію лежить здатність обробляти великий масив неоднорідних даних, ідентифікувати закономірності та формувати сценарії, які дозволяють менеджеру ухвалювати рішення ще до виникнення проблеми, тобто переходити від реактивного до проактивного управління.

У фундаменті аналітичного ядра прогнозних систем лежить поняття часово-ресурсної чутливості, яке визначає, наскільки зміна одного з параметрів здатна порушити баланс в іншій частині проєктної системи. З цієї точки зору, важливою є побудова моделей взаємозалежності, де кожен параметр — від обсягу бетону до кількості доступних працівників — має свою функцію впливу на критичний шлях. У системах типу Oracle Primavera P6 або Deltek Acumen Fuse використовуються алгоритми CPM (Critical Path Method), які доповнені модулями статичної оцінки ризиків. Ці системи дозволяють змінювати параметри завдань, тривалості, доступності ресурсів і негайно бачити, як змінюється час завершення проєкту. Проте сучасні інструменти пішли далі — вони не тільки демонструють зміну дати фінішу, а й визначають ймовірність провалу того чи іншого етапу, формують heatmap

ідентифікованих зон ризику і пропонують варіанти їх усунення через сценарії перепланування [66].

Ці сценарії, у свою чергу, базуються на імовірнісних прогнозних моделях, які використовують методи Монте-Карло, логістичні регресії, баєсові мережі та трендові ковзаючі середні. Вони дають змогу здійснювати моделювання не лише одного проєкту, а й усього портфеля, ідентифікуючи закономірності між відхиленнями, наприклад, у матеріальному забезпеченні і кадровій забезпеченості. Прогнозна ефективність таких систем базується на щільності історичних даних — чим більше даних накопичено, тим точнішими стають прогнози. У цій структурі з’являється поняття цифрового “вектору відхилення” — синтезованої метрики, яка одночасно фіксує тренд, прискорення і локальні збурення в часово-ресурсному балансі.

Стохастичні моделі описують накопичення невизначеності в часі: дисперсія прогнозного відхилення тривалості чи вартості зростає під впливом трендового зрушення та випадкових збурень, що дозволяє оцінити ймовірність виходу проєкту за межі допустимого інтервалу. На цьому принципі побудовано модулі раннього попередження в програмних засобах @RISK і RiskyProject [66; 83].

Разом із цим необхідно враховувати й симулятивну складову прогнозування, зокрема агентні моделі, в яких кожен ресурс або виконавець моделюється як окремий агент із власною поведінкою, швидкістю виконання, можливістю взаємодії. Такі системи застосовуються у складних інфраструктурних проєктах, де взаємозалежності між задачами настільки складні, що аналітичне вирішення задачі прогнозування стає неможливим. У таких випадках застосовують імітаційне моделювання в програмних середовищах AnyLogic або FlexSim, що дає змогу відтворити виконання проєкту з урахуванням поведінки виконавців, їх завантаженості та логістичних обмежень. Окрім моделей імовірнісного та агентного типу, важливе значення має використання нейромережевих підходів до прогнозування. Такі моделі здатні виявити складні нелінійні залежності, які

недоступні традиційній регресійній аналітиці. Наприклад, LSTM-моделі, які фіксують довготривалі залежності у часових рядах, застосовуються для прогнозування відхилень у темпах виконання, сезонних зсувів у постачанні або поведінкових змін підрядників. Ці моделі реалізуються через TensorFlow, Keras або PyTorch та інтегруються в аналітичні панелі типу Power BI або Tableau. На їх основі формуються дашборди, які відображають ймовірності порушення KPI, необхідні коригувальні дії та рівень невизначеності [66; 83].

З огляду на складність сучасних проєктних середовищ, прогнозування відхилень перестає бути допоміжною функцією та трансформується у центральний елемент управління ризиками. Для цього використовуються різні типи цифрових моделей, кожна з яких виконує специфічну роль у системі прийняття рішень. Класифікацію таких моделей відповідно до їх методологічної основи, функціонального призначення та практичних реалізацій наведено в табл. 2.3.

Окремої уваги заслуговує взаємодія прогнозних моделей з механізмами прийняття рішень, зокрема в умовах мультиагентного проєктного управління. Коли маємо справу з середовищем, де рішення приймаються різними суб'єктами — підрядниками, інженерами, логістами, інвесторами — важливо враховувати узгодженість їхніх прогнозних моделей. Інакше відхилення буде виникати не через об'єктивні фактори, а через асинхронність інформаційних дій.

Таблиця 2.3.

Класифікація цифрових моделей прогнозування відхилень у будівельних проєктах *(розроблено автором на основі [66])*

Імовірнісні моделі	Метод Монте-Карло, логістична регресія, баєсові мережі, ковзаючі середні	Оцінка ймовірностей ризиків, побудова heatmap, сценарне	@RISK, RiskyProject

		перепланування	
Стохастичні моделі	Моделі накопичення дисперсії прогнозного відхилення з урахуванням тренду та випадкового шуму	Моделювання накопичення ризиків у часі, прогнозування перевищень критичних порогів	Oracle Primavera, Deltek Acumen Fuse
Симуляційні моделі	Агентне моделювання, чисельна інтеграція	Імітація поведінки агентів, врахування взаємодій, логістичних збурень, зміни темпу виконання задач	AnyLogic, FlexSim
Нейромережеві моделі	LSTM, TensorFlow, Keras, PyTorch	Виявлення нелінійних залежностей, прогнозування темпів, сезонних зсувів, поведінкових відхилень	Power BI, Tableau
Гібридна модель	Комбіновані підходи: нейромережі + Монте-Карло, агентні системи + стохастичні алгоритми	Системна інтеграція кількох типів прогнозування, зменшення похибки, підвищення точності сценарного аналізу	IBM Watson, SAP Predictive Analytics

Тому сучасні системи типу BIM Collaborate Pro або Procore Design Coordination включають не лише інструменти прогнозування, а й засоби узгодження планів, контроль версій рішень і перевірки відповідності сценаріїв на стику відповідальності [32]. Структурну логіку взаємодії основних класів цифрових систем – BIM, ERP та IoT – у межах прогнозно-аналітичного інструментарію та місце в ній імовірнісних, стохастичних, симуляційних і нейромережевих моделей наведено на рис. 2.10.

Таким чином, прогнозно-аналітичний інструментарій розкриває інтеграційні зв’язки між математичними основами, цифровими платформами,

механізмами імітаційної логіки та прикладними сценаріями аналітики в проєктному середовищі. Функціональність таких інструментів не тільки дає змогу скоротити втрати, пов’язані з непередбаченими затримками, а й оптимізує розподіл ресурсів, динамізує рішення у реальному часі та створює принципово нову архітектуру управлінської відповідальності, в якій цифровий прогноз — це більше ніж обчислення: це основа стратегічного управління в умовах невизначеності.



Рис. 2.10. Функціональна структура цифрових моделей прогнозування та попередження відхилень у будівельному проєкті *(розроблено автором на основі [66; 83])*

Метод освоєного обсягу та його розширення для оцінювання строків детально розглянуто Ф. Анбарі [33] і М. Ванхуке [103]. Застосування 4D-моделей у будівельних проєктах досліджено Т. Гартманном зі співавторами [60], Б. Ку і М. Фішером [72], автоматизоване формування календарних графіків на основі відкритих BIM-даних – Х. Кімом зі співавторами [71], автоматизований моніторинг фактичного прогресу робіт за фотофіксацією та

IFC-моделями – М. Гольпарвар-Фардом зі співавторами [57]. Підходи до цифрового моніторингу ресурсних і часових параметрів за умов динамічної проєктної взаємодії для вітчизняних будівельних підприємств запропоновано в праці [24].

Результати моніторингу мають бути зведені до узагальненої оцінки, яка дозволяє встановити, чи призводить BIM-коригування до покращення економіко-управлінських характеристик будівельного підприємства. Для цього запропоновано трирівневу систему показників. На операційному рівні використовуються часткові показники – SPI, CPI, USI, K_{dq} та інші KPI, що характеризують продуктивність, витрати, якість, строки та ризики. Для зіставлення показників з різними одиницями виміру їх нормують до шкали [0; 1]: для показників-стимуляторів нормоване значення визначається як відношення різниці між фактичним і мінімальним значеннями до різниці між максимальним і мінімальним значеннями, для показників-дестимуляторів – як відношення різниці між максимальним і фактичним значеннями до того самого розмаху. За двох періодів спостереження таке нормування перетворює показники на значення 0 або 1, тому в цьому разі застосовується нормування відносно найкращого значення в досліджуваній сукупності (формула (3.1)). На інтегруючому рівні нормовані показники зводяться в індекс інтегральної ефективності управління:

$$IEU = \frac{\sum_{i=1}^{n} w_i \cdot KPI_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i}, \qquad (2.16)$$

де KPI_i – нормоване значення і-го часткового показника; w_i – ваговий коефіцієнт і-го показника; n – кількість показників. Індекс змінюється від 0 до 1 і характеризує збалансованість управління за напрямами діяльності.

Другим показником інтегруючого рівня є коефіцієнт цифрової реактивності, що характеризує здатність системи управління своєчасно реагувати на відхилення, виявлені в інформаційній моделі:

$$CDR = \frac{1}{1+e^{k(\Delta T-\theta)}}, \qquad (2.17)$$

де ΔT – часовий лаг між виявленням відхилення в моделі та коригувальною дією, зафіксованою в календарному плані чи ERP-системі, діб; θ – допустима тривалість лагу, встановлена регламентом реагування підприємства, діб; k – коефіцієнт чутливості, що характеризує крутизну зниження реактивності після перевищення допустимого лагу, діб$^{-1}$. Логістична форма функції забезпечує значення CDR, близькі до 1, за ΔT, значно меншого за θ, CDR = 0,5 за ΔT = θ і наближення CDR до 0 за значного перевищення допустимого лагу, що відображає нелінійне зниження ефективності реагування.

На економічному рівні результат BIM-коригування оцінюється інтегрованою рентабельністю управлінських рішень, яку позначено IRR* на відміну від внутрішньої норми дохідності IRR:

$$IRR^* = \frac{(P_{BIM}-C_{BIM})-(P_0-C_0)}{C_{BIM}} \times 100\%, \qquad (2.18)$$

де P_{BIM}, P_0 – дохід (виручка) відповідно після та до впровадження BIM; C_{BIM}, C_0 – сукупні витрати відповідно після та до впровадження BIM, причому C_{BIM} включає витрати на цифрову інфраструктуру. Показник відображає приріст операційного результату, віднесений до витрат з урахуванням цифрової інфраструктури.

Узагальнювальним показником є комплексний індекс ефективності управлінських рішень:

$$CIE = \alpha \cdot IEU + \beta \cdot CDR + \gamma \cdot IRR_n^*, \qquad (2.19)$$

де IRR^*_n – нормоване до шкали [0; 1] значення IRR*; α, β, γ – вагові коефіцієнти складових, α + β + γ = 1. Щоб уникнути суб'єктивності експертних оцінок за наявності ряду спостережень, вагові коефіцієнти w_i та α, β, γ запропоновано визначати методом ентропії, за яким більшу вагу отримують показники з більшою варіацією значень у досліджуваному періоді. Ентропія j-го показника визначається за формулою:

$$E_j = -\frac{1}{ln\, m} \cdot \sum_{i=1}^{m} p_{ij} \cdot ln\, p_{ij}, \qquad (2.20)$$

де m – кількість спостережень (періодів); p_{ij} – частка значення j-го показника в і-му періоді в сумі його значень за всі періоди. Ваговий коефіцієнт показника визначається як:

$$w_j = \frac{1-E_j}{\sum_{j=1}^{k}(1-E_j)}, \qquad (2.21)$$

де k – кількість показників. Достовірність прогнозних оцінок, отриманих на основі системи показників, перевіряється зіставленням прогнозних і фактичних значень за середньою абсолютною відсотковою похибкою:

$$MAPE = \frac{100\%}{n} \cdot \sum_{t=1}^{n} \frac{|A_t - F_t|}{A_t}, \qquad (2.22)$$

де A_t, F_t – відповідно фактичне і прогнозне значення показника в періоді t; n – кількість періодів порівняння. Додатково стійкість результату перевіряється аналізом чутливості комплексного індексу до зміни вагових коефіцієнтів.

Метод ентропії ґрунтується на понятті інформаційної ентропії К. Шеннона [92], а вибір MAPE як метрики точності прогнозу узгоджується з

рекомендаціями Р. Гайндмана і А. Келер щодо порівняння прогнозних моделей [63].

Метод ентропії є інформативним за ряду спостережень достатньої довжини (орієнтовно не менше 5–8 періодів). За двох спостережень частки значень показника визначаються лише відношенням його значень у цих періодах, тому ваговий коефіцієнт є монотонною функцією величини відносної зміни показника і не несе додаткової інформації. У такому разі результат, отриманий з ентропійними ваговими коефіцієнтами, обов'язково зіставляється з результатом за рівних вагових коефіцієнтів, а висновки формулюються з урахуванням обох оцінок.

Отже, інструментарій цифрового моніторингу ресурсних і часових параметрів поєднує збір даних на операційному рівні, їх інтеграцію в BIM- та ERP-середовищах, контроль відхилень методом освоєного обсягу, імовірнісне та імітаційне прогнозування і трирівневу систему показників, що завершується комплексним індексом ефективності управлінських рішень CIE. Визначення вагових коефіцієнтів методом ентропії із зіставленням з рівними ваговими коефіцієнтами та перевірка прогнозів за похибкою MAPE забезпечують відтворюваність оцінок і створюють методичну основу для апробації запропонованого підходу на даних будівельного підприємства.

Висновки до розділу 2

1. Обґрунтовано архітектуру цифрової інфраструктури управління будівельним підприємством з BIM-ядром, яка поєднує геометрично-параметричний, економічний і управлінський контури через API-шар і спільне середовище даних, та систему показників оцінювання її функціонування: ICVI (2.1) і ROIBIM (2.2) – для оцінювання ефекту переходу до цифрової моделі, DCM (2.3), DSR (2.4) і USI (2.5) – для оцінювання узгодженості й синхронізації часових і вартісних параметрів, RCV (2.6) – для ризик-скоригованої вартості етапів, IPI (2.7) – для продуктивності виконання робіт; ці показники використано як показники

контролю етапів дорожньої карти масштабування BIM-підходів (підрозділ 3.3). Порівняльна оцінка методів (ROI, моделі BIM-зрілості, метод освоєного обсягу, системи KPI) показала, що кожен з них характеризує лише окремий аспект ефекту BIM, що обґрунтовує доцільність інтегрального оцінювання.

2. Розроблено механізм аналітичної верифікації BIM-даних, який поєднує організаційну верифікацію за станами інформаційних контейнерів у спільному середовищі даних згідно з ISO 19650, автоматизовану перевірку моделей за правилами з урахуванням класифікації правил за складністю реалізації та ризик-орієнтовану пріоритезацію перевірок на основі показників R_obj, I_eff і S_index (формули (2.9)–(2.13)). Запропоновано коефіцієнт якості даних Kdq (2.8), що агрегує результати перевірок за вимірами повноти, коректності, узгодженості та актуальності і застосовується як критерій придатності даних моделі для розрахунку показників ефективності за наявності первинних даних спільного середовища даних.

3. Сформовано інструментарій цифрового моніторингу ресурсних і часових параметрів, що поєднує збір даних на операційному рівні, їх інтеграцію в BIM- та ERP-середовищах, контроль відхилень методом освоєного обсягу з індексами SPI і CPI (2.14), (2.15), локалізацію відхилень за 4D-моделлю, імовірнісне та імітаційне прогнозування.

4. Запропоновано трирівневу систему показників ефективності управлінських рішень: часткові KPI, нормовані до шкали [0; 1], – індекс інтегральної ефективності управління IEU та коефіцієнт цифрової реактивності CDR у формі логістичної функції часового лагу реагування – інтегрована рентабельність управлінських рішень IRR*, які узагальнюються комплексним індексом CIE. Вагові коефіцієнти визначаються методом ентропії із зіставленням з результатом за рівних вагових коефіцієнтів, а достовірність прогнозів перевіряється метрикою MAPE та аналізом чутливості, що створює методичну основу для апробації на даних будівельного підприємства.

Основні наукові результати розділу 2 опубліковано в працях [15; 24; 26].

РОЗДІЛ 3. АПРОБАЦІЯ І СТРАТЕГІЧНЕ МАСШТАБУВАННЯ BIM ЯК ІНСТРУМЕНТУ ЕКОНОМІКО-ОРГАНІЗАЦІЙНОЇ АДАПТАЦІЇ БУДІВЕЛЬНОГО ПІДПРИЄМСТВА

3.1. Пілотна реалізація BIM-моделі для оцінки економічної ефективності управлінських рішень у будівництві

Базовими параметрами, що визначають ефективність управлінських рішень у BIM-контексті, виступають ключові показники ефективності (KPI), котрі відображають досягнення цільових результатів за критеріями часу, вартості, якості, ризиків та мотивації персоналу. Важливе місце займає коефіцієнт цифрової інтеграції — показник, який характеризує рівень з'єднаності між інформаційними модулями, швидкість обміну даними й ступінь автоматизації процесів. Він визначає, наскільки управлінська система здатна реагувати на зміни в реальному часі. Третім параметром є показники рентабельності, котрі дають змогу перевести цифрові та організаційні переваги в кількісні економічні результати, відображаючи приріст доходу, скорочення непродуктивних витрат і підвищення інвестиційної віддачі. Разом фактори формують інтегровану модель оцінювання ефективності управління, у якій кожен елемент — від достовірності даних до рентабельності рішень — набуває вимірюваного значення в єдиній цифровій системі [36; 41].

Для відображення логіки переходу від аналітичного контролю до комплексного оцінювання управлінських рішень доцільно подати узагальнену схему функціонування оновленої BIM-моделі. Вона демонструє, як у межах цифрового середовища поєднуються три ключові рівні: аналітичний, управлінський та економічний. На аналітичному рівні здійснюється збір і верифікація даних, що надходять із внутрішніх і зовнішніх джерел; управлінський рівень формує рішення на основі інтегрованих KPI і коефіцієнтів цифрової реактивності; економічний рівень

відповідає за обчислення показників ефективності, рентабельності та віддачі від інноваційних впроваджень. Схема узагальнює процес перетворення інформаційних потоків у стратегічно значущі індикатори, котрі потім застосовуються для оцінювання управлінських дій. Вона ілюструє роль зворотного зв'язку — автоматичної корекції параметрів моделі після аналізу результатів у реальному часі, що є одним із ключових принципів цифрової адаптивності. Узагальнену схему наведено на рис. 3.1.

Реалізація розробленої моделі у середовищах Power BI, Autodesk та Navisworks дозволяє забезпечити комплексне поєднання аналітики, візуалізації та управління процесами будівництва на різних рівнях деталізації. У середовищі Autodesk Revit формується базова інформаційна модель об'єкта, котра містить усі просторові, матеріальні та технологічні характеристики, необхідні для подальших аналітичних обчислень. На основі цієї моделі у Navisworks Manage здійснюється інтеграція з календарно-ресурсним плануванням, виявлення колізій і перевірка узгодженості між підрозділами. Далі отримані дані передаються у Power BI, де реалізується аналітична логіка моделі — побудова KPI-панелей, сценарних розрахунків, оцінювання ефективності управлінських рішень та відстеження динаміки показників у реальному часі.

У цьому середовищі модель набуває практичного змісту: кожен управлінський параметр (витрати, терміни, ресурси, якість, ризики) відображається у вигляді інтерактивних індикаторів, що оновлюються автоматично після кожної зміни в BIM-моделі. Користувач може бачити поточний стан виконання робіт, прогнозовану траєкторію ефективності, визначену алгоритмічними формулами. Це дає змогу перейти від статичного звітування до проактивного управління на основі цифрових даних, коли система сама виявляє ризики, пропонує коригування графіка чи оптимізацію витрат.

