

dostupu: https://er.chdtu.edu.ua/bitstream/ChS-TU/1984/6/disser_Veretiuk.pdf

9. Stoyko I. I. Upravlinnya innovatsiyamy: metodychny posibnyk dlya samostiyanoi roboty. Ternopil's'kyy NTU, 2018. [Elektronnyy resurs] – Rezhym dostupu: <https://kaf-mp.tntu.edu.ua/wp-content/uploads/2020/10/ui-posibnyk.pdf>

10. Kh.M.Chupryna, Yu.A. Chupryna, M.V. Boro-davko, D.V. Hrabchak. Strukturno-kohnityvnoho mod-elyuvannya protsesiv upravlinnya intelektualizatsiyeyu budivel'nykh pidpryyemstv// «Formuvannya rynkovykh vidnosyn v ukrayini»// 2020. – № 5 (228). – s. 89–98

11. Lokuge S., Sedera D. Enterprise System Lifecycle wide Innovation. ArXiv, 2020. – Rezhym dostupu: <https://arxiv.org/abs/2006.10237>

12. Iastremska O. I. et al. Management of Innovative Projects to Ensure Innovative Development of En-

terprises. Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries, 2024. [Elektronnyy resurs] – Rezhym dostupu: <https://repository.hneu.edu.ua/bitstream/123456789/34622/1/KhIRE.pdf>

Дані про автора

Долгополов Володимир Юрійович,

аспірант Київського національного університету будівництва і архітектури

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8656-098X>

email: dvylawyer@gmail.com

Data about the author

Volodymyr Dolhopolov,

Postgraduate student at Kyiv National University of Construction and Architecture

email: dvylawyer@gmail.com

<https://doi.org/10.5281/zenodo.18853414>

РІЗУН Д. Ю.

Побудова цифрової інфраструктури управління будівельними підприємствами на основі BIM–моделювання

Предметом дослідження є процес побудови цифрової інфраструктури управління будівельними підприємствами з використанням технологій BIM (Building Information Modeling). Дослідження охоплює теоретичні, технічні та організаційно–економічні аспекти впровадження BIM як центрального елемента цифрової архітектури підприємства. Основна увага приділяється створенню інтегрованого середовища управління, у якому об'єднуються всі процеси — від проектування до експлуатації — через єдину інформаційну платформу. У фокусі перебувають питання формування інформаційних контурів, інтеграції BIM із ERP, CRM, SCM та аналітичними системами Business Intelligence, а також визначення показників ефективності цифрової синхронізації даних. Предметом також є оцінка впливу BIM на організаційну структуру підприємства, його економічну стійкість, продуктивність і здатність до адаптації в умовах цифрової трансформації галузі.

Метою статті є обґрунтування наукових і методичних засад побудови цифрової інфраструктури управління будівельними підприємствами на основі BIM–моделювання. Автор ставить завдання розробити модель інтеграції інформаційних потоків, яка забезпечить наскрізний контроль за процесами проектування, ресурсного планування, виконання робіт і моніторингу ефективності. Головна мета полягає у створенні теоретичного підґрунтя для переходу від фрагментованих управлінських систем до цілісної цифрової архітектури, яка дозволяє підвищити точність планування, прозорість операцій і результативність управлінських рішень у реальному часі.

Методологія проведення роботи. Методологічною основою дослідження є системний та інформаційно–архітектурний підходи, які дозволяють розглядати BIM як ядро управлінської екосистеми. У роботі застосовано методи структурного аналізу для моделювання взаємозв'язків між цифровими модулями, аналітичного порівняння — для оцінки ефективності BIM відносно традиційних інструментів управління, та імітаційного моделювання — для аналізу реактивності цифрової інфраструктури на зовнішні впливи.

Застосовано формалізовані аналітичні індикатори (ICVI, ROIBIM, DCM, USI), що вимірюють приріст інформаційної цінності, економічну віддачу та ступінь цифрової узгодженості між системами. Для прогнозування ефективності впровадження використано методи сценарного аналізу, мультиагентного моделювання та обробки даних у середовищах ERP і BI. Також залучено елемен-

ти концепцій *Lean Construction* і *Digital Twin* для визначення механізмів саморегуляції цифрової системи управління. Методологія передбачає багаторівневу інтеграцію технічних, економічних і управлінських чинників, що забезпечує комплексність дослідження і його прикладну цінність.

Результати роботи. У результаті дослідження сформовано архітектурну модель цифрової інфраструктури управління будівельним підприємством із BIM-ядром. Вона передбачає поділ системи на кілька інформаційних контурів — геометричний (3D/4D), економічний (5D), управлінський (ERP, CRM, SCM) та аналітичний (BI, IoT, Digital Twin). Для кожного з них визначено параметри інтеграції, алгоритми обміну даними та ключові показники ефективності. Розроблено формули для кількісного вимірювання ступеня цифрової узгодженості, реактивності системи й ризик-адаптованої вартості проєктів. Отримані результати свідчать, що впровадження BIM-моделювання підвищує продуктивність управління на 15–25%, скорочує непродуктивні витрати на 10–20% та зменшує час реалізації проєктів у середньому на 12–18%. Запропонована модель забезпечує можливість побудови «розумного підприємства», у якому рішення приймаються на основі даних, а не інтуїції, а цифрова інфраструктура стає стратегічним активом компанії.

