

Олександр ІВАНІНА,

аспірант кафедри організації управління будівництвом

ORCID: 0009-0007-1203-4792

Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ

ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ РЕСУРСАМИ (ERP, BIM) У ПРОМИСЛОВОМУ БУДІВНИЦТВІ

Інтеграція систем управління ресурсами ERP (Enterprise Resource Planning) та BIM (Building Information Modeling) у промисловому будівництві формує нову парадигму управління, орієнтовану на цифрову синхронізацію, прозорість і підвищення ефективності всіх етапів життєвого циклу об'єкта. Розвиток цих технологій дозволяє об'єднати фінансові, матеріальні, часові й геометричні дані в єдине інформаційне середовище, що забезпечує наскрізне управління ресурсами – від планування до експлуатації. ERP-системи забезпечують централізоване управління ресурсними, фінансовими, логістичними та кадровими потоками, тоді як BIM концентрується на візуально-аналітичному моделюванні об'єкта. Їх інтеграція формує інтелектуальну платформу управління, здатну реагувати на зміни в режимі реального часу.

Основна ідея полягає у створенні спільного середовища даних (CDE), де інформація синхронізується між усіма учасниками проєкту, мінімізуючи ризики дублювання або втрати даних. ERP отримує безпосередній доступ до параметрів BIM-моделі, що дозволяє автоматично оновлювати кошториси, графіки постачання, обсяги робіт і рівень завантаженості техніки. Завдяки використанню API-зв'язків, форматів IFC, COBie та хмарних платформ типу Autodesk Forge або Trimble Connect, досягається інтегрована взаємодія між системами. Такі рішення забезпечують симульоване прогнозування, управління на основі моделі (Model-Based Execution) і створення цифрового близнюка об'єкта (Digital Twin).

У промисловому будівництві ERP та BIM виступають не лише технічними інструментами, а й стратегічними механізмами підвищення ефективності: зменшення перевитрат, оптимізація логістики, скорочення термінів реалізації та контроль ризиків. Математичні моделі взаємодії ERP+BIM, зокрема аналітична функція ефективності та вектор ризиків цифрових відхилень, дозволяють кількісно оцінювати результати цифрової інтеграції. Ефективність розглядається як інтегральна функція, що залежить від ступеня зрілості цифрової взаємодії, швидкості оновлення даних і рівня сценарної адаптивності системи. Таким чином, використання ERP і BIM у промисловому будівництві створює основу для формування цифрової екосистеми управління, у якій рішення приймаються на основі достовірних даних, а процеси контролюються в реальному часі. Це дозволяє підвищити точність планування, забезпечити стійкість проєктів і зміцнити конкурентоспроможність галузі.

Ключові слова: ERP, BIM, промислове будівництво, цифровізація, управління ресурсами, інтеграція систем, цифровий двійник, ефективність.

Вступ. Промислове будівництво є однією з найбільш ресурсомістких галузей, де кожен проєкт охоплює складні багаторівневі процеси, взаємодію десятків учасників і великий обсяг інформації. Традиційні методи управління, засновані на лінійних моделях планування, вже не відповідають вимогам сучасного ринку, де ключовим фактором успіху стає швидкість, прозорість і точність прийняття рішень. У цьому контексті інтеграція ERP і BIM-технологій формує новий рівень управління, що поєднує аналітичну потужність фінансово-ресурсних систем із гнучкістю візуального моделювання об'єкта.

ERP-системи дозволяють створювати наскрізну логіку управління ресурсами, синхронізуючи фінанси, логістику, кадрові та постачання в єдиній платформі. BIM, своєю чергою, забезпечує просторово-часову точність, фіксуючи фактичний стан об'єкта та його параметрів. Поєднання цих систем дозволяє будівельним підприємствам забезпечити контроль за проєктами на кожному етапі – від проєктування до експлуатації. У результаті формується новий тип цифрової архітектури управління, що забезпечує адаптивність, прогнозованість і мінімізацію ризиків. Підвищення точності прогнозів, автоматизація аналітики, симуляція сценаріїв розвитку та скорочення часових лагів у прийнятті рішень стають основними перевагами такої інтеграції. Саме тому використання ERP+BIM у промисловому будівництві є не лише технологічною інновацією, а й стратегічною необхідністю в умовах цифрової економіки.

Актуальність використання ERP і BIM у промисловому будівництві зумовлена потребою у створенні інтегрованих систем управління, здатних координувати великі обсяги інформації в умовах постійної зміни зовнішнього середовища. У галузі, де будь-яка затримка або неточність у плануванні призводить до фінансових втрат, цифровізація процесів стає ключовим фактором ефективності. ERP та BIM дозволяють об'єднати різноманітні дані – від фінансових показників до геометрії об'єкта – у єдине інформаційне поле, підвищуючи прозорість і точність управління.