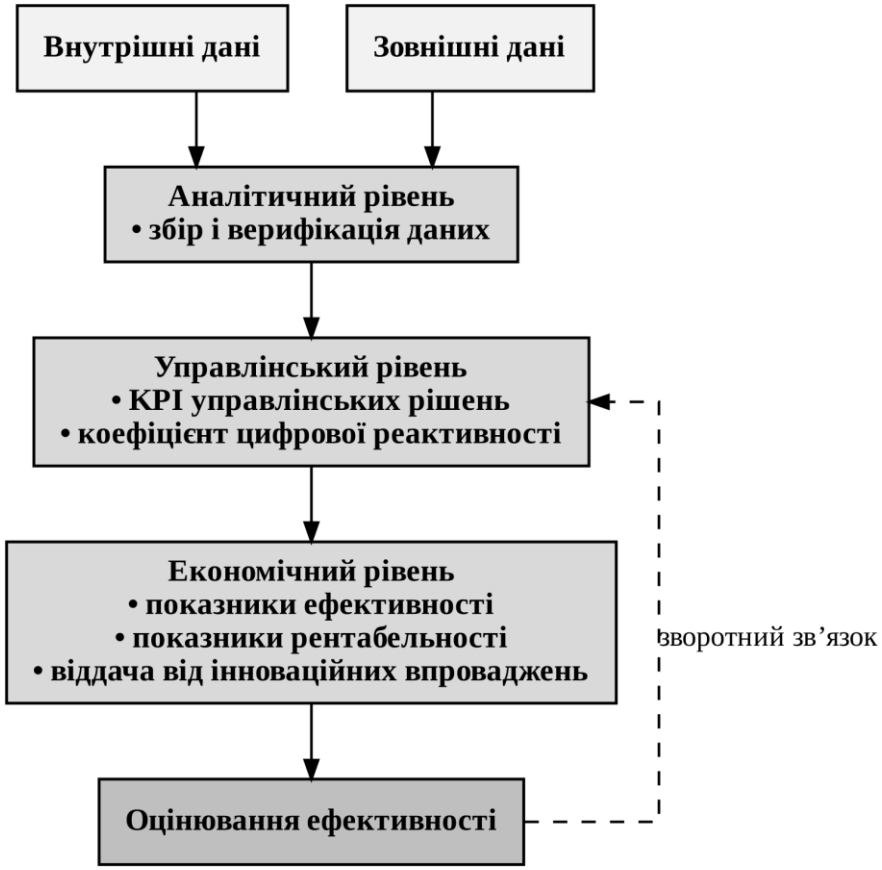


Рис. 3.1. Концептуальна схема побудови оновленої BIM-моделі оцінювання ефективності управлінських рішень *(розроблено автором)*

Апробацію BIM-орієнтованого економіко-управлінського інструментарію проведено на даних ТОВ «Будівельна фірма «Альфа-Сервіс»» (далі – «Альфа-Сервіс») – будівельного підприємства, основним видом економічної діяльності якого є будівництво житлових і нежитлових будівель (КВЕД 41.20) [84]. Інформаційну базу апробації становлять дві групи даних: показники оприлюдненої фінансової звітності підприємства, що характеризують його фінансовий стан до використання інструментарію, та показники результатів використання інструментарію, визначені підприємством за підсумками річної програми виконуваних проєктів і робіт порівняно з попереднім періодом і підтверджені довідкою про впровадження (додаток А).

Фінансовий стан підприємства оцінено за даними фінансової звітності за 2020 р. – останнього звітного періоду, показники якого оприлюднено у відкритих реєстрах [84]. Сукупні витрати визначено як різницю між чистим доходом і чистим фінансовим результатом, власний капітал – як різницю між активами та зобов'язаннями. Вихідні дані та розраховані на їх основі показники наведено в табл. 3.1. Результати використання інструментарію належать до періоду його впровадження, тому сценарний розрахунок економічного ефекту накладає відносні зміни показників на структуру витрат 2020 р., що враховано під час формулювання висновків.

Таблиця 3.1.

Фінансовий профіль «Альфа-Сервіс» за 2020 р. *(розраховано автором за даними [84])*

Показник	Одиниця виміру	Значення
Чистий дохід від реалізації продукції (товарів, робіт, послуг) R_0	тис. грн	8 843,3
Сукупні витрати C_0	тис. грн	8 933,6
Чистий фінансовий результат	тис. грн	−90,3
Активи	тис. грн	69 176,9
Зобов'язання	тис. грн	51 623,8
Власний капітал	тис. грн	17 553,1
Рентабельність продажу	%	−1,02
Рентабельність активів	%	−0,13
Рентабельність власного капіталу	%	−0,51
Коефіцієнт автономії	–	0,254
Коефіцієнт фінансової залежності (зобов'язання / власний капітал)	–	2,94
Коефіцієнт оборотності активів	–	0,128

Підприємство завершило звітний період зі збитком 90,3 тис. грн: сукупні витрати перевищили чистий дохід на 1,02 %. Частка зобов'язань у

джерелах фінансування становить 74,6 %, на кожну гривню власного капіталу припадає 2,94 грн зобов'язань, а коефіцієнт оборотності активів – 0,128, що свідчить про тривалий цикл обороту ресурсів. За такої структури незначне відносне зниження витрат або прискорення обороту ресурсів суттєво змінює фінансовий результат, тому пріоритетними для підприємства є управлінські рішення щодо своєчасного виявлення відхилень, контролю витрат і використання ресурсів, на які спрямований BIM-орієнтований інструментарій. Структуру балансу та показники рентабельності наведено на рис. 3.2.

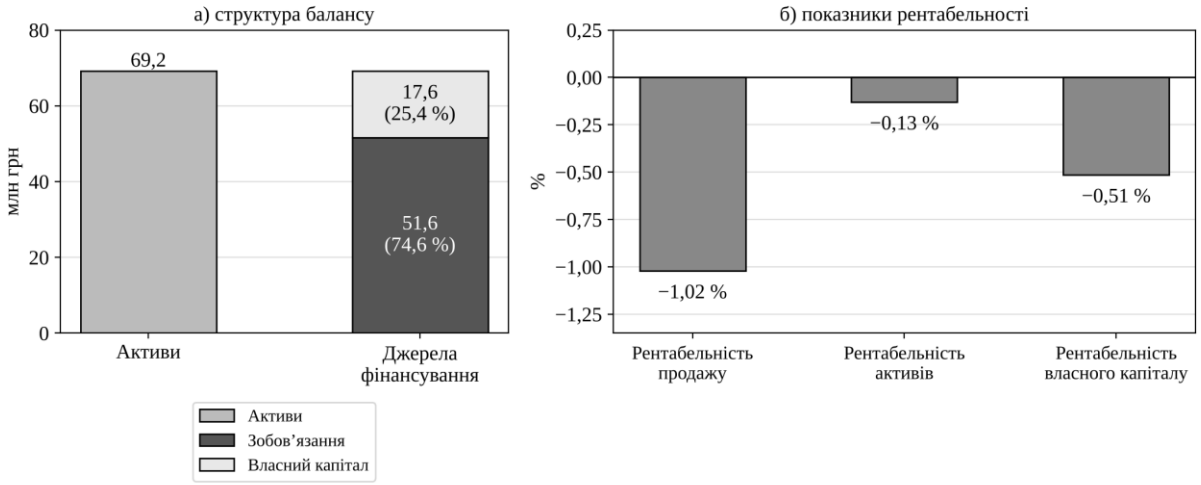


Рис. 3.2. Структура балансу та показники рентабельності «Альфа-Сервіс» за 2020 р. *(розроблено автором за даними [84])*

Результати використання інструментарію підприємство оцінило за сімома частковими показниками, що охоплюють чотири групи економіко-управлінських характеристик: часові (тривалість підготовки управлінських рішень X_1, середній час виявлення критичних відхилень X_3), планові (кількість повторних коригувань календарних і ресурсних планів X_2), витратні (непродуктивні витрати через несвоєчасне коригування ресурсних і календарних параметрів X_4, витрати за групою контрольованих витрат X_5) та

результативні (операційна ефективність виконання робіт X_6, продуктивність використання ресурсів X_7). Показники X_1–X_5 є дестимуляторами, X_6, X_7 – стимуляторами. Значення показників у звітному періоді виражено у відсотках до попереднього (базового) періоду, прийнятого за 100 % (табл. 3.2).

Таблиця 3.2.

Показники результатів використання BIM-орієнтованого інструментарію в «Альфа-Сервіс» *(складено автором за даними підприємства, додаток А)*

Позначення	Показник	Тип показника	Базовий період, %	Звітний період, %	Зміна, %
X_1	Тривалість підготовки управлінських рішень	дестимулятор	100,0	82,4	−17,6
X_2	Кількість повторних коригувань календарних і ресурсних планів	дестимулятор	100,0	85,7	−14,3
X_3	Середній час виявлення критичних відхилень	дестимулятор	100,0	78,5	−21,5
X_4	Непродуктивні витрати через несвоєчасне коригування ресурсних і календарних параметрів	дестимулятор	100,0	90,6	−9,4
X_5	Витрати за групою контрольованих витрат	дестимулятор	100,0	92,2	−7,8
X_6	Операційна ефективність виконання робіт	стимулятор	100,0	108,6	+8,6
X_7	Продуктивність використання ресурсів	стимулятор	100,0	110,2	+10,2

Для двох періодів min–max нормування перетворює кожен показник на значення 0 або 1 і не відображає величини його зміни. Тому часткові показники нормовано відносно найкращого значення в досліджуваній сукупності:

$$r_{ij} = \begin{cases} \frac{x_{ij}}{x_j^{max}}, \text{ для стимуляторів;} \\ \frac{x_j^{min}}{x_{ij}}, \text{ для дестимуляторів} \end{cases}, \qquad (3.1)$$

де r_{ij} – нормоване значення j-го показника в і-му періоді; x_{ij} – значення j-го показника в і-му періоді; x_j^{max}, x_j^{min} – відповідно найбільше та найменше значення j-го показника в досліджуваній сукупності. Нормоване значення дорівнює одиниці в періоді з найкращим значенням показника і є меншим за одиницю в іншому періоді, тому різниця між ними відображає відносну величину зміни показника.

Оскільки у звітному періоді всі часткові показники досягли найкращих значень у досліджуваній сукупності, їх нормовані значення дорівнюють одиниці, а індекс IEU звітного періоду дорівнює 1 за побудовою нормування. Тому приріст індексу визначається як 1 / IEU0 – 1 і характеризує відставання базового періоду від досягнутого рівня.

Вагові коефіцієнти визначено методом ентропії за формулами (2.20) і (2.21) для m = 2 спостережень. Для показника X_3 частки значень становлять p_1 = 100 / (100 + 78,5) = 0,560 і p_2 = 78,5 / 178,5 = 0,440, ентропія – E_3 = 0,98951, ступінь диверсифікації 1 – E_3 = 0,01049, а ваговий коефіцієнт – w_3 = 0,01049 / 0,02737 = 0,3833, де 0,02737 – сума ступенів диверсифікації всіх показників. Результати розрахунку для всіх показників наведено в табл. 3.3, проміжні величини – у додатку В. За двох спостережень частки p1j і p2j визначаються лише відношенням значень показника у двох періодах, тому порядок вагових коефіцієнтів (X3 > X1 > X2 > X4 > X7 > X6 > X5) відтворює порядок величин відносної зміни показників. З огляду на це результат за

ентропійними ваговими коефіцієнтами зіставлено з результатом за рівних вагових коефіцієнтів. Отже, ваговий коефіцієнт 0,3833 показника X3 означає, що цей показник змінився найбільше (на 21,5 %), а не те, що він є найінформативнішим.

Таблиця 3.3.

Ентропія, вагові коефіцієнти та нормовані значення часткових показників «Альфа-Сервіс» у базовому періоді *(розраховано автором)*

Показник	E_j	$1 - E_j$	w_j	r_{0j}	$w_j \cdot r_{0j}$
X_1	0,99327	0,00673	0,2458	0,824	0,2025
X_2	0,99572	0,00428	0,1565	0,857	0,1341
X_3	0,98951	0,01049	0,3833	0,785	0,3009
X_4	0,99824	0,00176	0,0641	0,906	0,0581
X_5	0,99881	0,00119	0,0434	0,922	0,0400
X_6	0,99877	0,00123	0,0448	0,921	0,0413
X_7	0,99830	0,00170	0,0621	0,907	0,0563
Разом	–	0,02737	1,0000	–	0,833

За формулою (2.16) індекс інтегральної ефективності управління базового періоду дорівнює сумі добутків вагових коефіцієнтів на нормовані значення показників: IEU_0 = 0,2025 + 0,1341 + 0,3009 + 0,0581 + 0,0400 + 0,0413 + 0,0563 = 0,833. У звітному періоді всі показники досягають найкращих значень, тому IEU1 = 1,000 за побудовою нормування. Це значення не залежить ні від вагових коефіцієнтів, ні від величини змін, тому за двох періодів індекс IEU є формою агрегування семи відносних змін і не несе інформації понад них; як вимірювальний інструмент нормування відносно найкращого значення стає змістовним за ряду щонайменше з трьох періодів або за зовнішнього (галузевого чи нормативного) еталона. Приріст індексу становить 0,167, або 20,0 % від рівня базового періоду. Найбільші вагові коефіцієнти отримали показники часової групи – середній час виявлення критичних відхилень (w_3 = 0,3833) і тривалість підготовки

управлінських рішень (w_1 = 0,2458), зміна яких була найбільшою; на ці два показники припадає 75,4 % приросту IEU. За рівних вагових коефіцієнтів (wj = 1/7) IEU базового періоду становить 0,875, приріст індексу – 14,3 %, частка часових показників у прирості – 44,5 %, планових – 16,3 %, витратних і результативних – по 19,6 %. Отже, за обох способів зважування найбільший внесок у приріст забезпечують часові показники, а величина приросту становить 14,3–20,0 % залежно від способу зважування. Нормовані значення показників наведено на рис. 3.3, вагові коефіцієнти та внески показників у приріст індексу – на рис. 3.4.

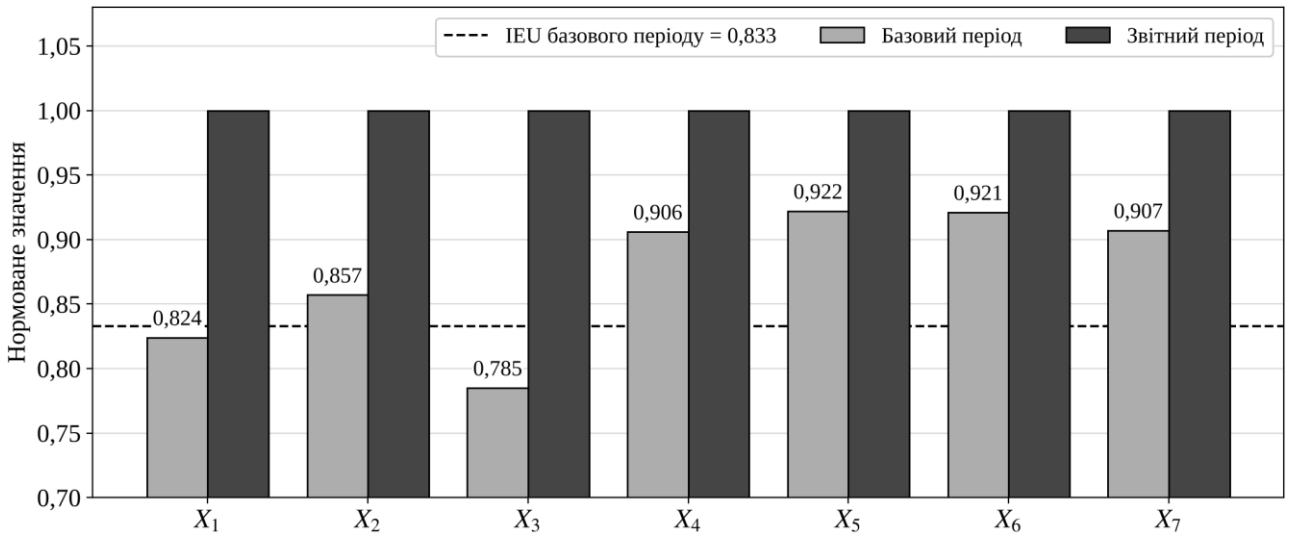


Рис. 3.3. Нормовані значення часткових показників «Альфа-Сервіс» у базовому та звітному періодах *(розроблено автором)*

Складові IRR* і CIE комплексної оцінки потребують зіставлення доходів і витрат після використання інструментарію з урахуванням витрат на цифрову інфраструктуру, а коефіцієнт CDR – реєстрації часових лагів реагування в днях. Підприємство зафіксувало відносні зміни цих характеристик, тому цифрову реактивність оцінено через скорочення лагу

реагування, а економічний ефект – сценарним розрахунком на основі фінансового профілю підприємства.

Архітектуру пілотної реалізації моделі в BIM-середовищі наведено на рис. 3.5.

Архітектура пілотної реалізації відображає системний підхід до побудови цифрової моделі управління, де BIM виступає базовим середовищем інтеграції аналітичних, технологічних та економічних процесів, забезпечуючи цілісність і узгодженість усіх рівнів управління.

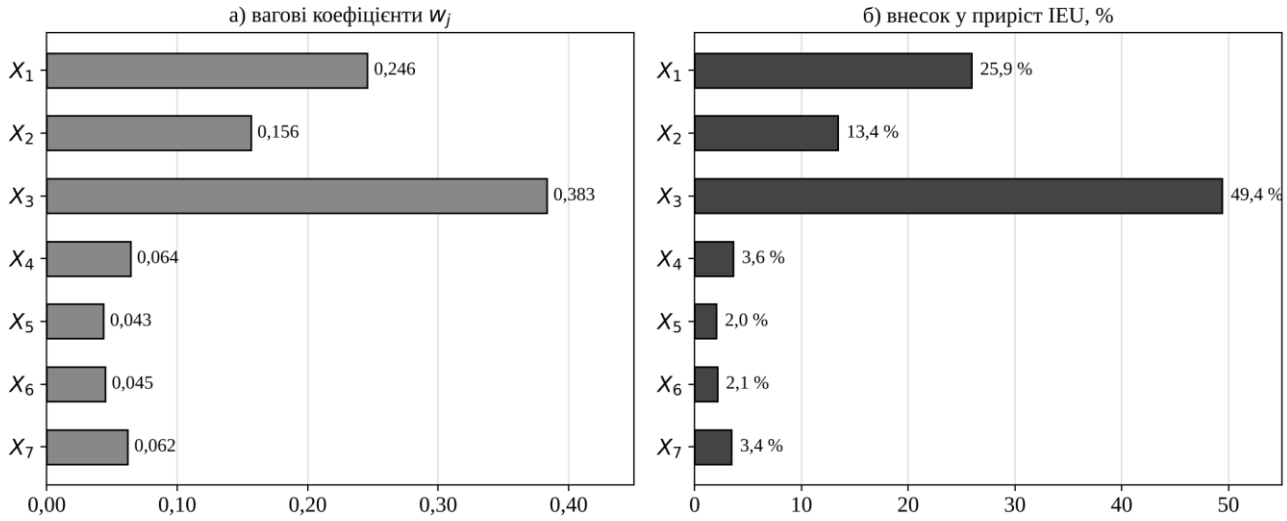


Рис. 3.4. Вагові коефіцієнти часткових показників і їх внесок у приріст індексу IEU «Альфа-Сервіс» *(розроблено автором)*

Отримані результати узгоджуються з висновками емпіричних досліджень, за якими ефекти BIM найчастіше проявляються у скороченні строків, зниженні та контролі витрат [36; 41]. Водночас розподіл вагових коефіцієнтів показує, що для підприємства з від'ємною рентабельністю і високою часткою позикового капіталу первинний ефект BIM-орієнтованого інструментарію має інформаційно-часовий характер: найсуттєвіше змінюються швидкість виявлення відхилень і підготовки управлінських

рішень, тоді як витратні та результативні показники змінюються зі значно меншою амплітудою.

Отже, апробація інструментарію на даних «Альфа-Сервіс» підтвердила можливість кількісного оцінювання результатів BIM-коригування економіко-управлінських характеристик будівельного підприємства за наскрізною процедурою: фінансовий профіль підприємства – часткові показники результатів – нормування відносно найкращого значення – вагові коефіцієнти за методом ентропії – індекс IEU. Приріст IEU на 14,3–20,0 % залежно від способу зважування сформовано переважно за рахунок часових показників (44,5–75,4 % приросту), що визначає подальшу діагностику показників і сценарний аналіз економічного ефекту.