Висновки. Побудова цифрової інфраструктури управління будівельними підприємствами на основі BIM-моделювання є ключовим етапом переходу галузі до ери інтегрованого цифрового менеджменту. BIM виступає не лише інструментом візуалізації об'єктів, а повноцінним аналітичним ядром, що забезпечує координацію технічних, економічних і організаційних процесів у режимі реального часу. Інтеграція BIM із ERP, CRM, SCM і BI-системами формує єдину екосистему управління, де інформація циркулює безперервно, а управлінські рішення базуються на актуальних даних. Розроблені аналітичні індикатори ICVI, ROIBIM і DCM дозволяють кількісно оцінювати приріст ефективності, рівень цифрової синхронізації та економічну віддачу від впровадження моделі. Впровадження IoT, штучного інтелекту та Big Data-платформ посилює аналітичні можливості системи, забезпечуючи прогнозування ризиків, оптимізацію ресурсів і адаптацію до змін зовнішнього середовища. У підсумку, побудова цифрової архітектури управління на основі BIM сприяє переходу від реактивного до проактивного управління, зменшує ризики дестабілізації, підвищує точність планування та забезпечує конкурентні переваги будівельних підприємств у глобальному ринку.

Ключові слова: BIM, цифрова інфраструктура, управління будівельним підприємством, цифровий двійник, ERP, аналітика, інтеграція систем, ефективність, цифрова трансформація.

DMYTRO RIZUN

Building digital management infrastructure for construction enterprises based on BIM modeling

The subject of this study is the process of developing a digital management infrastructure for construction enterprises using Building Information Modeling (BIM) technologies. The research covers theoretical, technical, and organizational-economic aspects of implementing BIM as the central element of an enterprise's digital architecture. The main focus is on creating an integrated management environment in which all processes—from design to operation—are unified through a single information platform. The study addresses issues of forming information circuits, integrating BIM with ERP, CRM, SCM, and Business Intelligence systems, as well as defining performance indicators for digital data synchronization. The subject also includes assessing BIM's impact on the organizational structure, economic stability, productivity, and adaptability of construction enterprises under conditions of digital transformation in the industry.

The purpose of this article is to substantiate the scientific and methodological foundations for building a digital management infrastructure for construction enterprises based on BIM modeling. The author aims to develop a model for integrating information flows that ensures end-to-end control over design, resource planning, project execution, and performance monitoring processes. The primary goal is to establish a theoretical basis for transitioning from fragmented management systems to a holistic digital architecture that enhances planning accuracy, operational transparency, and decision-making effectiveness in real time.

Research Methodology. The methodological framework of the study is based on system and

information–architectural approaches, which make it possible to view BIM as the core of a managerial ecosystem. Structural analysis methods were used to model relationships between digital modules, analytical comparison was applied to assess the efficiency of BIM compared to traditional management tools, and simulation modeling was used to analyze the reactivity of the digital infrastructure to external influences.

Formalized analytical indicators (ICVI, ROIBIM, DCM, USI) were applied to measure information value growth, economic return, and the degree of digital consistency between systems. To forecast implementation efficiency, scenario analysis, multi–agent modeling, and data processing in ERP and BI environments were employed. Elements of the Lean Construction and Digital Twin concepts were also used to define self–regulation mechanisms of the digital management system. The methodology assumes multi–level integration of technical, economic, and managerial factors, ensuring the comprehensiveness and practical value of the research.

Research Results. The study resulted in the development of an architectural model for a digital management infrastructure for construction enterprises with BIM as its core. The model divides the system into several information circuits—geometric (3D/4D), economic (5D), managerial (ERP, CRM, SCM), and analytical (BI, IoT, Digital Twin). For each circuit, integration parameters, data exchange algorithms, and key performance indicators were defined. Formulas were developed for quantitatively measuring the degree of digital consistency, system responsiveness, and risk–adjusted project cost. The findings indicate that implementing BIM modeling increases management productivity by 15–25%, reduces unproductive expenses by 10–20%, and shortens project implementation time by an average of 12–18%. The proposed model enables the creation of a «smart enterprise» in which decisions are made based on data rather than intuition, and digital infrastructure becomes a strategic asset of the company.

Conclusions. Building a digital management infrastructure for construction enterprises based on BIM modeling is a crucial stage in the industry's transition to the era of integrated digital management. BIM serves not only as a visualization tool but as a comprehensive analytical core that ensures the coordination of technical, economic, and organizational processes in real time.

The integration of BIM with ERP, CRM, SCM, and BI systems creates a unified management ecosystem in which information circulates continuously, and managerial decisions are based on up–to–date data. The developed analytical indicators—ICVI, ROIBIM, and DCM—allow for the quantitative assessment of efficiency gains, levels of digital synchronization, and the economic return from implementing the model. The incorporation of IoT, artificial intelligence, and Big Data platforms enhances the analytical capabilities of the system, enabling risk forecasting, resource optimization, and adaptation to external changes.

Ultimately, building a digital management architecture based on BIM promotes a shift from reactive to proactive management, reduces destabilization risks, improves planning accuracy, and strengthens the competitive advantages of construction enterprises in the global market.

Keywords: BIM, digital infrastructure, construction enterprise management, digital twin, ERP, analytics, system integration, efficiency, digital transformation.

Постановка проблеми. Сучасний будівельний сектор переживає етап глибокої цифрової трансформації, де ключовим фактором ефективності стає здатність підприємств до інтеграції цифрових технологій у всі управлінські процеси. Одним із найперспективніших інструментів цієї трансформації є технологія Building Information Modeling (BIM), яка дозволяє об'єднати архітектурні, інженерні, економічні та управлінські аспекти діяльності в єдину цифрову систему. Проте більшість будівельних компаній досі використовують фрагментовані інформаційні системи, що не

забезпечують наскрізного обміну даними між підрозділами, проектами й учасниками процесу. Це призводить до втрат інформації, дублювання операцій, неузгодженості планів і збільшення витрат.