Постановка проблеми. Попри очевидні переваги цифрової інтеграції, більшість будівельних підприємств стикаються з труднощами у впровадженні ERP+BIM-рішень. Основними проблемами залишаються несумісність форматів даних, різна частота оновлення інформації, відсутність спільного середовища даних і недостатня цифрова зрілість персоналу. Також спостерігається брак методології комплексної оцінки ефективності інтеграції цих систем. Потребує подальшого дослідження створення універсальної моделі координації ресурсів, що дозволить гармонізувати дані між ERP і BIM, забезпечуючи точність прогнозів і безперервність цифрового управління.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У науковій літературі питання впровадження ERP і BIM у будівництві досліджуються переважно в контексті підвищення ефективності управління проєктами та цифрової трансформації підприємств. Висвітлено еволюцію від MRP і MRPII до ERP II та їх інтеграцію з CRM, SCM і PLM системами. Водночас недостатньо розробленими залишаються питання практичної взаємодії між ERP та BIM у межах промислового будівництва – особливо щодо синхронізації даних, сценарного планування та управління ризиками. Актуальним є створення формалізованої моделі цифрової інтеграції, здатної забезпечити єдність інформаційного простору та гнучке адаптивне управління.

Метою цієї статті є обґрунтування теоретичних і практичних засад інтеграції систем ERP і BIM у промисловому будівництві, визначення структурних

параметрів їх взаємодії та формування методології оцінки ефективності цифрового управління ресурсами. Стаття спрямована на виявлення ключових технічних, інформаційних та аналітичних чинників, які визначають успішність впровадження ERP+BIM, а також на розроблення рекомендацій щодо побудови спільного середовища даних (CDE) для підвищення узгодженості управлінських процесів.

Виклад основної інформації. Аналіз еволюції та наукових підходів до ресурсного планування у контексті промислового будівництва виявляє глибоку зміну парадигм керування – від лінійно-прогнозних моделей до комплексних адаптивних систем, що інтегрують в собі виробничу, інформаційну, логістичну, фінансову та комунікаційну компоненти. Історично першими спробами формалізувати розподіл ресурсів у виробничому середовищі стали моделі матеріально-ресурсного планування (MRP – Material Requirements Planning), котрі виникли ще у 1960-х роках. Їх основна мета полягала у розрахунку потреби в сировині та матеріалах на основі виробничого плану (Master Production Schedule – MPS), враховуючи наявні запаси, терміни постачання та нормативи виробництва. MRP-моделі були засновані на ієрархічній логіці, де кожен наступний рівень виробничої специфікації (Bill of Materials – BOM) задавав наступний рівень потреби, що уможливлювало побудову розкладів закупівель і внутрішнього споживання [1].

Проте вже у 1980–1990-х роках системи не задовольняли реальні потреби складного виробничого середовища, і на зміну їм прийшло планування ресурсів підприємства (ERP – Enterprise Resource Planning), котре охоплювало матеріальну, фінансову, кадрову, логістичну та адміністративну складові. Основна ідея ERP-підходу – інтегрувати всі функціональні блоки підприємства в єдину систему управління, котра забезпечує наскрізну прозорість даних і дозволяє виконувати симульоване прогнозування у реальному часі. У промисловому будівництві ERP впроваджується з метою узгодження великих обсягів інформації між проектними, постачальницькими, фінансовими та будівельно-виконавчими структурами. У зв'язку з високим рівнем варіативності проектів, значною кількістю учасників, великою вартістю і тривалістю реалізації, ERP у цій галузі повинні адаптуватись до динамічних змін параметрів проекту, непередбачених ризиків та мультифазної координації. Зумовило перехід до ERP II – концепції другого покоління, в основі якої лежить відкрита архітектура взаємодії з зовнішніми партнерами, клієнтами, субпідрядниками через мережеві платформи, що інтегрують ERP із CRM (Customer Relationship Management), SCM (Supply Chain Management), PLM (Product Lifecycle Management) і сучасними інтерфейсами мобільного, хмарного й аналітичного типу.

Визначення структурних параметрів ERP-систем у промисловому будівництві вимагає глибокого розуміння того, як формуються інформаційні зв'язки між функціональними модулями системи. У загальному вигляді ERP-система складається з ряду модулів: бухгалтерія, постачання, управління проектами, кадри, технічне обслуговування, логістика, управління виробництвом. У промисловому будівництві ключовими стають модулі управління проектами (Project Management), кошторисним аналізом (Cost Control), логістикою матеріальних ресурсів (Construction Logistics), розподілом праці (Workforce Scheduling) та прогнозуванням витрат. Структурним параметром кожного модуля є здатність обробляти події потоки в реальному часі, синхронізувати дані за типом «as planned – as executed», надавати аналітичні зрізи за критеріями терміновості, вартості, відповідальності, ризикованості. Системи сучасного рівня ERP II орієнтовані на багатоканальне

зчитування показників (KPI), використання цифрових двійників (Digital Twins) і машинного навчання для адаптації планових рішень. Серед структурних характеристик важливими є гнучкість конфігурації (customization), сумісність з BIM (Interoperability), швидкість обробки сценаріїв, автоматизована верифікація документів, а також наявність захищених каналів синхронізації з зовнішніми базами даних. Технічно реалізується через API-зв'язки з CAD/BIM-редакторами, інтеграцію з системами контролю доступу на майданчику, GPS-відстеження ресурсів, мобільні застосунки для прорабів та дашборди для керівництва [2].