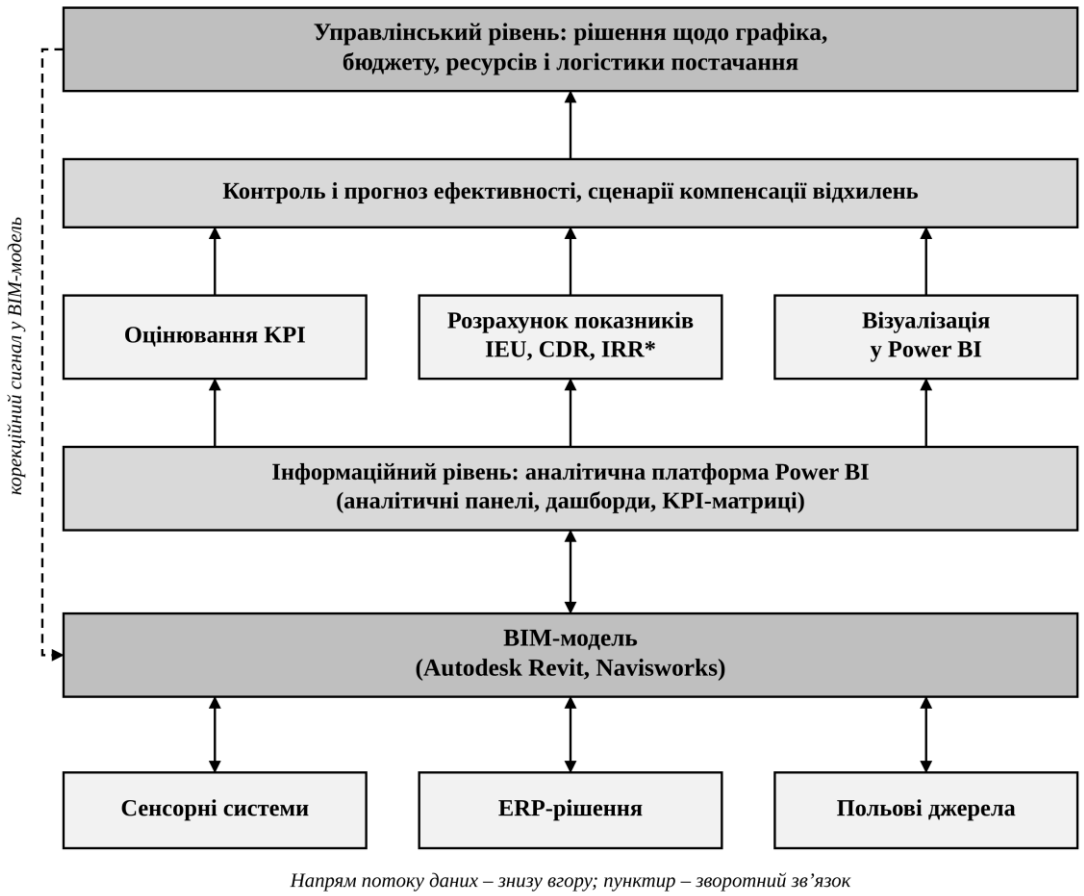


Рис. 3.5. Архітектура пілотної реалізації моделі в BIM-середовищі *(розроблено автором)*

3.2. Діагностика показників ефективності на основі ключових KPI і сценарного аналізу в умовах BIM-впровадження

У структурі будівельного підприємства KPI розподіляються за шістьма головними напрямами. Перший — продуктивність, що вимірює співвідношення обсягів виконаних робіт до запланованих у часі й ресурсах. У BIM-контексті показник формується автоматично шляхом порівняння запланованих елементів моделі з фактичним станом виконання у Navisworks чи Synchro 4D. Другий напрям — витрати, котрі розраховуються через ERP-модулі і синхронізуються з елементами моделі у Revit, дозволяючи зіставити фінансові відхилення із фізичним прогресом. Третій — якість, що визначається кількістю допущених дефектів, відсотком повторного виконання робіт або відповідністю нормативам у середовищі перевірки моделей. Четвертий — час, котрий відображає дотримання графіка реалізації будівництва, включаючи лаги між плановими та фактичними подіями, зафіксовані у цифровому календарі BIM. П’ятий напрям — ризики, котрі оцінюються аналітичними інструментами Power BI на основі сценарного аналізу й симуляції можливих відхилень. Шостий показник — рентабельність, котрий відображає економічну віддачу від управлінських рішень і безпосередньо пов’язаний із ефектом цифрової інтеграції.

Всі показники взаємопов’язані через аналітичну платформу Power BI, котра виконує функцію центрального вузла обробки даних у цифровому середовищі компанії. Дані з BIM-моделі, ERP і польових сенсорних систем автоматично надходять до Power BI, де створюються аналітичні панелі, дашборди та KPI-матриці. Реалізовано принцип двостороннього зв’язку: зміна параметрів у моделі викликає оновлення відповідних KPI, а зміна аналітичного порогу KPI, у свою чергу, генерує корекційний сигнал у BIM для перегляду графіка чи бюджету. При зниженні продуктивності система автоматично формує попередження у Revit про можливу затримку виконання

робіт, а аналітична панель у Power BI пропонує сценарії компенсації — збільшення змінності, перерозподіл ресурсів або зміни логістики постачання.

Синхронізація BIM і Power BI забезпечується через API-інтерфейси та спільні бази даних, де кожен елемент моделі містить свій унікальний ідентифікатор, пов’язаний із відповідним аналітичним показником. Це дає змогу в реальному часі оцінювати відхилення між планом і фактом, створюючи повну картину ефективності управлінських рішень. Завдяки цьому будівельне підприємство переходить від ретроспективного аналізу до прогнозно-аналітичного управління, де KPI використовуються не лише як індикатори, а й як параметри управління цифровою моделлю.

У результаті формується інтегрована KPI-система, у якій кожен показник зважується за ступенем його впливу на загальну ефективність управління. Підхід дозволяє порівнювати проєкти між собою, формувати динамічний рейтинг показників усередині одного проєкту, що значно спрощує ухвалення рішень. Для забезпечення узгодженості даних усі показники нормуються до шкали [0; 1] за правилом, наведеним для індексу інтегральної ефективності управління IEU.

Логіку формування та функціонування системи ключових показників ефективності в цифровому середовищі будівельного підприємства, яка забезпечує діагностику ефективності управлінських рішень у BIM-орієнтованій аналітичному середовищі, наведено на рис. 3.6. У цій системі всі дані — від виробничих параметрів до фінансових результатів — проходять багаторівневу обробку, що забезпечує їх перетворення з первинної інформації у стратегічні управлінські індикатори.

У практиці будівельного підприємства KPI реалізуються як взаємопов’язана мережа параметрів, що відображають операційну продуктивність, рівень використання ресурсів, відхилення від графіка, частоту ризикових подій і фінансову віддачу від ухвалених рішень. У цьому контексті система KPI задає орієнтири, що спрямовують цифрову модель на

оптимальне поєднання трьох критичних складових: результативності, стабільності та рентабельності.



Рис. 3.6. Схема діагностичної системи KPI у BIM-аналітичному середовищі *(розроблено автором)*

Аналітичні модулі Power BI в режимі реального часу зіставляють заплановані та фактичні значення KPI, визначаючи поточний рівень ефективності, швидкість наближення до стратегічних орієнтирів. Це дозволяє керівництву бачити не ізольовані цифри, а загальну траєкторію розвитку — стабільно система рухається до підвищення інтегрального індексу ефективності IEU чи приросту рентабельності IRR*.

Важливо, що у цифровому середовищі BIM KPI взаємодіють із часовими імовірнісними моделями, тобто з так званими сценарними

параметрами, які описують можливі варіанти розвитку подій. Це відкриває можливість переходу від лінійної оцінки до сценарного аналізу, коли ефективність управлінських рішень оцінюється не за одним показником, а за системою взаємопов'язаних KPI у межах декількох сценаріїв — оптимістичного, реалістичного та песимістичного. Компанія може констатувати поточний рівень ефективності, моделювати, як зміняться результати у разі змін зовнішніх факторів, затримок або перерозподілу ресурсів.

Діагностику показників ефективності «Альфа-Сервіс» виконано за коефіцієнтом зміни, який для кожного часткового показника визначається за формулою:

$$D_X = \frac{X_t - X_{t-1}}{X_{t-1}} \times 100\%, \qquad (3.2)$$

де X_t, X_{t-1} – значення показника відповідно у звітному періоді, в якому використовувався інструментарій, та в попередньому (базовому) періоді. Результати розрахунку за групами показників наведено в табл. 3.4.

Таблиця 3.4.

Коефіцієнти зміни часткових показників «Альфа-Сервіс» за групами

(розраховано автором за даними підприємства)

Група показників	Показник	D_X, %	Середнє значення модуля D_X за групою, %
Часові	X_1 – тривалість підготовки управлінських рішень	−17,6	19,55
	X_3 – середній час виявлення критичних відхилень	−21,5	
Планові	X_2 – кількість повторних коригувань	−14,3	14,30

Група показників	Показник	D_X, %	Середнє значення модуля D_X за групою, %
	календарних і ресурсних планів		
Витратні	X_4 – непродуктивні витрати через несвоєчасне коригування ресурсних і календарних параметрів	−9,4	8,60
	X_5 – витрати за групою контрольованих витрат	−7,8	
Результативні	X_6 – операційна ефективність виконання робіт	+8,6	9,40
	X_7 – продуктивність використання ресурсів	+10,2	

Усі сім показників змінилися у сприятливому напрямі, однак амплітуда змін неоднакова за групами. Найбільшими є зміни часових показників (у середньому 19,55 %), далі – планових (14,3 %), результативних (9,4 %) і витратних (8,6 %). Така послідовність узгоджується з припущенням про послідовне передавання ефекту BIM-коригування: інформаційна модель насамперед скорочує час виявлення відхилень і підготовки рішень, це зменшує кількість повторних коригувань календарних і ресурсних планів, а через них – непродуктивні витрати та втрати ресурсів. Відношення середньої зміни витратних показників до середньої зміни часових становить 8,6 / 19,55 = 0,44, тобто на одиницю відносного скорочення часових показників припадає 0,44 одиниці відносного зниження витратних показників. Коефіцієнти зміни часткових показників наведено на рис. 3.7. Оскільки цей висновок ґрунтується на даних одного підприємства за два періоди, він має характер припущення, перевірка причинно-наслідкового зв’язку потребує часових рядів показників.

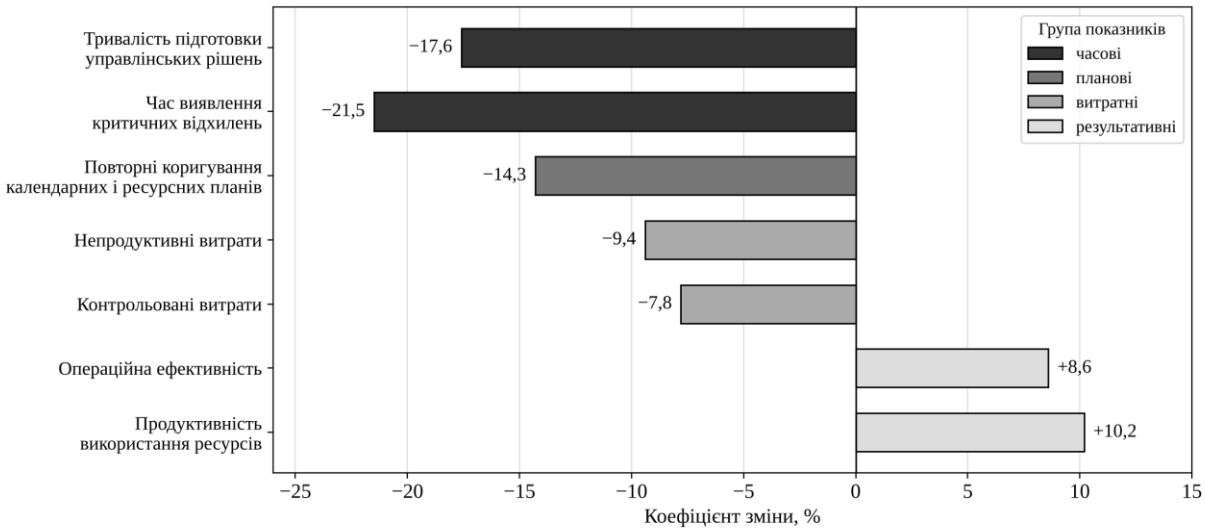


Рис. 3.7. Коефіцієнти зміни часткових показників «Альфа-Сервіс» *(розроблено автором)*

Для оцінювання впливу вагових коефіцієнтів на інтегральну оцінку проведено аналіз чутливості. Зміна кожного вагового коефіцієнта w_j на ±20 % з подальшим приведенням суми ваг до одиниці змінює IEU базового періоду в межах від 0,830 до 0,837; найбільший вплив має ваговий коефіцієнт показника X_3, для інших показників відхилення не перевищують 0,001. Мала чутливість пояснюється тим, що нормовані значення всіх показників базового періоду лежать у вузькому діапазоні 0,785–0,922, тому за будь-яких вагових коефіцієнтів зважене середнє змінюється незначно; отже, вона свідчить не про стійкість оцінки, а про малу роль зважування за цих даних. За рівних вагових коефіцієнтів (w_j = 1/7) IEU базового періоду становить 0,875, а приріст індексу у звітному періоді – 14,3 %. Отже, напрям зміни інтегральної оцінки не залежить від способу визначення вагових коефіцієнтів, тоді як її величина залежить істотно: за рівних вагових коефіцієнтів приріст індексу на 5,7 відсоткового пункту менший, ніж за ентропійних, оскільки метод ентропії за двох спостережень надає більшої ваги показникам з найбільшою зміною (рис. 3.8, додаток Г). Тому результат подано діапазоном 14,3–20,0 %.

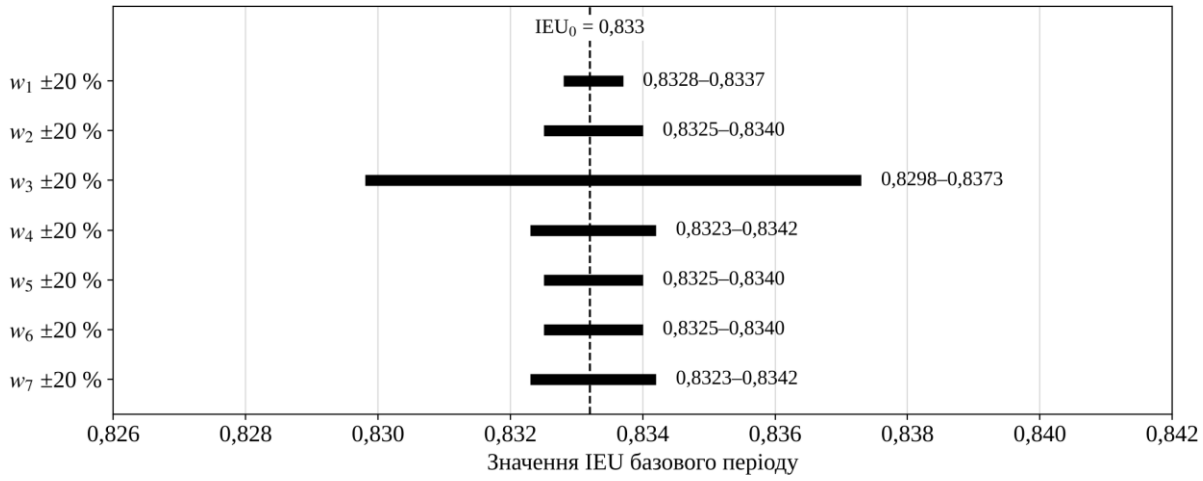


Рис. 3.8. Чутливість індексу IEU базового періоду до зміни вагових коефіцієнтів *(розроблено автором)*

Коефіцієнт цифрової реактивності CDR за формулою (2.17) залежить від часового лагу ΔT між виявленням відхилення в інформаційній моделі та коригувальною дією. Цей лаг складається з часу виявлення відхилення та часу підготовки управлінського рішення, тому його відносне скорочення визначається за формулою:

$$\delta_{\Delta T} = \varphi \cdot |D_{\text{в}}| + (1 - \varphi) \cdot |D_{\text{п}}|, \qquad (3.3)$$

де $\delta_{\Delta T}$ – відносне скорочення лагу реагування; φ – частка часу виявлення відхилення в тривалості лагу реагування; $D_{\text{в}}$, $D_{\text{п}}$ – коефіцієнти зміни, розраховані за формулою (3.2), відповідно для середнього часу виявлення критичних відхилень і тривалості підготовки управлінських рішень.

За $D_{\text{в}}$ = –21,5 % і $D_{\text{п}}$ = –17,6 % скорочення лагу реагування за формулою (3.3) становить від 17,6 % (φ = 0) до 21,5 % (φ = 1), а за рівних частин обох складових (φ = 0,5) – 19,55 % (рис. 3.9). Отже, незалежно від структури лагу його тривалість скоротилася не менше ніж на 17,6 %. Цей

результат є комбінацією двох наведених вище коефіцієнтів зміни і характеризує напрям зміни лагу реагування. Оскільки CDR за формулою (2.17) зростає зі скороченням ΔT за незмінних допустимої тривалості лагу θ і коефіцієнта чутливості k, скорочення лагу свідчить про зростання цифрової реактивності, однак абсолютне значення CDR не визначалося. Розрахунок абсолютного значення CDR потребує реєстрації дат виявлення відхилень і коригувальних дій у спільному середовищі даних і календарних планах, що є передумовою використання CDR як критерію переходу між етапами дорожньої карти масштабування BIM-підходів.

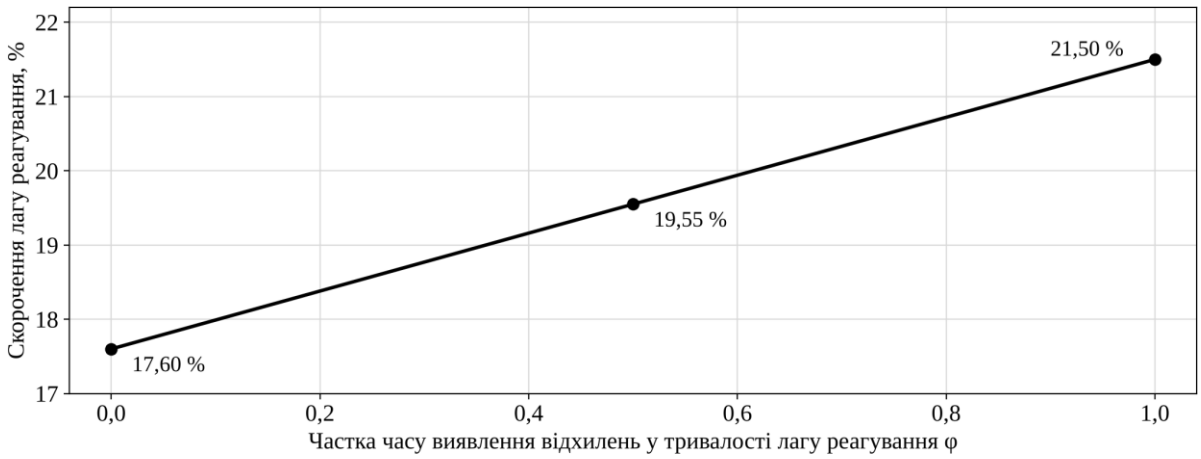


Рис. 3.9. Залежність скорочення лагу реагування «Альфа-Сервіс» від частки часу виявлення відхилень *(розроблено автором)*

Розраховані показники використовуються в алгоритмі цифрової діагностики ефективності управлінських рішень, який поєднує аналітичний і управлінський контури (рис. 3.10). Аналітичний контур охоплює формування цифрової бази даних з BIM-моделі, ERP-системи та облікових даних, приведення показників до зіставного вигляду за формулою (3.1), розрахунок інтегральних оцінок за формулами (2.16)–(2.19) і моделювання сценаріїв управлінських дій. Управлінський контур включає прогнозування результатів за сценаріями, виявлення відхилень від цільових значень, вибір варіанта

управлінського реагування та оновлення показників за фактичними даними, після чого цикл повторюється з оновленою базою даних.

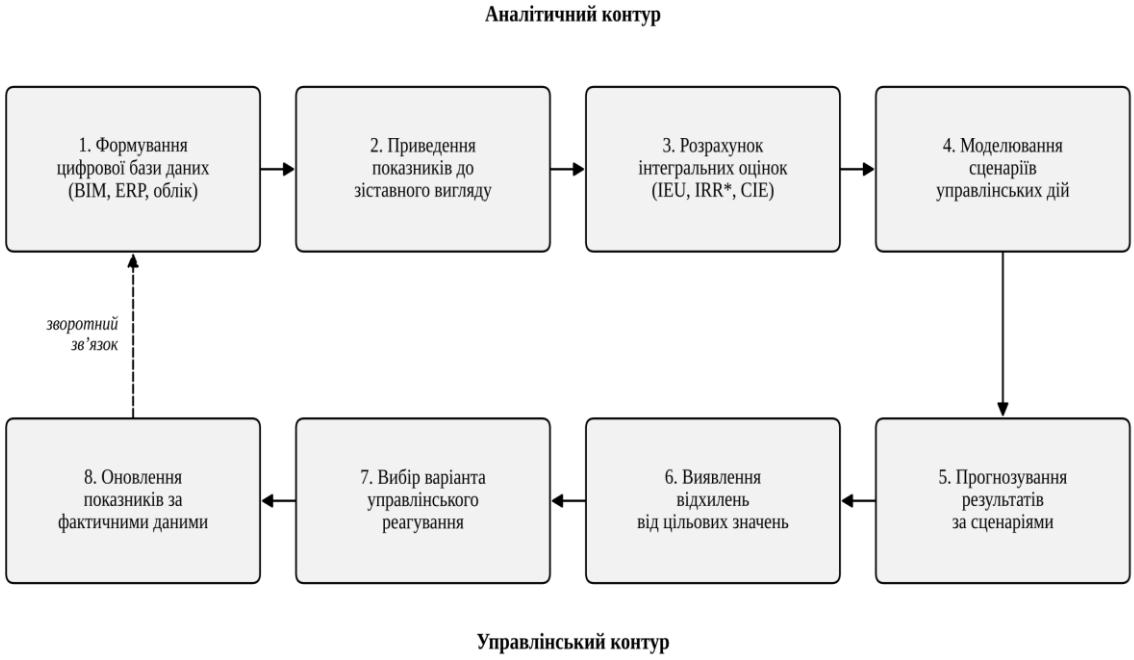


Рис. 3.10. Алгоритм цифрової діагностики ефективності управлінських рішень *(розроблено автором)*

На відміну від періодичного звітування, алгоритм формує управлінську інформацію в процесі виконання робіт, а не після завершення їх етапів. В «Альфа-Сервіс» його застосовано до проблемних ділянок проєктів: для кожної з них розглядалося декілька варіантів подальших дій з оцінюванням їх впливу на строки, ресурси та витрати, а дані BIM-моделі перед розрахунками перевірялися на повноту, актуальність і узгодженість з ризик-орієнтованим визначенням пріоритетності перевірок за формулами (2.9)–(2.13) відповідно до механізму аналітичної верифікації BIM-даних.

Взаємозв'язок часткових показників, інтегрованої рентабельності IRR* та комплексного індексу CIE у BIM-аналітичному середовищі наведено на рис. 3.11.