Основна проблема полягає у відсутності цілісної цифрової інфраструктури управління, яка б об'єднавала BIM із ERP, CRM, SCM, IoT та аналітичними платформами Business Intelligence. Така інтеграція дозволяє перейти від реактивного до проактивного управління, коли рішення приймаються на основі даних, а не досвіду чи інтуїції. Крім того, будівельна галузь стикається з низьким рівнем

цифрової зрілості, браком кваліфікованих фахівців у сфері BIM–технологій та відсутністю стандартизованих методик оцінки економічної ефективності їх впровадження. У зв'язку з цим постає необхідність наукового обґрунтування принципів побудови цифрової інфраструктури управління будівельними підприємствами, що забезпечує системну інтеграцію, прозорість процесів, оперативність прийняття рішень і підвищення конкурентоспроможності галузі.

Аналіз досліджень і публікацій проблеми.

Питання цифровізації управлінських процесів у будівництві та впровадження BIM–технологій активно досліджуються у світовій і національній науці. Ранні праці McGraw–Hill Construction (2014) та Eastman et al. (2018) заклали методологічні основи BIM як технології інформаційного моделювання будівель, визначивши її як комплексний процес створення та управління даними протягом усього життєвого циклу об'єкта. Подальші дослідження Succar (2019), Volk et al. (2021), Bryde et al. (2022) розвинули концепцію BIM як ключового елементу інтегрованих систем управління, підкресливши її значення у підвищенні точності планування, зменшенні витрат і ризиків.

Європейські та американські дослідження (Azhar, 2017; Kiviniemi, 2020; NIBS, 2023) наголошують на необхідності поєднання BIM із ERP, PLM та аналітичними системами для створення наскрізного інформаційного простору. Такі інтегровані рішення дозволяють здійснювати управління ресурсами, фінансами, логістикою й ризиками у реальному часі. Особливу увагу приділено формуванню стандартів IFC, COBie, ISO 19650, які забезпечують інтероперабельність даних між різними платформами. В українському науковому середовищі питання впровадження BIM розглядаються в контексті модернізації систем управління будівельними підприємствами. Чуприна, Рижаківа, Петренко та Гавриш (2020–2024) досліджують питання економічної ефективності цифровізації, розробки методів оцінки інвестицій у BIM–інфраструктуру та формування цифрових двійників об'єктів. Додатково розглядаються питання поєднання BIM із принципами Lean Construction та Agile Management для забезпечення адаптивності процесів.

Однак попри численні наукові здобутки, більшість робіт не враховують багаторівневу інтеграцію BIM у загальну архітектуру підприємства. Наявні дослідження обмежуються технічним або економічним

аспектом, залишаючи поза увагою системну взаємодію між цифровими модулями управління. Таким чином, існує потреба у створенні науково обґрунтованої моделі побудови цифрової інфраструктури, здатної забезпечити узгодженість, масштабованість і ефективність управлінських процесів на всіх рівнях підприємства.

Виклад основного матеріалу. Управління будівельним підприємством в умовах цифрової трансформації більше не зводиться до планування термінів, кошторисів та взаємодії учасників процесу. Основою новим 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 дозволяє оптимізувати сценарії управління проектом до його початку. Тому BIM не є інструментом візуалізації, а форматом структурування даних із можливістю трансформації на всіх рівнях управління підприємством. У дослідженнях Чака Іствуда та Рафаеля Закса ця модель трактується як основа побудови інтегрованого процесного ланцюга в архітектурі управління будівельним підприємством [1].

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.

Першою складною формулою, яка дозволяє оцінити ефективність BIM у порівнянні з тради-

ційними інструментами, є індекс приросту інформаційної цінності ICVI, який враховує приріст ефективності від переходу до цифрової моделі за формулою 1:

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

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 проектних колізій.

Управлінський вплив BIM на будівельне підприємство можна також оцінити за допомогою моделі ROI цифрової трансформації, адаптованої для BIM-контексту. Формула 2 (ROI_{BIM}) визначає віддачу від інвестицій у BIM-технології з урахуванням економії витрат і підвищення доходу:

$$ROI_{BIM} = \frac{(H_{BIM} - H_{Base}) - (V_{BIM} - V_{Base})}{V_{BIM}}, \quad (2)$$

де H_{BIM} — доходи підприємства після впровадження BIM; H_{Base} — дохід за традиційної моделі; V_{BIM} — відповідно витрати з використанням та без використання BIM. Цей показник дає змогу ухвалювати стратегічні рішення щодо доцільності впровадження BIM на рівні фінансової структури компанії.

Однак ще одним критичним аспектом є управління темпами реалізації та виявлення вузьких місць. У цьому випадку використовується формула 3, коефіцієнт цифрової координованості (DCM) — показник, що демонструє узгодженість цифрової інформації в часі та ресурсах:

$$DCM = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta f_i \times \Delta d_i}{\sum_{i=1}^n f_i \times d_i}, \quad (3)$$

де Δf_i , Δd_i — відхилення за часом і вартістю для i -ої операції, а f_i , d_i — планові значення. Значення $DCM \rightarrow 0$ свідчить про високу ступінь цифрової узгодженості в моделі, що є критично важливим для проектів високої складності.

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 автоматич-

но запускає оновлення пов'язаних процесів — це створює передумови для побудови самонастроюваної системи управління [2].

На концептуальному рівні BIM також поєднується з іншими цифровими підходами — такими як LEAN-концепції, Agile-моделі управління, мультиагентні системи оптимізації. Наприклад, у дослідженнях Ульріха Зіпсе та Маріо Ботти розглядається взаємодія BIM із штучним інтелектом, зокрема в задачах прогнозного аналізу (predictive analytics), де модель на основі зібраних даних прогнозує ризики зриву строків або дефіциту ресурсів.

Побудова цифрової архітектури управління на основі BIM-моделі вимагає не лише інтеграції інформаційних потоків, але й урахування економічних, симулятивних і стратегічних компонентів [3]. Наведений рисунок 1 ілюструє ключові логічні блоки взаємодії BIM як ядра знань із цифровими двійниками, прогнозними модулями, аналітичними панелями та формулами, що вимірюють ефективність та узгодженість управлінських рішень. Формули ICVI, ROI_{BIM} та DCM вбудовані у систему як засоби кількісної оцінки результативності цифрових рішень у будівельному менеджменті.

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 багатопроектною, 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 проектування або контролю, а радше принципово новим способом організації всієї управлінської екосистеми. У центрі цього процесу опиняється побудова цифрової інфраструктури, яка не функціонує як набір окремих програм або інформаційних модулів, а як інтегрована інформаційна архітектура, побудо-

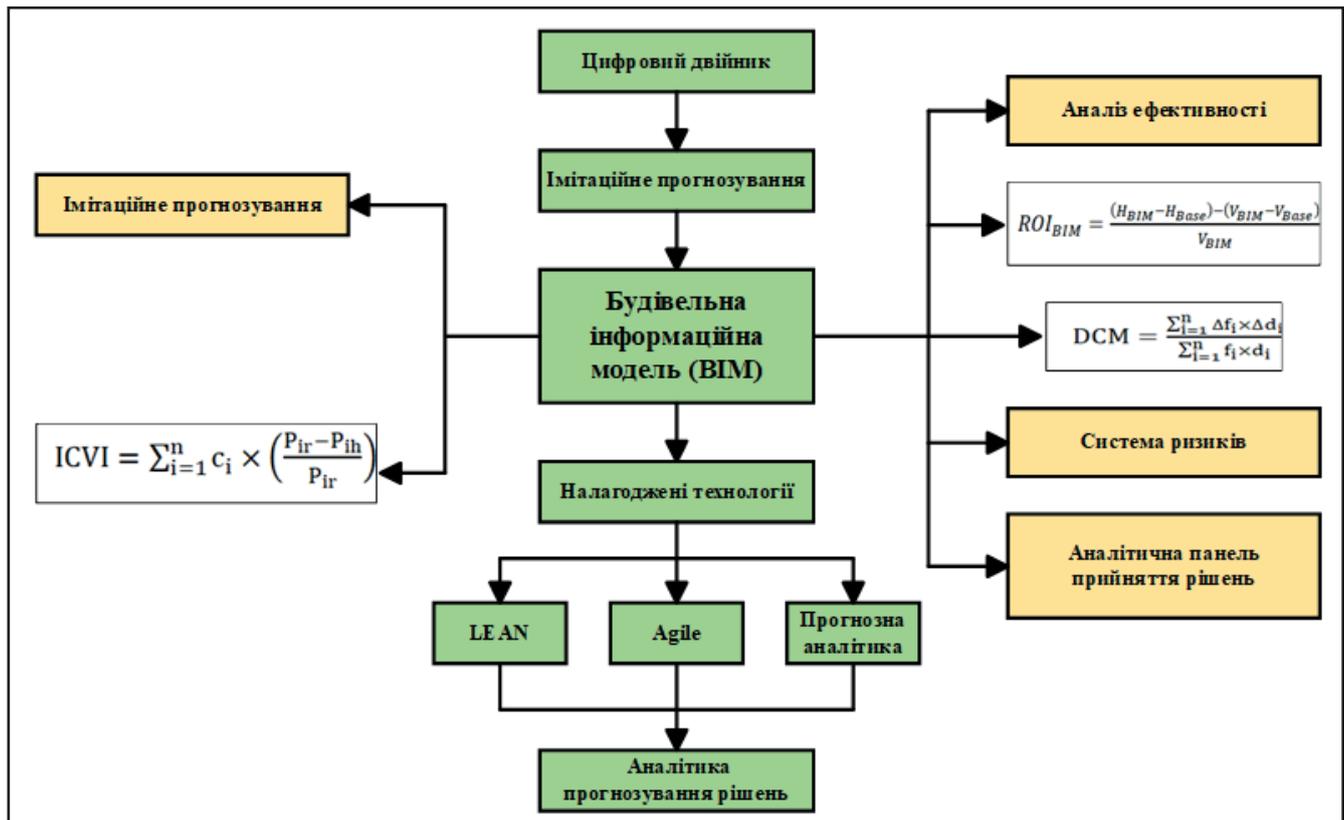


Рисунок 1. Архітектура інформаційного управління будівельним підприємством на основі BIM з формульною підтримкою ефективності

Джерело: розроблено автором на основі [3]

вана на основі наскрізного обміну даними. У цій інфраструктурі ключову роль відіграє BIM-модель, яка, будучи основою багат шарової координації проекту, 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 проектування до логістики, закупівель, контрактингу, моніторингу виконання робіт і експлуатації [4].

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-моделю-

ванням, 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 проектами (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 бу-

ти 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, який дозволяє оцінити, яка частка змін у BIM-моделі була автоматично синхронізована з усіма пов'язаними системами. Цей показник описується наступною формулою 4:

$$DSR = \frac{\sum_{i=1}^n b_i}{\sum_{i=1}^n m_i}, \quad (4)$$

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.