Економічний ефект зниження контрольованих витрат оцінено на основі фінансового профілю підприємства (табл. 3.1). Приріст економічного ефекту визначено за формулою:

$$\Delta E = (R_{BIM} - R_0) - (C_{BIM} - C_0), \quad (3.4)$$

де R_{BIM}, R_0 – чистий дохід відповідно після та до використання інструментарію; C_{BIM}, C_0 – сукупні витрати відповідно після та до використання інструментарію. Сукупні витрати після використання інструментарію визначено за формулою:

$$C_{BIM} = C_0 \cdot (1 - e_к \cdot s), \quad (3.5)$$

де $e_к$ – відносна економія за групою контрольованих витрат, що за даними підприємства становить 0,078; s – частка контрольованих витрат у сукупних витратах підприємства. Сукупні витрати за сценаріями розраховано за формулою (3.5), а приріст економічного ефекту – за формулою (3.4).

Частка контрольованих витрат у фінансовій звітності не розкривається, тому її використано як параметр сценаріїв: песимістичного (s = 0,25), базового (s = 0,50) та оптимістичного (s = 0,75). Ці значення відповідають чвертям можливого діапазону частки і не ґрунтуються на фактичній структурі витрат підприємства, яка в оприлюдненій звітності не розкривається; тому результати є умовними щодо цього параметра, а наведене нижче граничне значення s* дає змогу оцінити ефект за будь-якого фактичного значення частки. Чистий дохід у всіх сценаріях дорівнює значенню базового періоду ($R_{BIM} = R_0$), тобто ефекти зростання продуктивності використання ресурсів (10,2 %) та операційної ефективності (8,6 %) у розрахунку не враховано, і отримані оцінки є нижньою межею економічного ефекту. Отже, приріст економічного ефекту є лінійною функцією частки контрольованих витрат ΔE = C0 · s · ек, а сценарії розрізняються лише значенням s, тому результати табл. 3.5 мають характер

розрахункової оцінки за трьома значеннями цього параметра. Результати розрахунку наведено в табл. 3.5.

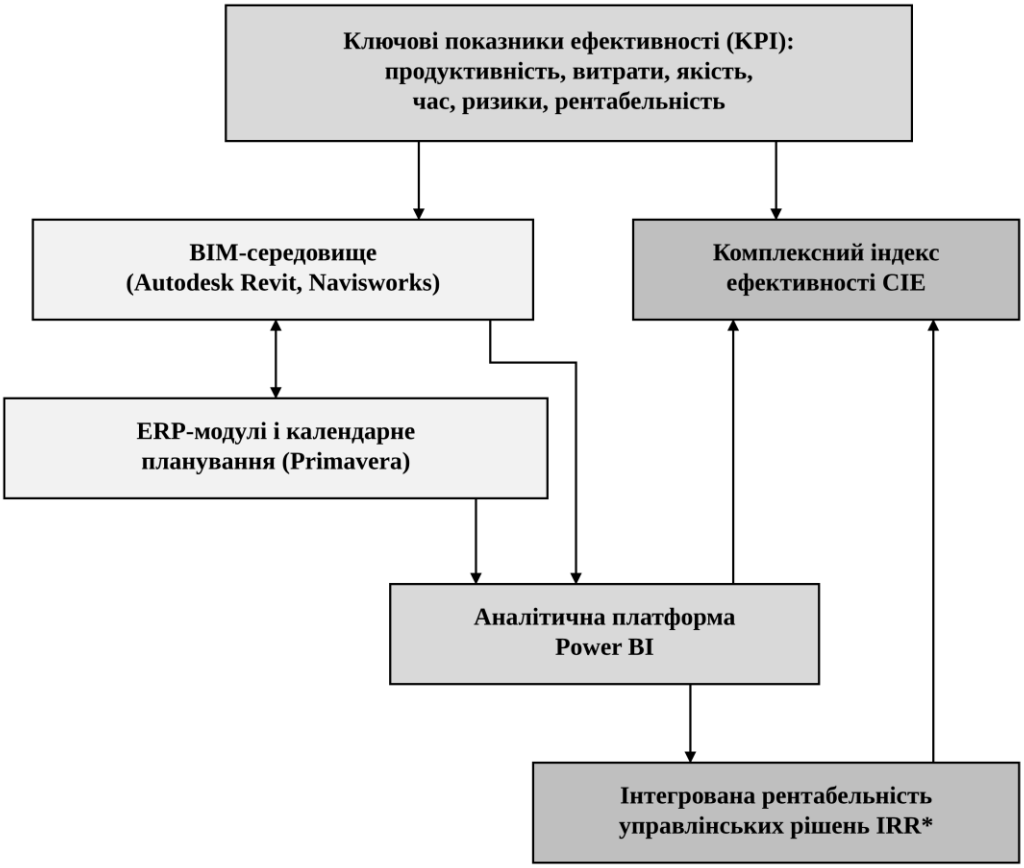


Рис. 3.11. Модель інтегрованої взаємодії KPI, IRR* та CIE у BIM-аналітичному середовищі *(розроблено автором)*

Навіть за песимістичним сценарієм економія контрольованих витрат переводить підприємство зі збиткової діяльності в прибуткову: чистий фінансовий результат становить 83,9 тис. грн, рентабельність продажу – 0,95 %. За базовим сценарієм приріст економічного ефекту становить 348,4 тис. грн, рентабельність продажу – 2,92 %, за оптимістичним – відповідно 522,6 тис. грн і 4,89 %. Беззбитковість досягається, якщо частка контрольованих витрат перевищує $s^* = 90{,}3 / (0{,}078 \cdot 8\,933{,}6) = 0{,}130$, тобто 13,0 % сукупних витрат. Оскільки відносна економія ек = 7,8 % належить до періоду

використання інструментарію, а сукупні витрати – до 2020 р., розрахунок поєднує величини різних періодів і характеризує умовний масштаб ефекту, а не його фактичне значення; уточнення потребує фінансової звітності підприємства за період використання інструментарію.

Інтегровану рентабельність управлінських рішень IRR* за формулою (2.18) без урахування витрат на цифрову інфраструктуру визначено як відношення приросту економічного ефекту до сукупних витрат після використання інструментарію; вона становить 1,99 % за песимістичним, 4,06 % за базовим і 6,21 % за оптимістичним сценарієм. З урахуванням річних витрат на цифрову інфраструктуру I показник набуває вигляду $IRR^* = (\Delta E - I) / (C_{BIM} + I) \cdot 100\ \%$ і залишається додатним, доки $I < \Delta E$. Тому приріст економічного ефекту визначає граничний річний обсяг витрат на цифрову інфраструктуру I_{max}, за якого використання інструментарію економічно виправдане: 174,2 тис. грн за песимістичним, 348,4 тис. грн за базовим і 522,6 тис. грн за оптимістичним сценарієм.

Таблиця 3.5.

Сценарний розрахунок економічного ефекту використання інструментарію в «Альфа-Сервіс» *(розраховано автором)*

Показник	Вихідний стан (2020 р.)	Песимістичний сценарій	Базовий сценарій	Оптимістичний сценарій
Частка контрольованих витрат s	–	0,25	0,50	0,75
Сукупні витрати, тис. грн	8 933,6	8 759,4	8 585,2	8 411,0
Приріст економічного ефекту ΔE, тис. грн	–	174,2	348,4	522,6
Чистий фінансовий результат, тис. грн	−90,3	83,9	258,1	432,3
Рентабельність продажу, %	−1,02	0,95	2,92	4,89
Рентабельність активів, %	−0,13	0,12	0,37	0,62

Показник	Вихідний стан (2020 р.)	Песимістичний сценарій	Базовий сценарій	Оптимістичний сценарій
Рентабельність власного капіталу, %	−0,51	0,48	1,47	2,46
IRR* без урахування витрат на цифрову інфраструктуру, %	–	1,99	4,06	6,21
Граничні річні витрати на цифрову інфраструктуру I_{max}, тис. грн	–	174,2	348,4	522,6

За визначенням Imax дорівнює ΔE: це витрати на цифрову інфраструктуру, за яких показник віддачі від інвестицій у BIM за формулою (2.2) дорівнює нулю, тобто приріст операційного результату повністю поглинається витратами на цифрову інфраструктуру. Ці значення є орієнтиром для планування бюджету цифрової трансформації підприємства. Сценарні значення чистого фінансового результату та рентабельності продажу наведено на рис. 3.12.

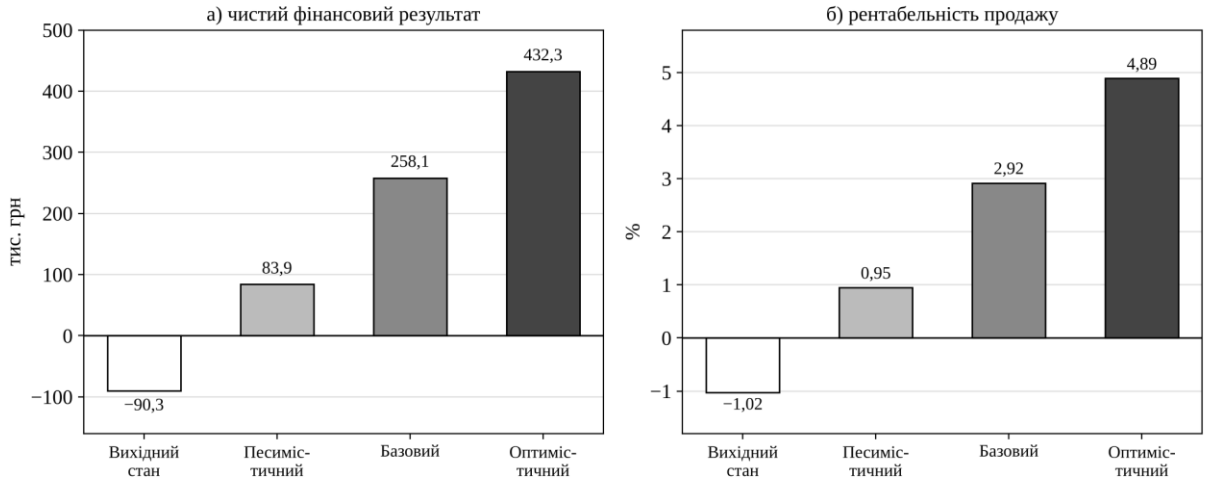


Рис. 3.12. Сценарні значення чистого фінансового результату та рентабельності продажу «Альфа-Сервіс» *(розроблено автором)*

Узагальнену аналітичну архітектуру сценарного управління ефективністю, в якій результати діагностики показників і сценарних розрахунків використовуються для вибору управлінських рішень, наведено на рис. 3.13.

Отже, діагностика показників ефективності «Альфа-Сервіс» показала, що середні величини змін зменшуються від часових показників (19,55 %) через планові (14,3 %) до витратних і результативних (8,6 % і 9,4 %), лаг реагування на відхилення скоротився щонайменше на 17,6 %, а напрям зміни інтегральної оцінки стійкий до зміни вагових коефіцієнтів, тоді як її величина становить 14,3–20,0 % залежно від способу зважування. Сценарний розрахунок на основі фінансового профілю підприємства показав, що економія контрольованих витрат забезпечує беззбитковість за частки контрольованих витрат понад 13,0 % і приріст економічного ефекту від 174,2 до 522,6 тис. грн на рік, який визначає граничний обсяг витрат на цифрову інфраструктуру. Ці результати є основою для формування дорожньої карти масштабування BIM-підходів.

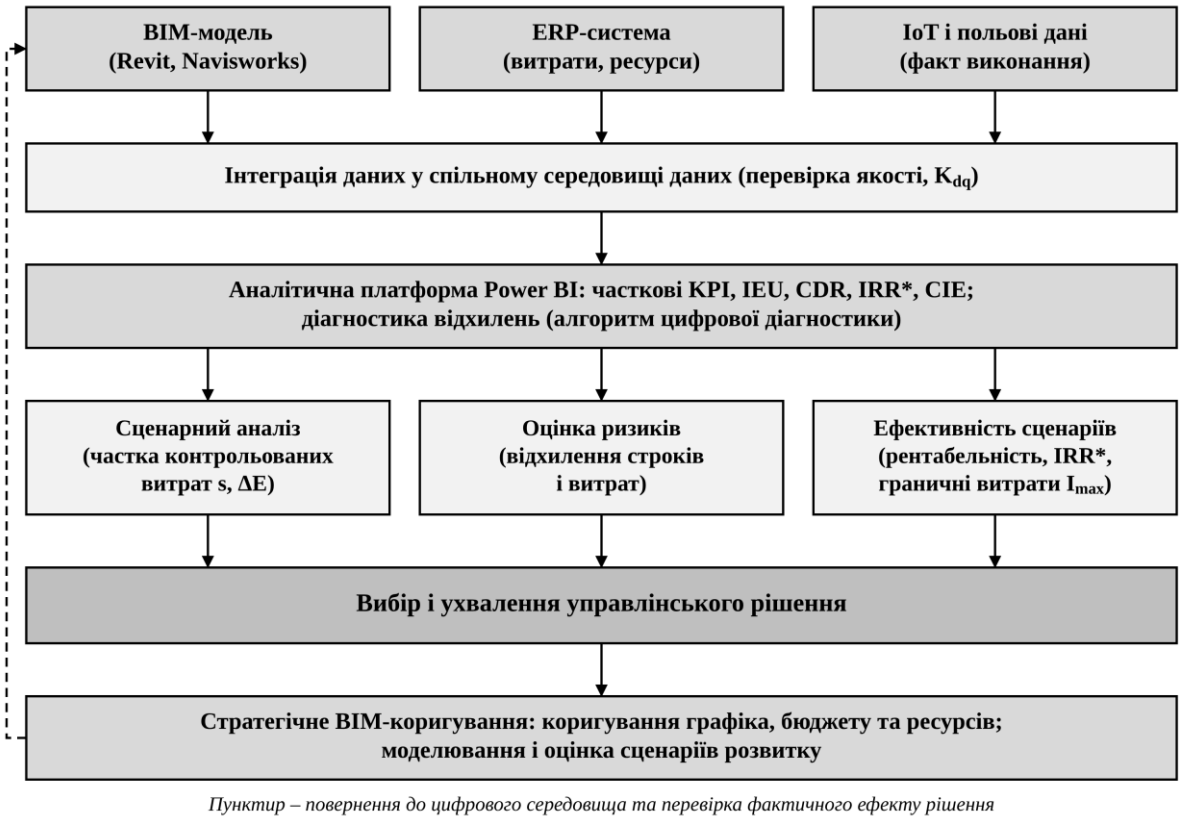


Рис. 3.13. Узагальнена аналітична архітектура сценарного управління ефективністю *(розроблено автором)*

3.3. Формування дорожньої карти масштабування BIM-підходів в архітектурі управління будівельною організацією

Інтеграція BIM, ERP, IoT і Power BI у межах корпоративної структури будівельного підприємства є основою побудови сучасної цифрової архітектури управління, у якій інформаційні потоки, аналітика й управлінські рішення функціонують у єдиному цифровому середовищі. Інтеграція забезпечує наскрізне проходження даних — від рівня технічного збору інформації до стратегічного планування, перетворюючи розрізнені процеси у взаємопов’язану, самонавчальну систему управління.

На початковому, технічному рівні, відбувається збір і обробка даних із різних цифрових джерел. Сюди входять BIM-моделі (Autodesk Revit,

Navisworks), котрі фіксують просторово-технологічні характеристики проєкту; IoT-пристрої, що збирають дані з будівельних майданчиків у реальному часі (температура, вібрація, логістика, безпека); а також ERP-системи (SAP, Oracle ERP), котрі відстежують фінансові, кадрові та ресурсні показники. На цьому рівні формується базова інформаційна основа — цифрове відображення фактичного стану об'єкта, процесів і витрат.

Далі дані надходять на аналітичний рівень, який є ядром системи інтеграції. Power BI виконує роль уніфікованої аналітичної платформи, що об'єднує інформацію з BIM, ERP та IoT у єдині звіти, дашборди й моделі. У цьому середовищі відбувається обчислення ключових показників ефективності (KPI), комплексного індексу ефективності (CIE) та інтегрованої рентабельності (IRR*), котрі відображають продуктивність, економічність і рівень цифрової взаємодії. Аналітичний рівень виконує функцію прогнозування — система автоматично моделює сценарії розвитку та формує аналітичні рекомендації для управлінських рішень.

На управлінському рівні результати аналітики перетворюються на конкретні управлінські дії. Менеджери, керівники підрозділів і координатори проєктів отримують дані у вигляді візуалізованих дашбордів Power BI, що дає змогу ухвалювати рішення в реальному часі. Система відстежує відхилення, пропонує варіанти корекції графіків, витрат або ресурсів, а також автоматично синхронізує ці зміни у BIM та ERP-середовищі. Завдяки цьому управління стає динамічним і адаптивним — кожне рішення негайно оновлює стан цифрової моделі.

Вищий, стратегічний рівень, забезпечує перетворення цифрової інтеграції на інструмент корпоративного управління. Аналітичні індекси з Power BI використовуються для стратегічного планування, формування довгострокових інвестиційних рішень і контролю виконання корпоративних цілей. Керівництво компанії отримує комплексне бачення ефективності всієї організації: від операційного рівня до фінансових результатів, що дозволяє здійснювати масштабування цифрової моделі на нові проєкти та філії [16].

Інтеграція BIM, ERP, IoT і Power BI на будівельному підприємстві створює чотирирівневу архітектуру — технічний, аналітичний, управлінський і стратегічний рівні, які взаємодіють через безперервний інформаційно-аналітичний потік. У результаті компанія отримує гнучке цифрове середовище, здатну не лише фіксувати факти, а й прогнозувати ефективність, попереджати ризики та формувати стратегічну перевагу в управлінні будівельними процесами.

Структуру масштабованої BIM-архітектури управління будівельним підприємством, у якій технічний, аналітичний, управлінський і стратегічний рівні взаємодіють через безперервний інформаційно-аналітичний потік, наведено на рис. 3.14.

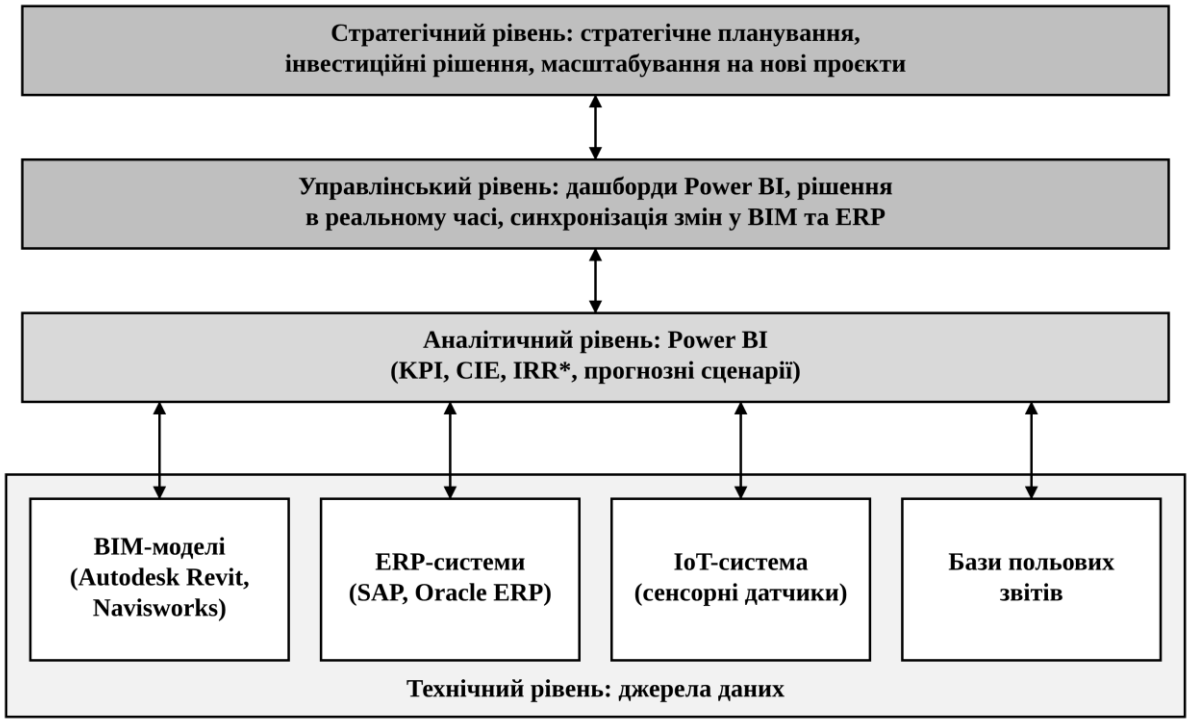


Рис. 3.14. Структура масштабованої BIM-архітектури управління будівельним підприємством *(розроблено автором)*

Придатність архітектури цифрово інтегрованої системи управління підтверджено в ТОВ «Марстон-Груп» (код ЄДРПОУ 41129232; довідка про

впровадження від 12.05.2026 № 65-1, додаток А). На відміну від кількісної апробації в «Альфа-Сервіс», це підтвердження має якісний характер: довідка не містить кількісних показників ефекту. У цій компанії BIM-модель використовується як інформаційне ядро, навколо якого синхронізуються планові, фінансові, ресурсні, календарні та організаційні процеси. Інформаційна модель взаємодіє з ERP-, CRM- і SCM-рішеннями, засобами календарного планування та аналітичними платформами, а спільне середовище даних забезпечує використання даних про обсяги, ресурси, вартість і строки різними функціональними підрозділами без багаторазового ручного дублювання (рис. 3.15).

Перед використанням даних моделі в управлінських розрахунках у «Марстон-Груп» застосовано процедуру багаторівневого контролю якості, за якою дані послідовно перевіряються на повноту, логічну узгодженість, відповідність встановленим правилам і придатність для конкретної управлінської процедури, а пріоритет надається інформації, помилка в якій має найбільший вплив на вартість або строки проєкту.

Це відповідає механізму аналітичної верифікації BIM-даних з коефіцієнтом якості даних Kdq і ризик-орієнтованою пріоритезацією перевірок. Для оцінювання результативності цифрового управління компанія використала групу взаємопов’язаних показників інформаційної цінності цифрового середовища, економічної віддачі BIM-інвестицій, рівня координації та швидкості інформаційного оновлення (ICVI, ROIBIM, DCM, DSR, формули (2.1)–(2.4)).

Цифровий моніторинг часових і ресурсних параметрів у «Марстон-Груп» ґрунтується на постійному зіставленні запланованих і фактичних значень, встановленні причин відхилень і формуванні підстав для коригування управлінських рішень, а інтегровані інформаційні панелі бізнес-аналітики подають керівництву систематизовані показники щодо виконання робіт, ресурсів, витрат, строків і прогнозованих відхилень. Для підтримки цих процедур використано алгоритм цифрової діагностики ефективності

управлінських рішень (рис. 3.10), останній етап якого передбачає повернення до цифрового середовища після ухвалення рішення та перевірку його фактичного ефекту.

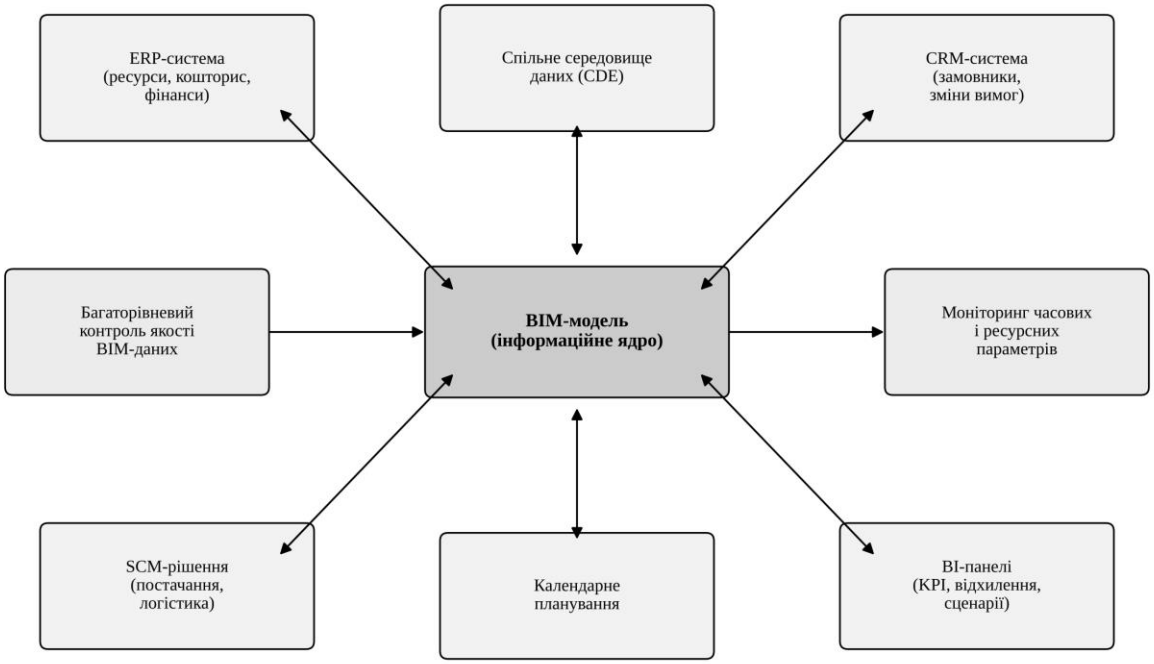


Рис. 3.15. Цифрово інтегрована система управління з BIM-ядром, використана в «Марстон-Груп» *(розроблено автором)*

Масштабування BIM-підходів доцільно здійснювати поетапно. На локальному етапі цифрові рішення впроваджуються в межах окремих проєктів або підрозділів: формуються 4D- і 5D-моделі, запроваджуються цифрові наряди-допуски, накопичуються первинні дані. На корпоративному етапі BIM-модель інтегрується з ERP-системою та календарним плануванням у спільному середовищі даних, запроваджується контроль якості даних і метод освоєного обсягу. На стратегічному етапі узгоджена система показників IEU, IRR*, CIE використовується для сценарного прогнозування й систематичного коригування економіко-управлінських характеристик підприємства. Етапи масштабування наведено на рис. 3.16.

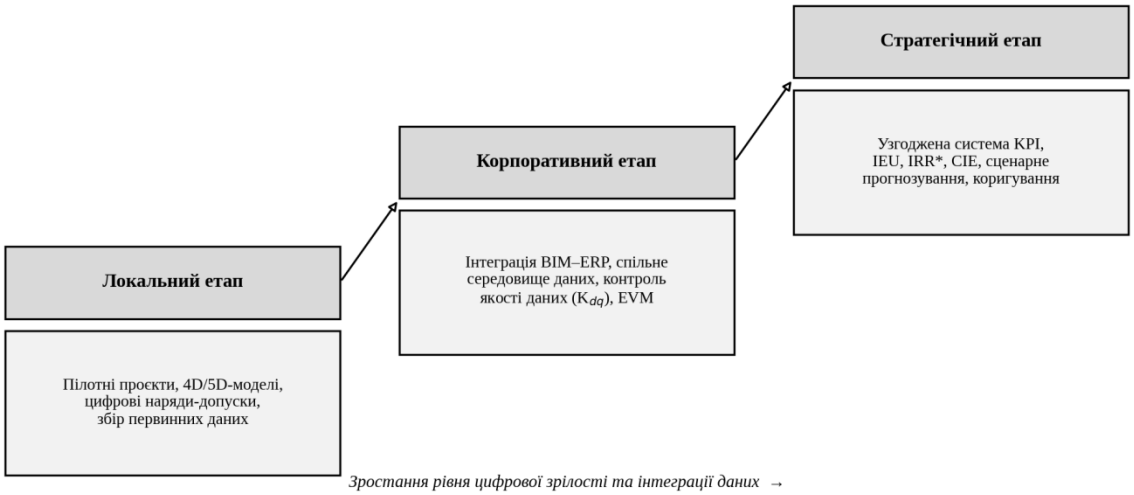


Рис. 3.16. Етапи масштабування BIM-підходів в управлінні будівельним підприємством *(розроблено автором)*

Порівняння складу інструментарію, використаного двома компаніями, показує, що «Альфа-Сервіс» зосередилася на аналітичному контурі – системі показників, цифровій діагностиці та сценарному аналізі, тоді як «Марстон-Груп» – на інфраструктурному контурі – інтеграції BIM з корпоративними інформаційними системами в спільному середовищі даних та показниках ефекту цифрового середовища (табл. 3.6). Обидві компанії використали аналітичну перевірку BIM-даних, цифровий моніторинг відхилень та інтеграцію BIM з інструментами бізнес-аналітики, які становлять спільну основу інструментарію незалежно від обраного напряму цифрової трансформації.

На основі результатів апробації сформовано дорожню карту масштабування BIM-підходів в управлінні будівельним підприємством, у якій для кожного етапу визначено зміст заходів, показники контролю та критерій переходу до наступного етапу (табл. 3.7, рис. 3.17).

Таблиця 3.6.

Склад BIM-орієнтованого економіко-управлінського інструментарію, використаного будівельними компаніями *(складено автором за даними довідок про впровадження, додаток А)*

Елемент інструментарію	«Альфа-Сервіс»	«Марстон-Груп»
Система показників оцінювання результативності управління з інтегральними оцінками на основі часткових KPI	+	+
Показники ефекту цифрового середовища (ICVI, ROIBIM, DCM, DSR)	–	+
Алгоритм цифрової діагностики ефективності управлінських рішень	+	+
Аналітична перевірка BIM-даних з ризик-орієнтованою пріоритезацією перевірок	+	+
Цифровий моніторинг часових і ресурсних параметрів	+	+
Інтеграція BIM з ERP-, CRM- і SCM-рішеннями та засобами календарного планування	–	+
Спільне цифрове середовище даних	+	+
Інтеграція BIM з інструментами бізнес-аналітики	+	+
Сценарний аналіз варіантів управлінських рішень	+	+

Для українських будівельних підприємств запропонована дорожня карта узгоджується з Концепцією впровадження BIM-технологій, схваленою розпорядженням Кабінету Міністрів України № 152-р [22], і національним стандартом ДСТУ ISO 19650-1:2020 [7]. Перший етап доцільно поєднувати з реалізацією пілотних проєктів, передбачених планом заходів Концепції, та з підготовкою BIM-фахівців [13; 14], а другий – з формуванням ПОБ і ППР на основі інформаційної моделі відповідно до ДБН А.3.1-5:2016 [5]. Такий порядок дозволяє підприємству переходити до вищих рівнів BIM-зрілості лише після підтвердження якості даних і стабільності показників на попередньому етапі.

Таблиця 3.7.

Дорожня карта масштабування BIM-підходів в управлінні будівельним підприємством *(розроблено автором)*

Етап	Зміст заходів	Показники контролю	Критерій переходу до наступного етапу
1. Пілотне впровадження	Розроблення BIM-моделей 4D/5D для пілотних об'єктів; запровадження спільного середовища даних за ДСТУ ISO 19650-1; цифрові наряди-допуски; навчання персоналу	Kdq (2.8), DSR (2.4), ICVI (2.1)	Стабільна якість даних моделі: K_{dq} не нижче порогу, встановленого в EIR або BEP
2. Інтеграція процесів	Зв'язок BIM-моделі з кошторисом, календарним планом (ПОБ і ППР за ДБН А.3.1-5:2016) та ERP; контроль методом освоєного обсягу	SPI (2.14), CPI (2.15), USI (2.5), DCM (2.3), RCV (2.6)	Зниження USI, наближення SPI і CPI до 1 на пілотних об'єктах
3. Масштабування аналітики	Поширення стандартів моделювання на всі об'єкти; панелі KPI в підрозділах; розрахунок IEU, IRR*, ΔE, CIE	IEU (2.16), IRR* (2.18), ΔE (3.4), CIE (2.19), MAPE (2.22), IPI (2.7), ROIBIM (2.2)	Стійке ранжування періодів за IEU і CIE під час зміни ваг; прийнятна похибка прогнозу виручки й прибутку
4. Стратегічне BIM-коригування	Сценарне прогнозування; коригування економіко-управлінських характеристик; вимірювання CDR за журналами спільного середовища даних	CDR (2.17), CIE (2.19), сценарні ΔE, S_index (2.13)	Систематичне ухвалення коригувальних рішень на основі даних моделі

Показники контролю етапів дорожньої карти визначаються за формулами розділу 2. На етапі пілотного впровадження якість даних моделі оцінюється коефіцієнтом Kdq за формулою (2.8), ефект переходу до цифрової моделі – індексом ICVI за формулою (2.1), а повнота інформаційного обміну – коефіцієнтом синхронізованого оновлення DSR за формулою (2.4). На етапі інтеграції процесів узгодженість часових і вартісних параметрів контролюється коефіцієнтом DCM за формулою (2.3), індексом USI за формулою (2.5) та індексами SPI і CPI за формулами (2.14) і (2.15), а ризик-скоригована вартість етапів – за формулою (2.6). На етапі масштабування аналітики продуктивність виконання робіт оцінюється індексом IPI за формулою (2.7), віддача інвестицій у цифрову інфраструктуру – показником ROIBIM за формулою (2.2), а інтегральна ефективність – індексами IEU і CIE за формулами (2.16) і (2.19).



Рис. 3.17. Дорожня карта масштабування BIM-підходів в управлінні будівельним підприємством *(розроблено автором)*

На етапі стратегічного BIM-коригування пріоритет перевірок і тип коригувального втручання визначаються сценарним індексом реакції S_index за формулою (2.13), що агрегує інтегральний ризик об’єкта (2.11) та інерційний вплив похибки (2.12), розраховані за геометричними і логічними відхиленнями (2.9) і (2.10).

Архітектуру інтегрованого корпоративного управління на базі BIM-моделі, в якій дані проєктів, фінансів, постачання, безпеки праці та якості зводяться в інтегральне оцінювання та використовуються на стратегічному рівні, наведено на рис. 3.18.

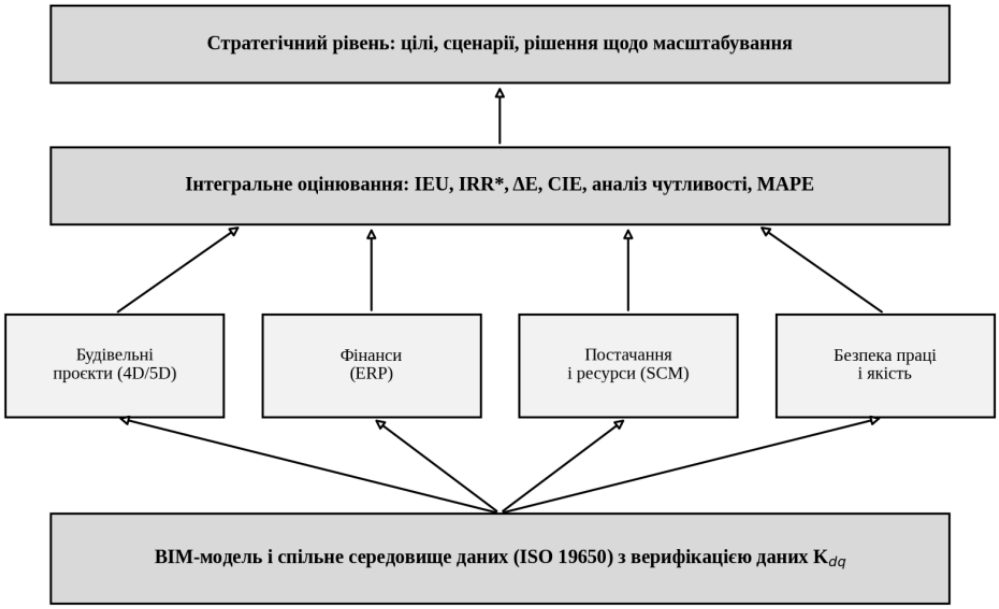


Рис. 3.18. Архітектура інтегрованого корпоративного управління на базі BIM-моделі *(розроблено автором)*

Принцип безперервного вдосконалення реалізується через цикл BIM-коригування: збір і верифікація даних, розрахунок показників, діагностика й сценарний аналіз, коригувальні рішення, зміна організаційно-технологічних параметрів та оновлення BIM-моделі (рис. 3.19).

Запропонований інструментарій має обмеження застосування. Фінансовий профіль «Альфа-Сервіс» сформовано за останньою оприлюдненою фінансовою звітністю, а результати використання інструментарію – за оцінкою підприємства у відносному вимірі, тому сценарний розрахунок характеризує нижню межу економічного ефекту за структурою витрат базового періоду. Нормування за двома періодами відображає відносну, а не абсолютну зміну показників. Абсолютні значення CDR і CIE потребують реєстрації часових лагів реагування та витрат на цифрову інфраструктуру в спільному середовищі даних, календарних планах і ERP-системі підприємства, а перевірка прогнозів метрикою MAPE за формулою (2.22) – часових рядів показників щонайменше за три періоди. Крім того, за двох спостережень вагові коефіцієнти, визначені методом ентропії, є монотонною функцією величини відносної зміни показників і не є незалежним джерелом інформації, тому результат подано разом з оцінкою за рівних вагових коефіцієнтів; індекс IEU звітного періоду дорівнює одиниці за побудовою нормування відносно найкращого значення. Кількісні результати впровадження отримано на даних одного підприємства, тоді як у ТОВ «Марстон-Груп» використання інструментарію підтверджено довідкою про впровадження без кількісної оцінки ефекту.

Отже, дорожня карта масштабування BIM-підходів передбачає послідовний перехід від пілотного впровадження через інтеграцію процесів і масштабування аналітики до стратегічного BIM-коригування, із критеріями переходу, що ґрунтуються на запропонованих показниках. Кількісна апробація в «Альфа-Сервіс» і якісне підтвердження в «Марстон-Груп» засвідчили, що підприємство може розпочинати масштабування з аналітичного або інфраструктурного контуру, а аналітична перевірка BIM-даних, моніторинг відхилень і бізнес-аналітика є спільною основою обох напрямів.

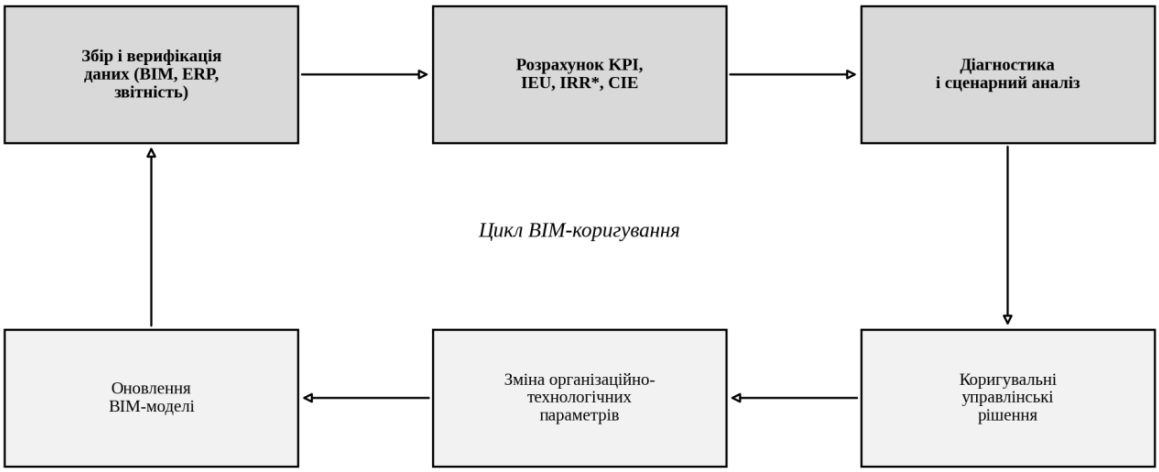


Рис. 3.19. Модель стратегічного зворотного зв'язку в масштабованій BIM-аналітичній системі *(розроблено автором)*

Висновки до розділу 3

1. Апробацію інструментарію виконано на даних ТОВ «Будівельна фірма «Альфа-Сервіс»». Фінансовий профіль підприємства (рентабельність продажу −1,02 %, частка зобов'язань у джерелах фінансування 74,6 %, коефіцієнт оборотності активів 0,128) засвідчив високу чутливість фінансового результату до управління витратами і строками. За сімома частковими показниками результатів використання інструментарію, нормованими відносно найкращого значення, з ваговими коефіцієнтами, визначеними методом ентропії (від 0,043 до 0,383), інтегральна ефективність управління в базовому періоді становила 0,833–0,875 досягнутого рівня, тобто приріст індексу IEU становить 14,3–20,0 % залежно від способу зважування; часові показники забезпечили 44,5–75,4 % приросту.

2. Діагностика показників засвідчила зменшення середніх величин змін від часових показників (середня зміна 19,55 %) через планові (14,3 %) до витратних (8,6 %) і результативних (9,4 %). Лаг реагування на відхилення скоротився на 17,6–21,5 % залежно від його структури, що свідчить про

зростання цифрової реактивності. Зміна вагових коефіцієнтів на ±20 % змінює IEU базового періоду в межах 0,830–0,837, що пояснюється вузьким діапазоном нормованих значень (0,785–0,922) і свідчить про малу роль зважування за цих даних; за рівних вагових коефіцієнтів приріст індексу становить 14,3 %.

3. Сценарний розрахунок на основі фінансового профілю підприємства показав, що економія контрольованих витрат на 7,8 % забезпечує беззбитковість за частки контрольованих витрат понад 13,0 % і приріст економічного ефекту від 174,2 до 522,6 тис. грн на рік за рентабельності продажу від 0,95 % до 4,89 %. Цей приріст визначає граничний річний обсяг витрат на цифрову інфраструктуру, за якого IRR* залишається додатною. Оцінка є умовною щодо частки контрольованих витрат і поєднує відносну економію періоду використання інструментарію зі структурою витрат 2020 р. Сформовано восьмиетапний алгоритм цифрової діагностики ефективності управлінських рішень, що поєднує аналітичний і управлінський контури.

4. Розроблено дорожню карту масштабування BIM-підходів в управлінні будівельним підприємством з етапами пілотного впровадження, інтеграції процесів, масштабування аналітики та стратегічного BIM-коригування і критеріями переходу на основі показників Kdq, DSR, SPI, CPI, USI, IEU, CIE і CDR, узгоджену з Концепцією впровадження BIM-технологій, ДСТУ ISO 19650-1:2020 і ДБН А.3.1-5:2016. Кількісна апробація інструментарію в «Альфа-Сервіс» (аналітичний контур) і якісне підтвердження його придатності в «Марстон-Груп» (інфраструктурний контур – інтеграція BIM з ERP-, CRM- і SCM-рішеннями в спільному середовищі даних) засвідчили можливість розпочинати масштабування з різних контурів. Визначено межі застосування інструментарію.