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. Напри-

клад, відділ проектування бачить версію А, кошти-рисники — 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 [5].

Для повноцінного розуміння логіки функціонування цифрової архітектури з BIM-ядром необхідно проаналізувати структурні компоненти, що забезпечують наскрізну взаємодію між інформаційними шарами та управлінськими модулями в реальному часі. Аналіз компонентів представлено на рисунку 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, дозво-

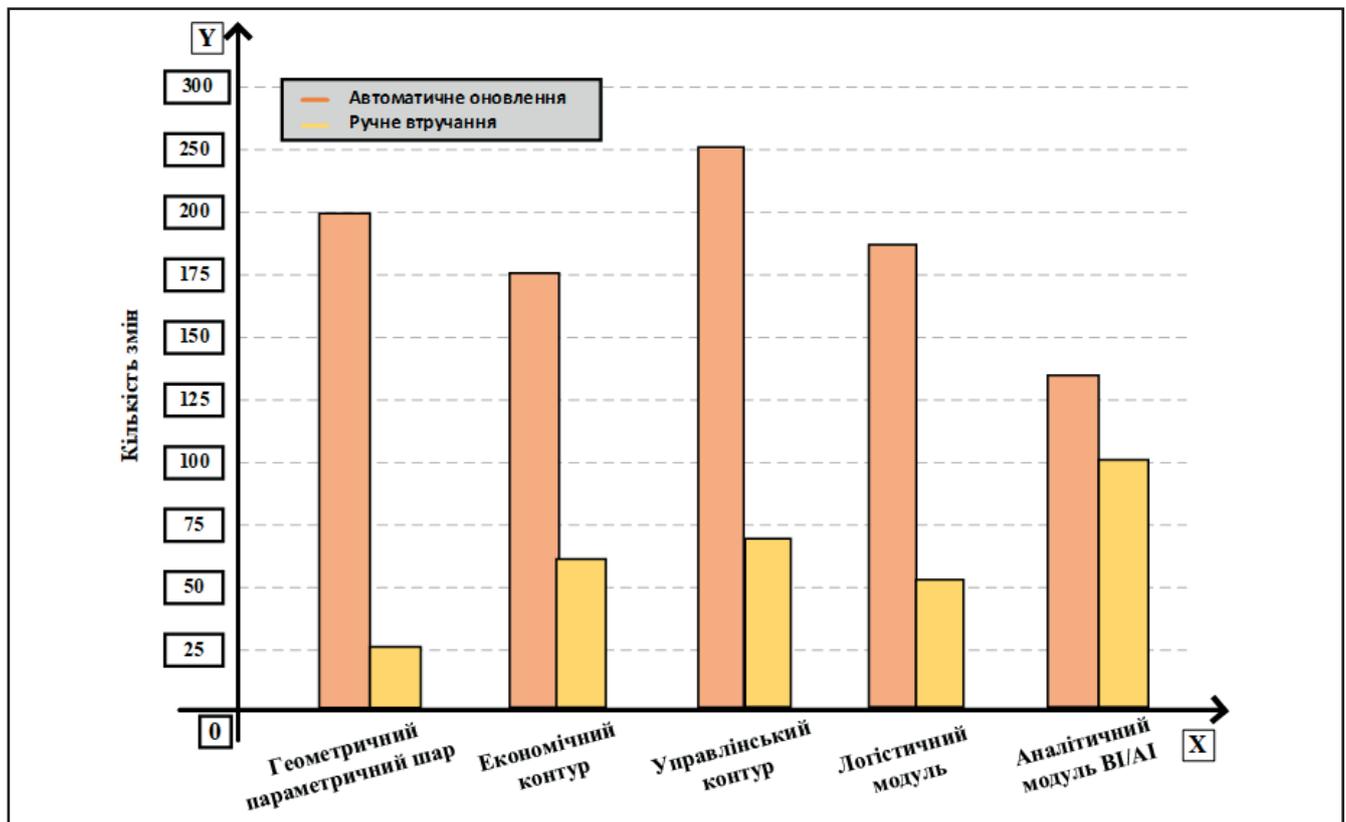


Рисунок 2. Структура цифрової інфраструктури будівельного підприємства з ядром на базі BIM

Джерело: розроблено автором на основі [5]

ляє 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 дозволяє перейти від реактивної до проактивної логіки управління.

Щоб змоделювати здатність такої інфраструктури реагувати на зовнішні збурення, науковці пропонують формулу 5, цифрової реактивності:

$$DRI = \frac{1}{G} \times \sum_{i=1}^n \left(\frac{dB_i}{dS_i} \right), \quad (5)$$

де B_i — реакція системи (зміна графіка, бюджету, замовлень), S_i — величина зовнішнього впливу (наприклад, подорожчання ресурсу, зміна регламенту), G — час від події до системної відповіді. Чим менше G , тим вища реактивність, тим більш адаптивна і конкурентоспроможна інфраструктура. Це критично для складних об'єктів, особливо інфраструктурного типу, які мають багаторічний цикл реалізації та піддаються постійним зовнішнім впливам — політичним, кліматичним, валютним, юридичним.

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 проектів без втрати керованості), розподіленість (сумісна робота в кількох містах, регіонах чи країнах), гнучкість (зміна структури під конкретний тип проекту), зворотна сумісність (підтримка старих форматів, у т.ч. PDF, DWG, DXF, IFC) та прозорість (наявність систем журналювання, цифрових підписів, інтеграції з державними реєстрами) [6].

В основі управління будівельними проектами 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 проекту на довгострокову перспективу [7].