Результати досліджень, наведених у розділі 3, висвітлено в публікаціях [3; 15; 24; 27].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано науково-прикладне завдання обґрунтування теоретико-методичних засад і розроблення BIM-орієнтованого економіко-управлінського інструментарію цифрової трансформації будівельного підприємства, що забезпечує коригування його економіко-управлінських характеристик на основі інтеграції параметрів інформаційної моделі в систему показників ефективності управлінських рішень. Отримані результати дають змогу сформулювати такі висновки.

1. Встановлено, що BIM еволюціонував від засобу автоматизації креслень до методології управління життєвим циклом об'єкта, а в Україні сформовано нормативне підґрунтя його впровадження – Концепцію впровадження BIM-технологій і національні стандарти, гармонізовані з ISO 19650. Водночас ефекти BIM у наукових дослідженнях оцінюються переважно на рівні окремих проєктів, а взаємозв'язок параметрів інформаційної моделі з характеристиками будівельного підприємства в цілому залишається недостатньо дослідженим.

2. Уточнено зміст поняття «економіко-управлінські характеристики будівельного підприємства» як сукупності взаємопов'язаних фінансово-економічних показників і характеристик системи управління, що формуються через параметри виконання будівельних робіт, та запропоновано поняття «BIM-коригування» як процесу випереджального коригування цих характеристик на основі відхилень, виявлених в інформаційній моделі. Обґрунтовано склад BIM-орієнтованого економіко-управлінського інструментарію цифрової трансформації будівельного підприємства як єдності системи показників, механізму верифікації даних, інструментарію моніторингу й оцінювання, алгоритму цифрової діагностики та дорожньої карти масштабування.

3. Визначено функціональні блоки бізнес-процесів будівельного підприємства, що піддаються BIM-інтеграції, та механізми інтеграції через відкриті формати обміну даними, API-зв'язки, хмарні платформи і спільне

середовище даних; встановлено фрагментарність наявних показників оцінювання впливу BIM.

4. Обґрунтовано архітектуру цифрової інфраструктури управління з BIM-ядром і систему показників (ICVI, ROI_{BIM}, DCM, DSR, USI, RCV, IPI); порівняльна оцінка методів оцінювання ефекту BIM підтвердила доцільність інтегрального підходу.

5. Розроблено механізм аналітичної верифікації BIM-даних, що поєднує організаційну верифікацію за ISO 19650, автоматизовану перевірку моделей за правилами та ризик-орієнтовану пріоритезацію перевірок, і запропоновано коефіцієнт якості даних K_{dq} як критерій придатності даних моделі для розрахунку показників ефективності.

6. Сформовано інструментарій цифрового моніторингу ресурсних і часових параметрів на основі методу освоєного обсягу та трирівневу систему показників (часткові KPI – IEU і CDR – IRR*) з узагальненням у комплексному індексі CIE і визначенням вагових коефіцієнтів методом ентропії з обов'язковим зіставленням з результатом за рівних вагових коефіцієнтів; апробація коефіцієнта CDR, індексу CIE і перевірка прогнозів метрикою MAPE потребують часових рядів внутрішніх даних підприємства.

7. Апробація на даних ТОВ «Будівельна фірма «Альфа-Сервіс»» засвідчила працездатність інструментарію: приріст індексу IEU становить 14,3–20,0 % залежно від способу зважування (IEU звітного періоду дорівнює 1 за побудовою нормування), причому 44,5–75,4 % приросту забезпечили часові показники; середні величини змін зменшуються від часових (19,55 %) через планові (14,3 %) до витратних (8,6 %) і результативних (9,4 %) показників; лаг реагування на відхилення скоротився на 17,6–21,5 %; зміна вагових коефіцієнтів на ±20 % мало впливає на інтегральну оцінку через вузький діапазон нормованих значень. Сценарний розрахунок засвідчив, що економія контрольованих витрат забезпечує беззбитковість за частки контрольованих витрат понад 13,0 % і приріст економічного ефекту від 174,2 до 522,6 тис. грн на рік, що визначає граничний обсяг витрат на цифрову

інфраструктуру. Ці оцінки є умовними: частку контрольованих витрат задано сценарно, а відносну економію накладено на структуру витрат 2020 р.

8. Сформовано восьмиетапний алгоритм цифрової діагностики ефективності управлінських рішень і розроблено дорожню карту масштабування BIM-підходів з етапами пілотного впровадження, інтеграції процесів, масштабування аналітики та стратегічного BIM-коригування і критеріями переходу між ними, узгоджену з Концепцією впровадження BIM-технологій в Україні, ДСТУ ISO 19650-1:2020 і ДБН А.3.1-5:2016. Результати дослідження впроваджено в діяльність ТОВ «Будівельна фірма «Альфа-Сервіс»» (кількісна апробація) і ТОВ «Марстон-Груп» (якісне підтвердження без кількісної оцінки ефекту) та використано в Інституті місцевого розвитку.

9. Обмеження дослідження пов’язані з використанням останньої оприлюдненої фінансової звітності та оцінок підприємства у відносному вимірі, що не дозволило розрахувати абсолютні значення CDR і CIE та перевірити прогнози метрикою MAPE. Перспективами подальших досліджень є апробація інструментарію за часовими рядами внутрішніх даних спільного середовища даних, календарних планів і ERP-систем українських будівельних підприємств.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Андрухов В. М., Потєха А. С., Басістий В. О. Комплексна оцінка доцільності використання BIM технологій для будівельного проекту. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. 2024. Т. 36, № 1. С. 161–165. URL: https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/42290.

2. Бондаренко Д. В., Калашнікова К. Ю. Цифровізація будівельної галузі України: аналіз стану, проблем та перспектив розвитку. Економіка та суспільство. 2024. № 65. DOI: https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-65-2.

3. Гроголь В. Я., Різун Д. Ю., Чуприна Х. М. Забезпечення адаптивної поведінки будівельного підприємства в умовах цифровізації та BIM-коригування економіко-управлінських характеристик будівельного підприємства. Актуальні проблеми освітнього процесу в контексті європейського вибору України : матеріали VIII Міжнар. конф. (м. Київ, 12 листоп. 2025 р.). Київ : Ліра-К, 2026. С. 615–617. URL: https://repositary.knuba.edu.ua/handle/123456789/18396.

4. Гудима Л. О. BIM-технології в будівництві: сучасні виклики для України. Бізнес Інформ. 2024. № 2. С. 97–104. URL: https://www.business-inform.net/export_pdf/business-inform-2024-2_0-pages-97_104.pdf.

5. ДБН А.3.1-5:2016. Організація будівельного виробництва. [Чинний від 2017-01-01]. Київ : Мінрегіон України, 2016. URL: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3879707932224390963.

6. Деякі питання забезпечення функціонування Єдиної державної електронної системи у сфері будівництва : Постанова Кабінету Міністрів України від 23.06.2021 № 681. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/681-2021-п.

7. ДСТУ ISO 19650-1:2020 (ISO 19650-1:2018, IDT). Організація та оцифрування інформації щодо будівель та споруд, включно з будівельним інформаційним моделюванням (BIM). Управління інформацією з використанням будівельного інформаційного моделювання. Частина 1. Концепції та принципи. [Чинний від 2020-07-01].

8. Економіка підприємства : навч.-метод. посіб. для самост. вивч. дисц. / за заг. ред. Г. О. Швиданенко. Київ : КНЕУ, 2009. 439 с. URL: https://ir.kneu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/67f76a55-759e-4fb7-93c5-5810c9e3cfe2/content.

9. Кіщак Н. Г. Економіко-управлінський інструментарій оцінки продуктивності операційної системи будівельних підприємств : дис. … канд. екон. наук : 08.00.04. Київ : КНУБА, 2022.

10. Кошторисні норми України «Настанова з визначення вартості будівництва» : затв. наказом Міністерства розвитку громад та територій України від 01.11.2021 № 281. URL: https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0281914-21.

11. Кричевська Ю., Хоменко О., Сторожук О., Кучеренко О., Кіщак Н. Економіко-аналітичний базис цифрової трансформації процесів адміністрування будівельними підприємствами. Просторовий розвиток. 2024. № 7. С. 492–505. DOI: https://doi.org/10.32347/2786-7269.2024.7.492-505.

12. Кулік М. В., Куліш С. О., Іщенко С. С. Впровадження новітніх цифровізованих програмних комплексів на базі BIM-технологій у будівництві України. Науковий вісник будівництва. 2020. Т. 100, № 2. С. 301–306. URL: https://svc.kname.edu.ua.

13. Левченко О. В., Михайленко А. В. Аспекти підготовки BIM-менеджерів. Сучасні проблеми архітектури та містобудування. 2021. № 59. С. 118–131. DOI: https://doi.org/10.32347/2077-3455.2021.59.118-131.

14. Левченко О. В., Михайленко А. В. BIM кадри від користувачів до експертів. Сучасні проблеми архітектури та містобудування. 2020. № 56. С. 88–102. DOI: https://doi.org/10.32347/2077-3455.2020.56.88-102.

15. Малихіна О. М., Різун Д. Ю. Формування цифрових засобів контролю ресурсних і часових параметрів у динамічних умовах проєктної взаємодії. Економіка та підприємництво в умовах сучасних викликів : матеріали IV Всеукр. наук.-практ. конф., 4 черв. 2026 р., м. Житомир.

Житомир : Поліський нац. ун-т, 2026. С. 353–355. URL: http://ir.polissiauniver.edu.ua/handle/123456789/18508.

16. Мудра М. С. Економічна оцінка інноваційного розвитку підприємств в системі будівельного девелопменту : дис. … д-ра філософії : 051. Київ : КНУБА, 2024. URL: https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2024/07/dysertacziya_mudra-m.s._dlya-pidpysu.pdf.

17. Петруха Н. М., Омельчук Р. С., Різун Д. Ю., Білоус Б. В., Литарев О. Г. Формування крос-функціональних команд та інші заходи економіко-управлінського реінжинірингу бізнес-процесів в контексті впровадження інноваційних заходів на будівельних підприємствах. Шляхи підвищення ефективності будівництва. 2023. № 3 (52). С. 110–132. DOI: https://doi.org/10.32347/2707-501x.2023.52(3).110-132.

18. Поколенко В. О., Герасимчук Я. Л., Різун Д. Ю., Тищенко М. І., Щербак І. В. Теоретичні засади впровадження BIM-технологій в управлінні будівельними проєктами. Будівельне виробництво. 2025. № 80. С. 62–70. DOI: https://doi.org/10.36750/2524-2555.80.62-70.

19. Попик Б. Сучасні системи моніторингу цін на матеріальні ресурси у будівництві: принципи роботи та виклики. Економіка та суспільство. 2024. № 64. DOI: https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-64-33. URL: https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/download/4234/4160/.

20. Приходько О. О. Комбінований інструментарій організаційно-технологічного та цифрового адміністрування проєктами будівництва : дис. … д-ра філософії : 192. Київ : КНУБА, 2024. URL: https://knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2024/06/dys_pryhodko-oo_pered-el-pidpysom.pdf.

21. Про регулювання містобудівної діяльності : Закон України від 17.02.2011 № 3038-VI. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3038-17.

22. Про схвалення Концепції впровадження технологій будівельного інформаційного моделювання (BIM-технологій) в Україні та затвердження плану заходів з її реалізації : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 17.02.2021 № 152-р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/152-2021-р.

23. Рижакова Г. М., Білоус Б. В., Цай М. І., Різун Д. Ю. Аналітичне та функціональне оцінювання фінансових параметрів стратегічних інноваційних циклів у будівельних компаніях на основі концепцій method of cost allocation by activities. Шляхи підвищення ефективності будівництва. 2024. № 3 (53). С. 171–188. DOI: https://doi.org/10.32347/2707-501x.2024.53(3).171-188.

24. Різун Д. Ю. Інструментарій цифрового моніторингу ресурсних і часових параметрів за умов динамічної проєктної взаємодії. Шляхи підвищення ефективності будівництва. 2026. № 2 (57). С. 125–138. DOI: https://doi.org/10.32347/2707-501x.2026.57(2).125-138.

25. Різун Д. Ю. Інтеграція BIM-технологій у стратегію оптимізації бізнес-процесів будівельного підприємства. Шляхи підвищення ефективності будівництва. 2025. № 2 (56). С. 261–274. DOI: https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.56(2).261-274.

26. Різун Д. Ю. Механізми аналітичної верифікації даних і управління проєктною інформацією у середовищі BIM. Просторовий розвиток. 2025. № 15. С. 771–782. DOI: https://doi.org/10.32347/2786-7269.2025.15.771-782.

27. Різун Д. Ю., Поколенко В. О., Герасимчук Я. Л., Тищенко М. І. Коригування економічних та управлінських характеристик підприємства за допомогою BIM-моделювання. Просторовий розвиток. 2025. № 14. С. 392–403. DOI: https://doi.org/10.32347/2786-7269.2025.14.392-403.

28. Халілов А. Менеджмент будівельних проєктів з застосуванням BIM технологій та штучного інтелекту на цифровій платформі : дис. … д-ра філософії : 073. Київ : КНУБА, 2024. URL: https://knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2024/06/halilov-dysertacziya.pdf.

29. Чернишев Д. О., Рижаков Д. А., Хоменко О. М., Петруха С. В., Кучеренко О. І., Норбач М. Цифрові технології як інноваційні тренди структурно-трансформаційних зрушень у системі управління підприємств-стейкхолдерів будівництва. Управління розвитком складних систем. 2021. № 46. С. 118–130. DOI: https://doi.org/10.32347/2412-9933.2021.46.118-130.

30. Чуприна Х. М., Мухін А. А., Різун Д. Ю., Микитченко Б. А. Аналітико-структурний огляд механізмів функціонування територіальних кластерів у системі державно-приватної взаємодії. Шляхи підвищення ефективності будівництва. 2024. № 2 (54). С. 187–199. DOI: https://doi.org/10.32347/2707-501x.2024.54(2).187-199.

31. Шестаковська Т. Л. Автоматизація та цифрове моделювання в будівельній індустрії. Публічне управління і адміністрування в Україні. 2023. Вип. 34. С. 142–145. DOI: https://doi.org/10.32782/pma2663-5240-2023.34.28.

32. Abdelalim A. M., Essawy A., Alnaser A. A., Shibeika A., Sherif A. Digital Trio: Integration of BIM–EIR–IoT for Facilities Management of Mega Construction Projects. Sustainability. 2024. Vol. 16, No. 15. Art. 6348. DOI: https://doi.org/10.3390/su16156348.

33. Anbari F. T. Earned Value Project Management Method and Extensions. Project Management Journal. 2003. Vol. 34, No. 4. P. 12–23. DOI: https://doi.org/10.1177/875697280303400403.

34. Arayici Y., Coates P., Koskela L., Kagioglou M., Usher C., O'Reilly K. Technology adoption in the BIM implementation for lean architectural practice. Automation in Construction. 2011. Vol. 20, No. 2. P. 189–195. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.09.016.

35. Azhar S. Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry. Leadership and Management in Engineering. 2011. Vol. 11, No. 3. P. 241–252. DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127.

36. Barlish K., Sullivan K. How to measure the benefits of BIM — A case study approach. Automation in Construction. 2012. Vol. 24. P. 149–159. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.02.008.

37. Becerik-Gerber B., Jazizadeh F., Li N., Calis G. Application Areas and Data Requirements for BIM-Enabled Facilities Management. Journal of Construction Engineering and Management. 2012. Vol. 138, No. 3. P. 431–442. DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000433.

38. Muharremi R. BIM to Digital Twin: A tool for Infrastructure Asset Management : master's thesis. Torino : Politecnico di Torino, 2024. URL: https://webthesis.biblio.polito.it/31193/1/tesi.pdf.

39. Boje C., Guerriero A., Kubicki S., Rezgui Y. Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research. Automation in Construction. 2020. Vol. 114. Art. 103179. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103179.

40. Bradley A., Li H., Lark R., Dunn S. BIM for infrastructure: An overall review and constructor perspective. Automation in Construction. 2016. Vol. 71. P. 139–152. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.019.

41. Bryde D., Broquetas M., Volm J. M. The project benefits of Building Information Modelling (BIM). International Journal of Project Management. 2013. Vol. 31, No. 7. P. 971–980. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2012.12.001.

42. buildingSMART International. Information Delivery Specification (IDS) 1.0. 2024. URL: https://www.buildingsmart.org/standards/bsi-standards/information-delivery-specification-ids/.

43. Cao D., Li H., Wang G., Huang T. Identifying and contextualising the motivations for BIM implementation in construction projects: An empirical study in China. International Journal of Project Management. 2017. Vol. 35, No. 4. P. 658–669. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2016.02.002.

44. Dainty A., Leiringer R., Fernie S., Harty C. BIM and the small construction firm: a critical perspective. Building Research & Information. 2017. Vol. 45, No. 6. P. 696–709. DOI: https://doi.org/10.1080/09613218.2017.1293940.

45. Ding L., Zhou Y., Akinci B. Building Information Modeling (BIM) application framework: The process of expanding from 3D to computable nD. Automation in Construction. 2014. Vol. 46. P. 82–93. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.04.009.

46. Douglas D., Kelly G., Kassem M. BIM, Digital Twin and Cyber-Physical Systems: crossing and blurring boundaries. Proceedings of the 2021

European Conference on Computing in Construction (EC3 2021). 2021. DOI: https://doi.org/10.35490/EC3.2021.196.

47. Doumbouya L., Gao G., Guan C. Adoption of the Building Information Modeling (BIM) for Construction Project Effectiveness: The Review of BIM Benefits. American Journal of Civil Engineering and Architecture. 2016. Vol. 4, No. 3. P. 74–79. URL: https://pubs.sciepub.com/ajcea/4/3/1/index.html.

48. Eadie R., Browne M., Odeyinka H., McKeown C., McNiff S. BIM implementation throughout the UK construction project lifecycle: An analysis. Automation in Construction. 2013. Vol. 36. P. 145–151. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.09.001.

49. Eastman C., Lee J., Jeong Y., Lee J. Automatic rule-based checking of building designs. Automation in Construction. 2009. Vol. 18, No. 8. P. 1011–1033. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2009.07.002.

50. Eastman C., Teicholz P., Sacks R., Liston K. BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors. 2nd ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2011. 648 p. ISBN 978-0-470-54137-1.

51. EN 17412-1:2020. Building Information Modelling — Level of Information Need — Part 1: Concepts and principles. Brussels : CEN, 2020. [Скасовано 2024-07-03; замінено EN ISO 7817-1:2024]. URL: https://knowledge.bsigroup.com/products/building-information-modelling-level-of-information-need-concepts-and-principles.

52. Ershadi M., Jefferies M., Davis P., Mojtahedi M. Implementation of Building Information Modelling in infrastructure construction projects: a study of dimensions and strategies. International Journal of Information Systems and Project Management. 2021. Vol. 9, No. 4. P. 43–59. DOI: https://doi.org/10.12821/ijispm090403.

53. EU BIM Task Group. Handbook for the introduction of Building Information Modelling by the European Public Sector (українська версія). 2017.

URL: https://eubim.eu/wp-content/uploads/2020/12/2017_EU-BIM-Handbook_ua.pdf.

54. Florida International University. BIM Standard & Guide. Miami : FIU Facilities Management, 2014. URL: https://facilities.fiu.edu/Documents/Forms_Standards/FIU_BIM_Standard_120814.pdf.

55. Ghaffarianhoseini A., Tookey J., Ghaffarianhoseini A., Naismith N., Azhar S., Efimova O., Raahemifar K. Building Information Modelling (BIM) uptake: Clear benefits, understanding its implementation, risks and challenges. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 75. P. 1046–1053. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.083.

56. Giel B. K., Issa R. R. A. Return on Investment Analysis of Using Building Information Modeling in Construction. Journal of Computing in Civil Engineering. 2013. Vol. 27, No. 5. P. 511–521. DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000164.

57. Golparvar-Fard M., Peña-Mora F., Savarese S. Automated Progress Monitoring Using Unordered Daily Construction Photographs and IFC-Based Building Information Models. Journal of Computing in Civil Engineering. 2015. Vol. 29, No. 1. Art. 04014025. DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000205.

58. Grilo A., Jardim-Goncalves R. Value proposition on interoperability of BIM and collaborative working environments. Automation in Construction. 2010. Vol. 19, No. 5. P. 522–530. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2009.11.003.

59. A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide). 6th ed. Newtown Square : Project Management Institute, 2017. 756 p. URL: https://www.pmi.org/pmbok-guide-standards/foundational/pmbok.

60. Hartmann T., Gao J., Fischer M. Areas of Application for 3D and 4D Models on Construction Projects. Journal of Construction Engineering and Management. 2008. Vol. 134, No. 10. P. 776–785. DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2008)134:10(776).

61. Hjelseth E., Nisbet N. Capturing normative constraints by use of the semantic mark-up RASE methodology. Proceedings of the 28th International Conference of CIB W78. Sophia Antipolis, 2011. URL: http://itc.scix.net/paper/w78-2011-Paper-45.

62. HM Government. Government Construction Strategy. London : Cabinet Office, 2011. URL: https://www.gov.uk/government/publications/government-construction-strategy.

63. Hyndman R. J., Koehler A. B. Another look at measures of forecast accuracy. International Journal of Forecasting. 2006. Vol. 22, No. 4. P. 679–688. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2006.03.001.

64. ISO 16739-1:2018. Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries — Part 1: Data schema. Geneva : ISO, 2018. [Замінено ISO 16739-1:2024]. URL: https://www.iso.org/standard/70303.html.

65. ISO 19650-2:2018. Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 2: Delivery phase of the assets. Geneva : ISO, 2018. URL: https://www.iso.org/standard/68080.html.

66. Jenselin J. Risk Analysis of Construction Project Scheduling Using Monte-Carlo Simulation. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. 2019. Vol. 8, Iss. 3. P. 2673–2680. DOI: https://doi.org/10.15680/IJIRSET.2019.0803158.

67. Tiza M. T. The Impact of Building Information Modelling (BIM) in the Construction Industry. Brilliant Engineering. 2024. Vol. 5, No. 1. P. 1–10. DOI: https://doi.org/10.36937/ben.2024.4841.

68. John D. D. Building Information Modeling (BIM) Impact on Construction Performance : thesis for the degree of Master of Science in Applied Engineering. Statesboro : Georgia Southern University, 2018. URL: https://digitalcommons.georgiasouthern.edu/etd/1812/.

69. Kassem M., Kelly G., Dawood N., Serginson M., Lockley S. BIM in facilities management applications: a case study of a large university complex. Built Environment Project and Asset Management. 2015. Vol. 5, No. 3. P. 261–277. DOI: https://doi.org/10.1108/BEPAM-02-2014-0011.

70. Kassem M., Succar B. Macro BIM adoption: Comparative market analysis. Automation in Construction. 2017. Vol. 81. P. 286–299. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.04.005.

71. Kim H., Anderson K., Lee S., Hildreth J. Generating construction schedules through automatic data extraction using open BIM (building information modeling) technology. Automation in Construction. 2013. Vol. 35. P. 285–295. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.05.020.

72. Koo B., Fischer M. Feasibility Study of 4D CAD in Commercial Construction. Journal of Construction Engineering and Management. 2000. Vol. 126, No. 4. P. 251–260. DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2000)126:4(251).

73. Kunz J., Fischer M. Virtual Design and Construction: Themes, Case Studies and Implementation Suggestions : CIFE Working Paper #097. Version 14. Stanford : Stanford University, 2012. URL: https://swap.stanford.edu/was/20150619185847mp_/http://cife.stanford.edu/sites/default/files/WP097_0.pdf.

74. Mendes N. BIM and Digital Twins in Infrastructure Projects: An overview from the Transportation Professional's Perspective : thesis for the degree of Master of Construction Management. Baton Rouge : Louisiana State University, 2023. URL: https://repository.lsu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=6927&context=gradschool_theses.

75. Love P. E. D., Matthews J., Simpson I., Hill A., Olatunji O. A. A benefits realization management building information modeling framework for asset owners. Automation in Construction. 2014. Vol. 37. P. 1–10. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.09.007.

76. Lu W., Fung A., Peng Y., Liang C., Rowlinson S. Cost-benefit analysis of Building Information Modeling implementation in building projects through demystification of time-effort distribution curves. Building and Environment. 2014. Vol. 82. P. 317–327. DOI: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.08.030.

77. Lu Y., Wu Z., Chang R., Li Y. Building Information Modeling (BIM) for green buildings: A critical review and future directions. Automation in Construction. 2017. Vol. 83. P. 134–148. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.08.024.

78. Martínez-Aires M. D., López-Alonso M., Martínez-Rojas M. Building information modeling and safety management: A systematic review. Safety Science. 2018. Vol. 101. P. 11–18. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.08.015.

79. Miettinen R., Paavola S. Beyond the BIM utopia: Approaches to the development and implementation of building information modeling. Automation in Construction. 2014. Vol. 43. P. 84–91. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.03.009.

80. Mihindu S., Arayici Y. Digital construction through BIM systems will drive the re-engineering of construction business practices. 2008 International Conference Visualisation. London : IEEE, 2008. P. 29–34. DOI: https://doi.org/10.1109/VIS.2008.22.

81. National Institute of Building Sciences. National Building Information Modeling Standard. Version 1 – Part 1: Overview, Principles, and Methodologies. Washington, 2007. URL: https://www.nibs.org/nbims.

82. OECD. Enhancing Resilience by Boosting Digital Business Transformation in Ukraine. Paris : OECD Publishing, 2024. DOI: https://doi.org/10.1787/4b13b0bb-en.

83. Ikediashi D. I., Ogwueleka A. C. Exploring Monte Carlo simulation technique for construction project risk management. Conference Proceedings from the Fourth International SEEDS Conference (Dublin, 6–7 Sept. 2018). 2018. P. 168–177. URL: https://www.researchgate.net/publication/370940438.

84. Opendatabot. ТОВ «Будівельна фірма «Альфа-Сервіс»» (код ЄДРПОУ 22965175) : відомості з Єдиного державного реєстру юридичних осіб, фізичних осіб – підприємців та громадських формувань і показники фінансової звітності за 2020 р. URL: https://opendatabot.ua/c/22965175 (дата звернення: 03.11.2026).

85. Ozorhon B., Karahan U. Critical Success Factors of Building Information Modeling Implementation. Journal of Management in Engineering. 2017. Vol. 33, No. 3. Art. 04016054. DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000505.

86. PAS 1192-2:2013. Specification for information management for the capital/delivery phase of construction projects using building information modelling. London : BSI, 2013. [Скасовано 2019-01-18; замінено BS EN ISO 19650-1, BS EN ISO 19650-2]. URL: https://knowledge.bsigroup.com/products/specification-for-information-management-for-the-capital-delivery-phase-of-construction-projects-using-building-information-modelling.

87. Pärn E. A., Edwards D. J., Sing M. C. P. The building information modelling trajectory in facilities management: A review. Automation in Construction. 2017. Vol. 75. P. 45–55. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.12.003.

88. Ryzhakova G., Malykhina O., Pokolenko V., Rubtsova O., Homenko O., Nesterenko I., Honcharenko T. Construction Project Management with Digital Twin Information System. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. 2022. Vol. 12, Iss. 10. P. 19–28. DOI: https://doi.org/10.46338/ijetae1022_03.

89. Sacks R., Brilakis I., Pikas E., Xie H. S., Girolami M. Construction with digital twin information systems. Data-Centric Engineering. 2020. Vol. 1. Art. e14. DOI: https://doi.org/10.1017/dce.2020.16.

90. Sacks R., Koskela L., Dave B. A., Owen R. Interaction of Lean and Building Information Modeling in Construction. Journal of Construction

Engineering and Management. 2010. Vol. 136, No. 9. P. 968–980. DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000203.

91. Sebastian R., van Berlo L. Tool for benchmarking BIM performance of design, engineering and construction firms in the Netherlands. Architectural Engineering and Design Management. 2010. Vol. 6, No. 4. P. 254–263. DOI: https://doi.org/10.3763/aedm.2010.IDDS3.

92. Shannon C. E. A Mathematical Theory of Communication. The Bell System Technical Journal. 1948. Vol. 27, No. 3. P. 379–423. DOI: https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x.

93. Shou W., Wang J., Wang X., Chong H. Y. A Comparative Review of Building Information Modelling Implementation in Building and Infrastructure Industries. Archives of Computational Methods in Engineering. 2015. Vol. 22, No. 2. P. 291–308. DOI: https://doi.org/10.1007/s11831-014-9125-9.

94. Smith D. K., Tardif M. Building Information Modeling: A Strategic Implementation Guide for Architects, Engineers, Constructors, and Real Estate Asset Managers. Hoboken : Wiley, 2009. 216 p. URL: https://www.wiley.com/en-us/Building+Information+Modeling-p-9780470250037.

95. Smith P. BIM Implementation – Global Strategies. Procedia Engineering. 2014. Vol. 85. P. 482–492. DOI: https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.575.

96. Soleymani M., Bonyani M., Attarzadeh M. Autonomous Resource Management in Construction Companies Using Deep Reinforcement Learning Based on IoT. arXiv. 2022. URL: https://arxiv.org/abs/2208.08087.

97. Solihin W., Eastman C. Classification of rules for automated BIM rule checking development. Automation in Construction. 2015. Vol. 53. P. 69–82. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.03.003.

98. Stanley R., Thurnell D. The benefits of, and barriers to, implementation of 5D BIM for quantity surveying in New Zealand. Australasian Journal of Construction Economics and Building. 2014. Vol. 14, No. 1. P. 105–117. DOI: https://doi.org/10.5130/ajceb.v14i1.3786.

99. Succar B. Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders. Automation in Construction. 2009. Vol. 18, No. 3. P. 357–375. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.10.003.

100. Succar B., Kassem M. Macro-BIM adoption: Conceptual structures. Automation in Construction. 2015. Vol. 57. P. 64–79. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.04.018.

101. Succar B., Sher W., Williams A. Measuring BIM performance: Five metrics. Architectural Engineering and Design Management. 2012. Vol. 8, No. 2. P. 120–142. DOI: https://doi.org/10.1080/17452007.2012.659506.

102. Heaton J., Parlikad A. K., Owens D., Pawsey N. BIM as an Enabler for Digital Transformation. Proceedings of the International Conference on Smart Infrastructure and Construction 2019 (ICSIC). London : ICE Publishing, 2019. P. 49–54. DOI: https://doi.org/10.1680/icsic.64669.049. URL: https://api.repository.cam.ac.uk/server/api/core/bitstreams/7c7c5b56-69d8-4265-bc45-8ae67abd898d/content.

103. Vanhoucke M. Measuring Time: Improving Project Performance Using Earned Value Management. Boston : Springer US, 2009. 164 p. (International Series in Operations Research & Management Science; vol. 136). DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1014-1.

104. Volk R., Stengel J., Schultmann F. Building Information Modeling (BIM) for existing buildings — Literature review and future needs. Automation in Construction. 2014. Vol. 38. P. 109–127. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.023.

105. Waas L., Enjellina. Review of BIM-Based Software in Architectural Design: Graphisoft Archicad vs Autodesk Revit. Journal of Artificial Intelligence in Architecture. 2022. Vol. 1, No. 2. P. 14–22. DOI: https://doi.org/10.24002/jarina.v1i2.6016.

106. Wang J. Exploring Digital Collaboration across Knowledge Boundaries: A Case Study of the BIM-Enabled Construction Project : PhD thesis.

Sheffield : University of Sheffield, 2023. URL: https://etheses.whiterose.ac.uk/id/eprint/26659/.

107. Wang R. Y., Strong D. M. Beyond Accuracy: What Data Quality Means to Data Consumers. Journal of Management Information Systems. 1996. Vol. 12, No. 4. P. 5–33. DOI: https://doi.org/10.1080/07421222.1996.11518099.

108. Won J., Lee G., Dossick C., Messner J. Where to Focus for Successful Adoption of Building Information Modeling within Organization. Journal of Construction Engineering and Management. 2013. Vol. 139, No. 11. Art. 04013014. DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000731.

109. Yashchenko O. F., Makatora D. A., Kubanov R. A., Zinych P. L., Prusov D. E. Theoretical and Methodological Bases for Implementing BIM Technologies in Construction Companies: Essence. Characteristics. Economic Efficiency. Business Inform. 2024. No. 1. P. 167–177. DOI: https://doi.org/10.32983/2222-4459-2024-1-167-177.

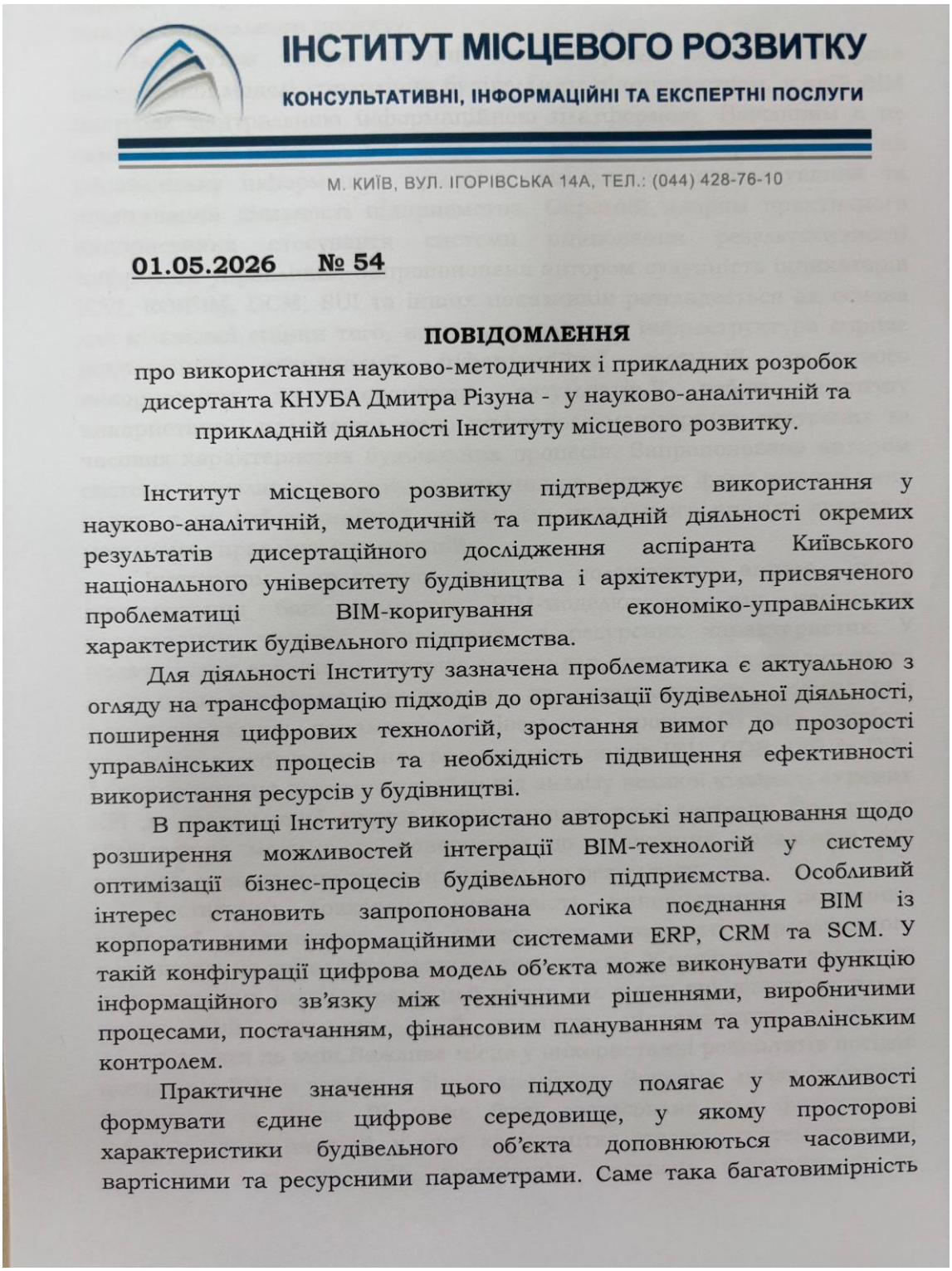
110. Yurchyshyn O. Ya., Stepanets O. V., Skorobogatova N. Ye. Analysis of digital technologies in Ukraine: problems and prospects. CEUR Workshop Proceedings. 2024. Vol. 3781. P. 114–131. URL: https://ceur-ws.org/Vol-3781/paper15.pdf.

111. Zhang S., Teizer J., Lee J.-K., Eastman C. M., Venugopal M. Building Information Modeling (BIM) and Safety: Automatic Safety Checking of Construction Models and Schedules. Automation in Construction. 2013. Vol. 29. P. 183–195. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.05.006.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

ДОВІДКИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ ТА ПОВІДОМЛЕННЯ ПРО ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ



ІНСТИТУТ МІСЦЕВОГО РОЗВИТКУ

КОНСУЛЬТАТИВНІ, ІНФОРМАЦІЙНІ ТА ЕКСПЕРТНІ ПОСЛУГИ

М. КИЇВ, ВУЛ. ІГОРІВСЬКА 14А, ТЕЛ.: (044) 428-76-10

01.05.2026 № 54

ПОВІДОМЛЕННЯ

про використання науково-методичних і прикладних розробок дисертанта КНУБА Дмитра Різуна - у науково-аналітичній та прикладній діяльності Інституту місцевого розвитку.

Інститут місцевого розвитку підтверджує використання у науково-аналітичній, методичній та прикладній діяльності окремих результатів дисертаційного дослідження аспіранта Київського національного університету будівництва і архітектури, присвяченого проблематиці BIM-коригування економіко-управлінських характеристик будівельного підприємства.

Для діяльності Інституту зазначена проблематика є актуальною з огляду на трансформацію підходів до організації будівельної діяльності, поширення цифрових технологій, зростання вимог до прозорості управлінських процесів та необхідність підвищення ефективності використання ресурсів у будівництві.

В практиці Інституту використано авторські напрацювання щодо розширення можливостей інтеграції BIM-технологій у систему оптимізації бізнес-процесів будівельного підприємства. Особливий інтерес становить запропонована логіка поєднання BIM із корпоративними інформаційними системами ERP, CRM та SCM. У такій конфігурації цифрова модель об'єкта може виконувати функцію інформаційного зв'язку між технічними рішеннями, виробничими процесами, постачанням, фінансовим плануванням та управлінським контролем.

Практичне значення цього підходу полягає у можливості формувати єдине цифрове середовище, у якому просторові характеристики будівельного об'єкта доповнюються часовими, вартісними та ресурсними параметрами. Саме така багатовимірність

створює передумови для переходу від інформаційного супроводу окремих операцій до комплексного цифрового управління життєвим циклом будівельного проєкту.

Інститутом також використано авторське бачення цифрово інтегрованої моделі управління будівельним підприємством, у якій BIM виступає центральною інформаційною платформою. Важливим є не саме по собі накопичення цифрових даних, а їх перетворення на управлінську інформацію, придатну для аналізу, прогнозування та коригування діяльності підприємства. Окремий напрям практичного використання стосувався системи оцінювання результативності цифрового управління. Запропонована автором сукупність індикаторів ICVI, ROIBIM, DCM, SUI та інших показників розглядається як основа для кількісної оцінки того, наскільки цифрова інфраструктура сприяє покращенню координації, інформаційної взаємодії, ресурсного використання та економічних результатів.У роботі Інституту використано і положення щодо цифрового моніторингу ресурсних та часових характеристик будівельних процесів. Запропонована автором система дозволяє розглядати відхилення не лише як факт невиконання плану, а як інформаційний сигнал для подальшого аналізу причин і можливих управлінських реакцій.

Інститутом враховано також положення автора щодо використання багатовимірного BIM-моделювання для поєднання просторових, часових, фінансових та ресурсних характеристик. У практичному аспекті це створює основу для переходу від традиційного календарно-вартісного контролю до комплексного оцінювання взаємопов'язаних параметрів будівельного проєкту.Окрему цінність становить застосування інтегральних показників IEU, CDR, IRR та CIE. Їх використання дозволяє перейти від аналізу великої кількості окремих KPI до узагальненої оцінки стану управлінської системи. При цьому зберігається можливість повернення до первинних показників для встановлення причин зміни інтегрального результату.

Інститутом враховано можливість використання показника цифрової реактивності для оцінювання швидкості управлінського реагування на зміни у проєктному середовищі. У поєднанні з часовими та ресурсними індикаторами цей підхід дає змогу оцінювати не тільки економічний результат, а й здатність підприємства своєчасно адаптуватися до змін.Важливе місце у використанні результатів посідає поєднання BIM із засобами бізнес-аналітики. Зокрема, логіка інтеграції BIM-даних із Power BI може бути застосована для формування інформаційних панелей, у яких керівництво отримує систематизовані дані про стан проєктів, відхилення, ресурсне забезпечення та

економічні результати. Це сприяє скороченню інформаційного циклу між появою відхилення та підготовкою управлінського рішення.

Авторські напрацювання також використовувалися при опрацюванні питань, пов'язаних із цифровою трансформацією бізнес-процесів будівельних підприємств. Практичний інтерес становить запропонована послідовність цифрового переходу від пілотного використання BIM до інтеграції функціональних процесів, масштабування аналітики та системного коригування економіко-управлінських характеристик підприємства.Практична спрямованість авторських розробок проявляється також у можливості застосування їх для оцінювання ефекту цифрової трансформації. Зокрема, інтегровані індикатори дозволяють пов'язувати зміни у цифровому середовищі з економічними результатами, а сценарний інструментарій — визначати можливі наслідки різних варіантів управлінського впливу.

Інститут вважає перспективним використання запропонованих підходів для аналітичного супроводу інвестиційно-будівельних проєктів, оцінювання ефективності цифровізації будівельних підприємств, порівняльного аналізу організаційних моделей управління та підготовки рекомендацій щодо підвищення ефективності ресурсного забезпечення.Узагальнюючи результати практичного використання, слід зазначити, що авторські розробки створюють цілісну логіку BIM-коригування економіко-управлінських характеристик будівельного підприємства. Її особливістю є поєднання цифрової інформаційної моделі, системи економічних та управлінських показників, процедур верифікації даних, сценарного моделювання, прогнозування та механізмів оперативного коригування.