Алгоритми управління на основі BIM починають діяти вже на етапі передпроектного аналізу, де інформаційна модель дозволяє змоделювати різ-

ні 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 проектування. 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 дозволяє зменшити кількість проблем на будівельному майданчику, які в минулі роки виникали через невідповідність проектів. 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 [8].

Сучасне управління будівельними проектами неможливе без поетапної реалізації алгоритмів, що інтегруються у BIM-середовище. У кожному з етапів життєвого циклу проекту алгоритмічна логіка виконує визначальні функції — від аналітики до управлінських рішень, ґрунтуючись на даних цифрової моделі. Нижче представлено таблицю, узагальнення ключових етапів BIM-управління з відповідними алгоритмічними діями та їх результатами.

Алгоритмічна модель стає ще більш складною на стадії реалізації завдяки включенню сен-

Алгоритмічні етапи BIM-управління будівельними проектами

Етап управління	Алгоритмічні дії	Основні результати
Передпроектний аналіз	Моделювання сценаріїв на основі GIS, історичних даних, статистики відхилень і оптимізаційних алгоритмів	Виявлення ризиків, оптимізація ресурсів, формування альтернативних сценаріїв
Проектування	Clash-detection на основі графових структур; координація архітектурної, конструктивної, інженерної документації	Усунення конфліктів у проектах, 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

Джерело: розроблено автором на основі [8]

сорних 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.

У межах такого середовища важливою стає можливість кількісної оцінки рівня управлінського відхилення від запланованих параметрів. Це дозволяє впровадити формулу 6, узагальненого індексу управлінської синхронізації BIM:

$$USI_{BIM} = \frac{1}{n} \sum_{s=1}^n \left(\frac{C_{ri} - C_{ti}}{C_{ri}} + \frac{M_{ri} - M_{ti}}{M_{ri}} \right), \quad (6)$$

де C_{ri} і M_{ri} — заплановані терміни та витрати для i -ого етапу, а C_{ti} і M_{ti} — фактичні. Цей індекс дозволяє відстежити середню величину відхилень за проектом у часово-фінансовому розрізі. Мінімізація USI є одним із головних завдань цифрового контролю.

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 до-

ставки, місце установки. Алгоритми маршрутизації в таких випадках використовують логіку комівояжера (TSP – Traveling Salesman Problem), адаптовану до обмежень календаря проекту [9].

Фінансові алгоритми в BIM-проектах 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 типу аналізу використовується друга складна формула 7, яка описує коефіцієнт ризиково-коригованої вартості етапу проекту:

$$RCV_a = D_a \times \left(1 + \sum_b^m g_{ab} \times k_b \right), \quad (7)$$

де D_a — початкова вартість a -ого етапу, g_{ab} — рівень ризику b -ого типу (наприклад, правовий, технічний, кліматичний), а k_b — ваговий коефіцієнт, що визначає важливість цього типу ризику для конкретного об'єкта. Формула дозволяє отримати ризик-адаптовану вартість і впровадити її у загальний бюджетний план.

Як видно з побудованої схеми, BIM-середовище виконує не лише функцію візуалізації будівельного об'єкта, а й слугує обчислювальним ядром для реалізації керованих алгоритмів в управлінні проектом [10]. Представлений рисунок 3 відображає логіку проходження інформації через ключові етапи цифрового управління — від передпроектного аналізу до

ресурсного балансування — з інтеграцією математичних моделей оцінки відхилень і ризиків.

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, стає не просто інструментом контролю, а повноцінною аналітичною платформою, що генерує нову якість управлінських рішень, оптимізує фінансові потоки, мінімізує ризики й забезпечує конкурентоспроможність на ринку проектів і підрядів [11].

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 у перші 15 хвилин після 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, побудо-

ваний на основі цифрового двійника. Саме BIM є структурним ядром цього двійника, на який нашіруються дані з ERP, CRM, IoT, API сервісів ринку, цифрових паспортів об'єктів, правових регламентів та моделей ризикової поведінки.

Фінансово ця перевага проявляється передусім у скороченні непродуктивних витрат. Наприклад, у дослідженнях McKinsey встановлено, що при повноцінному впровадженні BIM загальні прямі витрати на проект зменшуються в середньому на 8–12%, а непрямі — до 25%. Це обумовлено скороченням повторних робіт, зменшенням помилок у проектній 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 проект раніше. Таким чином, ефект проявляється не лише на рівні окремого об'єкта, а й у мультиплікативному прискоренні всієї бізнес–моделі девелопера [12].

Для кількісної оцінки цього ефекту в економіці проекту впроваджується спеціальний індикатор — індекс приросту продуктивності інвестицій (Investment Productivity Index), який можна описати формулою 8:

$$IPI = \frac{\left(\sum_{i=1}^n \frac{D_i^{out}}{R_i} \right)_{BIM}}{\left(\sum_{i=1}^n \frac{D_i^{out}}{R_i} \right)_{Base}}, \quad (8)$$