Таким чином, Інститут місцевого розвитку підтверджує практичну придатність використаних авторських розробок для науково-аналітичної, методичної та прикладної роботи у сфері будівництва. Їх подальше застосування може бути спрямоване на розвиток цифрових моделей управління будівельними підприємствами, підвищення якості інформаційного забезпечення економічних рішень, оптимізацію бізнес-процесів та формування більш адаптивних механізмів управління інвестиційно-будівельною діяльністю.

Виконавчий директор
Д.е.н., доцент **Руслан ТОРМОСОВ**

"ІНСТИТУТ МІСЦЕВОГО РОЗВИТКУ"
Ідентифікаційний код 26581632

МАРСТОН-ГРУП

№ 65-1 від 12.05.2026

ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційного дослідження

Різуна Дмитра Юрійовича

на тему «BIM-орієнтований економіко-управлінський інструментарій цифрової трансформації будівельного підприємства», поданого на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 051 «Економіка» галузі знань 05 «Соціальні та поведінкові науки»

Компанія «Марстон-Груп» підтверджує використання у власній діяльності окремих методичних і прикладних напрацювань, сформованих аспірантом Київського національного університету будівництва і архітектури Різуном Дмитром Юрійовичем в межах дисертаційного дослідження, присвяченого розробленню BIM-орієнтованого економіко-управлінського інструментарію цифрової трансформації будівельного підприємства.

Практичний інтерес компанії до запропонованих автором рішень визначався необхідністю забезпечення більш тісного зв'язку між цифровою інформацією про будівельний об'єкт і системою управління підприємством. У цьому контексті BIM розглядається не лише як засіб тривимірного представлення об'єкта, а як інформаційне ядро, навколо якого можуть синхронізуватися планові, фінансові, ресурсні, календарні та організаційні процеси.

Компанією використано авторський підхід до побудови цифрово інтегрованої системи управління, у якій інформаційна модель пов'язується з корпоративними управлінськими системами. Така побудова забезпечує взаємодію BIM із ERP-, CRM- та SCM-рішеннями, а також із програмними засобами календарного планування й аналітичними платформами. Практичний результат полягає у створенні узгодженого інформаційного простору, де дані щодо обсягів, ресурсів, вартості та строків можуть використовуватися різними функціональними підрозділами без їх багаторазового ручного дублювання.

Важливим для «Марстон-Груп» стало застосування запропонованої автором логіки єдиного цифрового середовища даних. У межах такої організації інформації цифрова модель використовується як спільна база для координації дій учасників проєкту. Це підвищує прозорість обміну інформацією та зменшує ймовірність виникнення розбіжностей між технічними, кошторисними, календарними й управлінськими документами. Компанією використано наступні авторські суттєві

поліпшення, які стосувалися системи оцінювання результативності цифрового управління. Зокрема, застосовано групу взаємопов'язаних показників, призначених для характеристики інформаційної цінності цифрового середовища, економічної віддачі BIM-інвестицій, рівня координації, швидкості інформаційного оновлення та здатності управлінської системи реагувати на зміни. Такий підхід дозволив розглядати цифровізацію не як самостійну технологічну інвестицію, а як інструмент, ефект від якого повинен проявлятися у конкретних змінах організації управління, використання ресурсів, строків виконання та економічних результатів. Для внутрішнього аналізу компанії це створило можливість зіставляти витрати на цифрову інфраструктуру з отриманими організаційними та економічними перевагами.

Окремий напрям використання авторських результатів стосувався перевірки якості інформації цифрової моделі. Компанія адаптувала запропоновану процедуру багаторівневого контролю, за якою дані послідовно перевіряються на повноту, логічну узгодженість, відповідність встановленим правилам та придатність для подальшого використання в управлінських розрахунках.

Практично це означало перехід від загального контролю наявності BIM-моделі до перевірки того, наскільки інформація, що міститься в ній, може бути використана для конкретної управлінської процедури. Такий підхід особливо важливий для кошторисного аналізу, календарного планування, контролю ресурсів і прогнозування фінансових наслідків відхилень.

Корисним для компанії виявилося і застосування ризик-орієнтованої перевірки цифрових даних. Пріоритет надавався інформації, потенційна помилка в якій могла мати найбільший вплив на вартість або строки проєкту. Це дало можливість раціоналізувати контрольні процедури та спрямувати аналітичні ресурси на найбільш критичні позиції.

У діяльності «Марстон-Груп» використано також авторський підхід до цифрового моніторингу часових і ресурсних параметрів. Його практична сутність полягає у постійному зіставленні запланованих і фактичних значень, встановленні причин відхилень та формуванні підстав для коригування управлінських рішень. При цьому BIM-дані можуть доповнюватися інформацією з облікових та управлінських систем, що створює більш повну картину фактичного стану проєкту.

Для підтримки зазначених процедур компанією використано логіку авторського восьмиетапного алгоритму аналітичних процедур. У практичній адаптації він передбачає послідовне формування інформаційної бази, приведення показників до порівнянного вигляду, визначення інтегральних оцінок, сценарне опрацювання варіантів, прогнозування, аналіз відхилень, вибір управлінської дії та повторний моніторинг результатів.

Особливо важливим є те, що останній етап алгоритму передбачає повернення до цифрового середовища після прийняття управлінського рішення. Таким чином, управлінський цикл не завершується формуванням аналітичного звіту, а продовжується перевіркою фактичного ефекту від прийнятих рішень.

Практичну цінність для компанії становить також поєднання BIM із інструментами бізнес-аналітики. Використання інтегрованих інформаційних панелей дозволяє представляти керівництву не розрізнені масиви даних, а систематизовані показники щодо виконання робіт, ресурсів, витрат, строків і прогнозованих відхилень. Це підвищує оперативність управлінського реагування та створює передумови для більш обґрунтованого вибору між альтернативними сценаріями.

За результатами використання авторських розробок у практиці діяльності «Марстон-Груп» та завдяки застосуванню запропонованого інструментарію коригування характеристик діяльності будівельних підприємств упродовж річної програми виконання компанією проєктів і робіт було зафіксовано позитивні зміни показників витрат і ресурсовіддачі.

Зокрема, зниження собівартості виконання проєктів і робіт компанія пов'язує насамперед із більш узгодженим плануванням ресурсів, своєчасним виявленням відхилень та зменшенням непродуктивних витрат, а скорочення витрат на супровід проєктів і робіт – із кращою координацією інформаційних потоків, скороченням дублювання аналітичних процедур і підвищенням оперативності управлінського контролю.

Підвищення ресурсовіддачі компанія пов'язує з більш системним використанням цифрової інформації для планування, контролю та коригування виконання проєктів.

Таким чином, практична адаптація авторських розробок дала змогу «Марстон-Груп» посилити взаємозв'язок між BIM-даними та економіко-управлінськими процедурами, підвищити прозорість інформаційних потоків, оптимізувати контроль ресурсів і створити більш надійну основу для оперативного коригування параметрів реалізації будівельних проєктів.

Компанія «Марстон-Груп» вважає доцільним подальше використання зазначених розробок у частині цифрової інтеграції інформаційних систем, контролю достовірності BIM-даних, аналітичного моніторингу ресурсів і строків, сценарного моделювання та оцінювання одержаної результативності управлінських рішень.

Директор
ТОВ «Марстон-Груп» **О.О. Міронов**

Товариство з обмеженою відповідальністю «МАРСТОН ГРУП» Ідентифікаційний код 41129232 УКРАЇНА м. КИЇВ

АЛЬФА-СЕРВІС
будівельна фірма

14.04.2026 № 75

ДОВІДКА ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ
результатів дисертаційного дослідження
Різуна Дмитра Юрійовича

на тему «BIM-орієнтований економіко-управлінський інструментарій цифрової трансформації будівельного підприємства», поданого на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 051 «Економіка» галузі знань 05 «Соціальні та поведінкові науки», у діяльності ТОВ «Будівельна фірма «Альфа-Сервіс»»

ТОВ «Будівельна фірма «Альфа-Сервіс»» (далі – компанія «Альфа-Сервіс») підтверджує практичне використання окремих результатів дисертаційної роботи аспіранта Київського національного університету будівництва і архітектури Різуна Д. Ю., присвяченої розробленню BIM-орієнтованого економіко-управлінського інструментарію цифрової трансформації будівельного підприємства.

Необхідність використання запропонованих автором підходів у діяльності компанії була пов'язана з потребою підвищення узгодженості між техніко-технологічними параметрами будівельних проєктів та економічними показниками їх реалізації. Практичний інтерес становила можливість використовувати інформаційну модель не лише для координації проєктних рішень, а й як джерело оперативної інформації для контролю строків, ресурсів, витрат, продуктивності та результативності управлінських дій.

Компанія вбачає, що провідною інновацією автора, яку доцільно використовувати на користь будівельних підприємств, є поєднання BIM-моделі з системою економіко-управлінської аналітики, за якого зміни у цифровій моделі можуть бути безпосередньо пов'язані з відповідними змінами у планових, ресурсних, часових та фінансових характеристиках проєкту. Такий підхід дозволив перейти від відокремленого аналізу технічних і економічних параметрів до їх комплексного розгляду в єдиному цифровому середовищі.

У роботі компанії використано авторські рішення щодо формування системи цифрових показників оцінювання результативності управління. Зокрема, застосовувалася логіка формування інтегрованих оцінок на основі часткових KPI, що характеризують виконання робіт, ресурсне забезпечення, дотримання календарних параметрів, витрати та економічну віддачу управлінських рішень. Це дало змогу систематизувати значний масив інформації та зробити її придатнішою для оперативного контролю керівниками проєктів.

Суттєвим для практики компанії стало використання авторського підходу до цифрової діагностики ефективності управлінських рішень. В його основу покладено послідовне проходження декількох аналітичних процедур: формування цифрової бази даних, приведення показників до зіставного вигляду, розрахунок інтегральних оцінок, моделювання можливих сценаріїв, прогнозування результатів, виявлення відхилень, вибір доцільного варіанта управлінського реагування та подальше оновлення показників за фактичними результатами.

Практична цінність такого алгоритму для компанії «Альфа-Сервіс» полягає в тому, що управлінська інформація стала формуватися не після завершення окремих етапів робіт, а в процесі їх виконання. Це дозволило швидше виявляти відхилення між запланованими та фактичними обсягами, своєчасніше оцінювати наслідки зміни ресурсного забезпечення та коригувати календарні й економічні параметри реалізації проєктів.

Компанією використано також запропонований автором підхід до аналітичної перевірки BIM-даних. У практичній роботі він був адаптований до внутрішньої процедури контролю інформації перед її використанням для управлінських розрахунків. Особливу увагу приділено повноті, актуальності та узгодженості даних цифрової моделі. Такий контроль зменшив ризик використання застарілих або суперечливих відомостей при формуванні кошторисних, календарних та ресурсних рішень.

Окремий практичний ефект забезпечило застосування авторської логіки ризик-орієнтованого визначення пріоритетності перевірок. Насамперед контролювалися ті інформаційні позиції, помилки в яких могли мати найбільший вплив на вартість, строки або ресурсне забезпечення робіт. Це дало змогу раціональніше використовувати час фахівців і не перевантажувати процес перевірки другорядними операціями.

У роботі компанії також використано підхід до інтеграції BIM-інформації з управлінською аналітикою та візуальним представленням ключових показників. Завдяки цьому керівники проєктів отримали можливість оперативно порівнювати планові та фактичні значення, відстежувати динаміку основних параметрів і визначати ділянки, що потребують першочергового управлінського втручання.

Особливо корисним виявилося застосування сценарного аналізу. Для проблемних ділянок проєктів розглядалися декілька варіантів подальших дій з оцінюванням їх можливого впливу на строки, ресурси та витрати. Це дозволило змістити управлінську практику від реагування на вже сформовані негативні результати до попередньої оцінки можливих наслідків прийнятих рішень.

За результатами практичного використання авторських розробок компанією проведено оцінювання змін основних показників діяльності за річною програмою виконуваних проєктів та робіт. Порівняння відповідних періодів засвідчило позитивну динаміку як техніко-організаційних, так і економічних характеристик. За оцінкою компанії, використання BIM-аналітичного інструментарію сприяло скороченню середньої тривалості підготовки управлінських рішень на 17,6 %, зменшенню

кількості повторних коригувань календарних і ресурсних планів на 14,3 %, а середнього часу виявлення критичних відхилень – на 21,5 %.

Водночас за підсумками реалізації річної програми встановлено зниження непродуктивних витрат, пов'язаних із несвоєчасним коригуванням ресурсних і календарних параметрів, на 9,4 %. Сукупна економія за групою контрольованих витрат оцінена компанією на рівні 7,8 %, а приріст операційної ефективності виконання проєктних і будівельних робіт – 8,6 %.

Позитивна динаміка спостерігалася і за показниками використання ресурсів. Застосування цифрового контролю дозволило підвищити точність планування потреби в матеріалах та трудових ресурсах, зменшити кількість випадків несвоєчасного забезпечення окремих видів робіт і підвищити керованість виробничих процесів. За внутрішньою оцінкою компанії, продуктивність використання ресурсів у контрольованій групі проєктів зросла на 10,2 %.

Таким чином, використані в «Альфа-Сервіс» авторські розробки дозволили практично поєднати інформаційне моделювання будівель із системою економічного та організаційно-технологічного контролю. Найбільш вагомим результатом для компанії стало формування цілісного цифрового контуру, у межах якого BIM-інформація використовується не лише для моделювання об'єктів, а й для підтримки поточних управлінських рішень.

Компанія «Альфа-Сервіс» вважає результати дисертаційної роботи придатними для подальшого використання у практиці управління будівельними проєктами, насамперед у частині цифрового моніторингу, інтегрованої оцінки ефективності, сценарного аналізу, контролю ресурсів і своєчасного коригування економіко-управлінських характеристик будівельного підприємства.

Заступник директора ТОВ «БФ «Альфа-Сервіс»
А.М. Кравченко
канд. економ. наук



ДОДАТОК Б

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України (категорія «Б»):

1) Поколенко В. О., Герасимчук Я. Л., Різун Д. Ю., Тищенко М. І., Щербак І. В. Теоретичні засади впровадження BIM-технологій в управлінні будівельними проєктами. Будівельне виробництво. 2025. № 80. С. 62–70. DOI: https://doi.org/10.36750/2524-2555.80.62-70.

(*Особистий внесок здобувача:* обґрунтування економіко-управлінських ефектів впровадження BIM-технологій та їх впливу на показники ефективності управління будівельними проєктами)

2) Різун Д. Ю., Поколенко В. О., Герасимчук Я. Л., Тищенко М. І. Коригування економічних та управлінських характеристик підприємства за допомогою BIM-моделювання. Просторовий розвиток. 2025. № 14. С. 392–403. DOI: https://doi.org/10.32347/2786-7269.2025.14.392-403.

(*Особистий внесок здобувача:* розроблення підходу до BIM-коригування економічних та управлінських характеристик будівельного підприємства і системи показників для оцінювання його результатів)

3) Різун Д. Ю. Механізми аналітичної верифікації даних і управління проєктною інформацією у середовищі BIM. Просторовий розвиток. 2025. № 15. С. 771–782. DOI: https://doi.org/10.32347/2786-7269.2025.15.771-782.

4) Різун Д. Ю. Інтеграція BIM-технологій у стратегію оптимізації бізнес-процесів будівельного підприємства. Шляхи підвищення ефективності будівництва. 2025. № 2 (56). С. 261–274. DOI: https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.56(2).261-274.

5) Різун Д. Ю. Інструментарій цифрового моніторингу ресурсних і часових параметрів за умов динамічної проєктної взаємодії. Шляхи підвищення ефективності будівництва. 2026. № 2 (57). С. 125–138. DOI: https://doi.org/10.32347/2707-501x.2026.57(2).125-138.

6) Чуприна Х. М., Мухін А. А., Різун Д. Ю., Микитченко Б. А. Аналітико-структурний огляд механізмів функціонування територіальних

кластерів у системі державно-приватної взаємодії. Шляхи підвищення ефективності будівництва. 2024. № 2 (54). С. 187–199. DOI: https://doi.org/10.32347/2707-501x.2024.54(2).187-199.

(*Особистий внесок здобувача:* аналіз цифрових засобів інформаційної взаємодії учасників територіальних кластерів, зокрема можливостей BIM-середовища для координації проєктів державно-приватного партнерства)

7) Рижакова Г. М., Білоус Б. В., Цай М. І., Різун Д. Ю. Аналітичне та функціональне оцінювання фінансових параметрів стратегічних інноваційних циклів у будівельних компаніях на основі концепцій method of cost allocation by activities. Шляхи підвищення ефективності будівництва. 2024. № 3 (53). С. 171–188. DOI: https://doi.org/10.32347/2707-501x.2024.53(3).171-188.

(*Особистий внесок здобувача:* обґрунтування використання даних BIM-моделі для розподілу витрат за видами діяльності та оцінювання фінансових параметрів інноваційних циклів будівельних компаній)

8) Петруха Н. М., Омельчук Р. С., Різун Д. Ю., Білоус Б. В., Литарев О. Г. Формування крос-функціональних команд та інші заходи економіко-управлінського реінжинірингу бізнес-процесів в контексті впровадження інноваційних заходів на будівельних підприємствах. Шляхи підвищення ефективності будівництва. 2023. № 3 (52). С. 110–132. DOI: https://doi.org/10.32347/2707-501x.2023.52(3).110-132.

(*Особистий внесок здобувача:* обґрунтування ролі BIM-технологій у формуванні крос-функціональних команд і реінжинірингу бізнес-процесів будівельних підприємств)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації: тези доповідей на конференціях:

9) Малихіна О. М., Різун Д. Ю. Формування цифрових засобів контролю ресурсних і часових параметрів у динамічних умовах проєктної взаємодії. Економіка та підприємництво в умовах сучасних викликів : матеріали IV Всеукр. наук.-практ. конф., 4 черв. 2026 р., м. Житомир.

Житомир : Поліський нац. ун-т, 2026. С. 353–355. URL: http://ir.polissiauniver.edu.ua/handle/123456789/18508.

10) Гроголь В. Я., Різун Д. Ю., Чуприна Х. М. Забезпечення адаптивної поведінки будівельного підприємства в умовах цифровізації та BIM-коригування економіко-управлінських характеристик будівельного підприємства. Актуальні проблеми освітнього процесу в контексті європейського вибору України : матеріали VIII Міжнар. конф. (м. Київ, 12 листоп. 2025 р.). Київ : Ліра-К, 2026. С. 615–617. URL: https://repositary.knuba.edu.ua/handle/123456789/18396.

ДОДАТОК В
ПРОМІЖНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ ВАГОВИХ КОЕФІЦІЄНТІВ МЕТОДОМ ЕНТРОПІЇ

Частки значень часткових показників визначено за даними табл. 3.2 як відношення значення показника в періоді до суми його значень за два періоди, ентропію – за формулою (2.20) для m = 2, вагові коефіцієнти – за формулою (2.21).

Таблиця В.1.

Проміжні величини розрахунку ентропії часткових показників «Альфа-Сервіс» *(розраховано автором)*

Показник	x_{0j}, %	x_{1j}, %	p_{1j}	p_{2j}	$p_{1j} \cdot \ln p_{1j}$	$p_{2j} \cdot \ln p_{2j}$	E_j
X_1	100,0	82,4	0,5482	0,4518	−0,3295	−0,3590	0,99327
X_2	100,0	85,7	0,5385	0,4615	−0,3333	−0,3569	0,99572
X_3	100,0	78,5	0,5602	0,4398	−0,3246	−0,3613	0,98951
X_4	100,0	90,6	0,5247	0,4753	−0,3384	−0,3535	0,99824
X_5	100,0	92,2	0,5203	0,4797	−0,3399	−0,3524	0,99881
X_6	100,0	108,6	0,4794	0,5206	−0,3525	−0,3398	0,99877
X_7	100,0	110,2	0,4757	0,5243	−0,3534	−0,3385	0,99830

ДОДАТОК Г

РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ ЧУТЛИВОСТІ ІНДЕКСУ IEU ДО ЗМІНИ ВАГОВИХ КОЕФІЦІЄНТІВ

Для кожного часткового показника ваговий коефіцієнт змінювався на ±20 % з подальшим приведенням суми вагових коефіцієнтів до одиниці, після чого за формулою (2.16) розраховувався індекс IEU базового періоду. Нормовані значення показників наведено в табл. 3.3. Відхилення є малими, оскільки нормовані значення всіх показників лежать у діапазоні 0,785–0,922 і за будь-яких вагових коефіцієнтів зважене середнє змінюється незначно; результати аналізу свідчать про малу роль зважування за цих даних, а не про стійкість оцінки.

Таблиця Г.1.

Значення індексу IEU базового періоду за варіантами зміни вагових коефіцієнтів *(розраховано автором)*

Показник	w_j	IEU_0 за зниження w_j на 20 %	IEU_0 за підвищення w_j на 20 %	Найбільше відхилення від IEU_0, %
X_1	0,2458	0,8337	0,8328	0,06
X_2	0,1565	0,8325	0,8340	0,09
X_3	0,3833	0,8373	0,8298	0,48
X_4	0,0641	0,8323	0,8342	0,11
X_5	0,0434	0,8325	0,8340	0,09
X_6	0,0448	0,8325	0,8340	0,10
X_7	0,0621	0,8323	0,8342	0,11