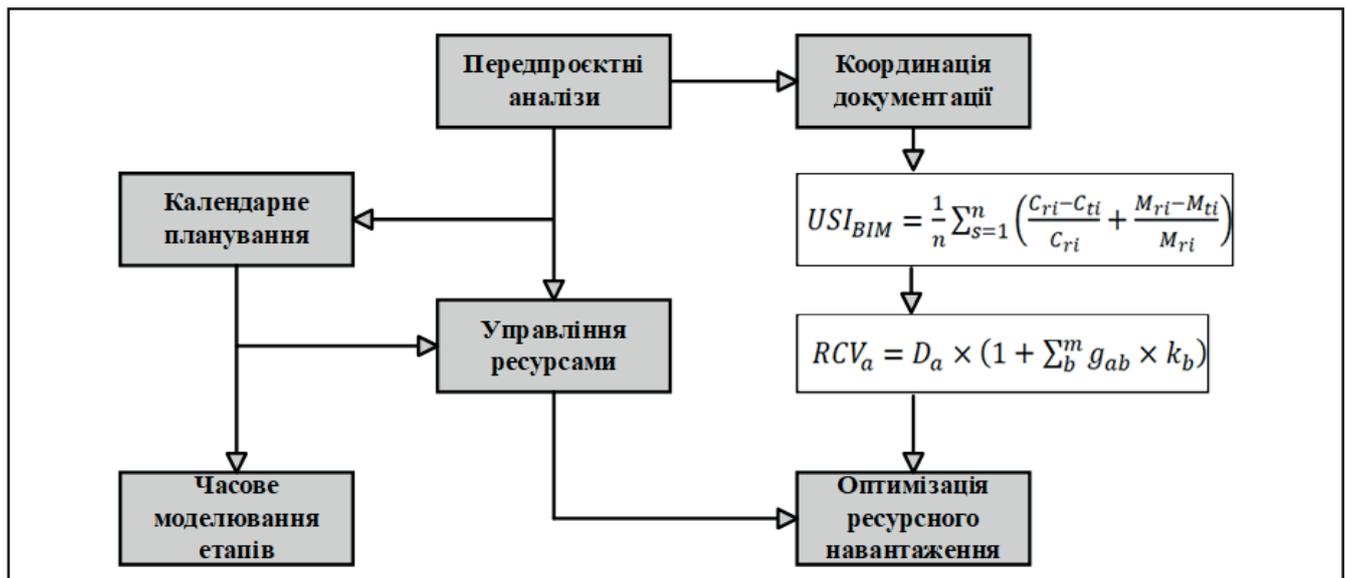


Рисунок 3. Структура алгоритмічного управління будівельним проектом на основі BIM–моделі та цифрових показників ефективності

Джерело: розроблено автором на основі [10]

де D_i^{out} — обсяг виконаних робіт за i -ий період, R_i — витрати часу на їх реалізацію, чисельник — показники за умов BIM-впровадження, знаменник — у традиційній системі. Значення $IPi > 1$ свідчить про підвищення продуктивності капіталу за рахунок впровадження цифрової інфраструктури. У середньому для повноцінних проєктів у Західній Європі значення IPi коливається між 1.17 і 1.35.

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 дозволяє формувати звітність нового типу, де витрати не лише агрегуються, а й пояснюються причинами їх появи — поетапно, структуровано, із врахуванням технологічного контексту.

Висновок

Розвиток цифрової інфраструктури управління будівельними підприємствами на основі BIM-моделювання є стратегічним напрямом підвищення ефективності галузі та її інтеграції у світовий цифровий простір. Проведене дослідження доводить, що BIM-технологія може виступати центральним елементом інформаційної екосистеми, яка об'єднує технічні, економічні та управлінські компоненти у єдину систему даних. Її впровадження забезпечує підвищення точності планування, оперативність контролю, оптимізацію витрат і скорочення часу реалізації проєктів. Визначено, що ключовим чинником успіху є інтеграція BIM із корпоративними системами управління — ERP, CRM, SCM, BI — що створює основу для побудови наскрізного інформаційного середовища. Саме така інтеграція дозволяє здійснювати моніторинг процесів у реальному часі, прогнозувати ризики, автоматизувати розрахунки й підвищувати ефективність прийняття рішень. Впровадження індикаторів цифрової зрілості (ICVI, ROIBIM, DCM) дає змогу кількісно оцінити результативність цифрових рішень і коригувати стратегію управління.

Окремо підкреслено значення концепцій Digital Twin, Big Data та AI для створення самонавчаль-

них систем управління, здатних адаптуватися до змін ринку. У результаті формується нова модель «розумного підприємства», що функціонує за принципами гнучкості, прогнозності й саморегуляції. Так, побудова цифрової інфраструктури на основі BIM є не просто технологічним удосконаленням, а фундаментальною зміною парадигми управління у будівельній галузі. Вона забезпечує перехід від ізольованих систем до інтегрованих, від ручного контролю до автоматизованого аналітичного управління, від реактивних до проактивних стратегій. Цей підхід відкриває перспективи сталого розвитку, підвищення конкурентоспроможності підприємств і формування єдиного цифрового простору в будівництві.

Список використаних джерел:

1. Keskin B. A Building Information Modeling (BIM)-centric Digital Ecosystem for Smart Airport Life Cycle Management. PhD diss. — Syracuse University, 2021. — 150 с. — Режим доступу: <https://surface.syr.edu/etd/1420/>
2. John D.D. Building Information Modeling (BIM) Impact on Construction Performance. M.S. thesis. — Georgia Southern Univ., 2018. — 98 с. — [Електронний ресурс] — Режим доступу: <https://digitalcommons.georgiasouthern.edu/etd/1812/>
3. Бондаренко Д.В., Калашнікова К.Ю. Цифровізація будівельної галузі України: аналіз стану, проблем та перспектив розвитку. // Економіка та суспільство. — № 65, 2024. — 30 с. — [Електронний ресурс] — Режим доступу: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-65-2>
4. 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. — 14 с. — Режим доступу: <https://aisel.aisnet.org/ijispm/vol9/iss4/4>
5. Douglas D., Kelly G., Kassem M. BIM, Digital Twin and Cyber-Physical Systems: crossing and blurring boundaries. arXiv, 2021. — 32 с. — [Електронний ресурс] — Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/2106.11030>
6. ResearchGate The Impact of BIM in Construction Industry (Hassana Jiya et al.), 2024. — 12 с. — [Електронний ресурс] — Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/382698426_The_Impact_of_Building_Information_Modelling_BIM_in_the_Construction_Industry
7. Mihindu S. Digital construction through BIM systems: review and practice. — School of Built Environment, University of Salford, 2008. — 25 с. — [Електронний ресурс] — Режим доступу: <https://www.>

researchgate.net/publication/4355673_Digital_Construction_through_BIM_Systems_will_Drive_the_Re-engineering_of_Construction_Business_Practices

8. Ishchenko, T., Chupryna, Y., & Pokolenko, V. (2018). The organization of biosphere compatibility construction: Justification of the predictors of building development and the implementation prospects. *International Journal of Engineering and Technology (UAE)*, 7(3), 545–549.

9. Roman, A., Andrii, S., Galyna, R., Iurii, C., & Hanna, S. (2022). Integration of data flows of the construction project life cycle to create a digital enterprise based on building information modeling. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 12(1), 40–50.

10. Politecnico di Torino. BIM to Digital Twin: A tool for Infrastructure Asset Management. — Politecnico di Torino, 2024. — 120 с. — [Електронний ресурс] — Режим доступу: <https://webthesis.biblio.polito.it/31193/1/tesi.pdf>

11. University of Miami. BIM Standard & Guide. — FIU Facilities Dept., 2013. — 42 с. — [Електронний ресурс] — Режим доступу: https://facilities.fiu.edu/Planning/Documents/FormsAndStandards/FIU_BIM_Standard_120814.pdf

12. Cambridge University. BIM as an Enabler for Digital Transformation. — Cambridge, 2021. — 30 с. — [Електронний ресурс] — Режим доступу: <https://api.repository.cam.ac.uk/server/api/core/bitstreams/7c7c5b56-69d8-4265-bc45-8ae67abd898d/content>

References:

1. Keskin B. A Building Information Modeling (BIM)–centric Digital Ecosystem for Smart Airport Life Cycle Management. PhD diss. — Syracuse University, 2021. — 150 с. — Rezhym dostupu: <https://surface.syr.edu/etd/1420/>

2. John D.D. Building Information Modeling (BIM) Impact on Construction Performance. M.S. thesis. — Georgia Southern Univ., 2018. — 98 с. — [Elektronnyy resurs] — Rezhym dostupu: <https://digitalcommons.georgia-southern.edu/etd/1812/>

3. Bondarenko D.V., Kalashnikova K.Yu. Tsyfrovizatsiya budivel'noyi haluzi Ukrainy: analiz stanu, problem ta perspektiv rozvytku. // *Ekonomika ta suspil'stvo*. — № 65, 2024. — 30 с. — [Elektronnyy resurs] — Rezhym dostupu: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-65-2>

4. 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. — 14 s. — Rezhym dostupu: <https://aisel.aisnet.org/ijispm/vol9/iss4/4>

5. Douglas D., Kelly G., Kassem M. BIM, Digital Twin and Cyber Physical Systems: crossing and blurring boundar-

ies. arXiv, 2021. — 32 с. — [Elektronnyy resurs] — Rezhym dostupu: <https://arxiv.org/abs/2106.11030>

6. ResearchGate The Impact of BIM in Construction Industry (Hassana Jiya et al.), 2024. — 12 с. — [Elektronnyy resurs] — Rezhym dostupu: https://www.researchgate.net/publication/382698426_The_Impact_of_Building_Information_Modelling_BIM_in_the_Construction_Industry

7. Mihindu S. Digital construction through BIM systems: review and practice. — School of Built Environment, University of Salford, 2008. — 25 s. — [Elektronnyy resurs] — Rezhym dostupu: https://www.researchgate.net/publication/4355673_Digital_Construction_through_BIM_Systems_will_Drive_the_Re-engineering_of_Construction_Business_Practices

8. Ishchenko, T., Chupryna, Y., & Pokolenko, V. (2018). The organization of biosphere compatibility construction: Justification of the predictors of building development and the implementation prospects. *International Journal of Engineering and Technology (UAE)*, 7(3), 545–549.

9. Roman, A., Andrii, S., Galyna, R., Iurii, C., & Hanna, S. (2022). Integration of data flows of the construction project life cycle to create a digital enterprise based on building information modeling. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 12(1), 40–50.

10. Politecnico di Torino. BIM to Digital Twin: A tool for Infrastructure Asset Management. — Politecnico di Torino, 2024. — 120 s. — [Elektronnyy resurs] — Rezhym dostupu: <https://webthesis.biblio.polito.it/31193/1/tesi.pdf>

11. University of Miami. BIM Standard & Guide. — FIU Facilities Dept., 2013. — 42 s. — [Elektronnyy resurs] — Rezhym dostupu: https://facilities.fiu.edu/Planning/Documents/FormsAndStandards/FIU_BIM_Standard_120814.pdf

12. Cambridge University. BIM as an Enabler for Digital Transformation. — Cambridge, 2021. — 30 s. — [Elektronnyy resurs] — Rezhym dostupu: <https://api.repository.cam.ac.uk/server/api/core/bitstreams/7c7c5b56-69d8-4265-bc45-8ae67abd898d/content>

Дані про автора

Різун Дмитро Юрійович,

аспірант Київського національного університету будівництва і архітектури

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0489-911X>

email: Dmitriy.rizun@gmail.com

Data about the author

Dmytro Rizun,

Postgraduate Student, Kyiv National University of Construction and Architecture

email: Dmitriy.rizun@gmail.com