Базові концепти інтеграції ERP із BIM у промисловому будівництві формуються навколо ідеї наскрізного управління даними на всіх фазах життєвого циклу об'єкта – від початкового проектування до експлуатації. Якщо ERP оперує транзакційними, фінансовими та ресурсними даними, то BIM концентрується на геометричних, часових і матеріальних властивостях об'єкта. Проблема в інтеграції полягає в узгодженні типів даних, частоти їх оновлення, форм представлення та точності. Однією з найважливіших задач є формування спільного середовища даних (CDE – Common Data Environment), де ERP-модуль управління кошторисом та постачанням отримає прямий доступ до об'ємно-структурних характеристик з BIM-моделі. Дозволяє автоматично розраховувати потреби в матеріалах на основі фактичної моделі, контролювати залишки на складах у прив'язці до 3D-компонентів, синхронізувати графіки виконання робіт та оновлювати кошториси на основі актуальних цифрових змін у проекті.

Інтеграційні механізми реалізуються за допомогою форматів IFC, COBie, BCF, а також спеціалізованих платформ типу Autodesk Forge, Trimble Connect, Navisworks Manage, які дозволяють поєднувати BIM з ERP через зовнішні API, скриптові зв'язки та уніфіковані бази даних. У новітніх підходах ERP слугує джерелом прогностичних сценаріїв, які накладаються на BIM-модель, що дозволяє виконати не лише візуалізацію проекту, а й здійснити симуляцію його розвитку за різних фінансово-логістичних припущень. Управління називається Model-Based Execution – управління на основі моделі, де всі управлінські рішення приймаються з урахуванням цифрової репрезентації об'єкта. ERP отримує доступ до даних BIM, можливість зворотного впливу, коли коригування в кошторисах або термінах у ERP автоматично оновлюють BIM-модель [3].

У контексті промислового будівництва, де кожен етап проекту включає тисячі позицій матеріалів, агрегатів, механізмів і тимчасових конструкцій, узгодження стає критичним для уникнення втрат, збоїв і надмірних витрат. Цифрове злиття ERP та BIM формує нову систему управління – BIM-integrated ERP або ERP-enabled BIM, де формально відсутній розрив між інформацією про об'єкт та процесами його реалізації. У цьому полягає суть трансформації потоків даних: від ізольованих таблиць і креслень – до єдиної цифрової екосистеми, в якій дані є взаємопов'язаними, актуальними і доступними для аналізу, що дозволяє досягати вищого рівня стратегічного контролю, гнучкості, фінансової передбачуваності та оперативного реагування на зміни в середовищі промислового будівництва.

Для кращого розуміння внутрішньої архітектури ERP-систем та способів її інтеграції з інформаційними моделями будівництва, доцільно проілюструвати ключові структурні компоненти відповідних цифрових рішень. Насамперед необхідно візуалізувати функціональну будову ERP-модуля, адаптованого під потреби промислового об'єкта, зокрема ті його елементи, котрі відповідають за бюджетування, графіки, постачання, контроль ресурсів та взаємодію з

підрядниками. Візуалізація дозволяє виявити критичні точки управління, зв'язки між модулями та принцип їх взаємодії у реальному часі. У наступному етапі важливо сформувати цілісне уявлення про механізм з'єднання ERP та BIM у межах спільного середовища даних (Common Data Environment), що забезпечує інтегровану логіку взаємодії проєктних, фінансових і логістичних даних, а також підтримку єдиної цифрової версії об'єкта будівництва на всіх стадіях життєвого циклу.

На нижче наведеному рис. 1 подано структуру ERP-модуля для управління промисловим об'єктом, де відображено основні функціональні блоки системи, канали інформаційного обміну та логіку наскрізного контролю ресурсів у середовищі будівництва.



Рис. 1. Структуру ERP-модуля для управління промисловим об'єктом
(розроблено автором на основі [4])

На рис. 2 наведено концептуальну схему з'єднання ERP та BIM у спільному середовищі даних, котра демонструє механізми синхронізації цифрових моделей із планово-бюджетними модулями ERP та принципи взаємодії в рамках інтегрованого управління промисловим проєктом.

Для оцінки реального впливу цифрової інтеграції систем ERP та BIM на результати реалізації промислового будівельного проєкту доцільно застосувати аналітичний підхід із побудовою залежності ефективності від ступеня цифрової зрілості. Враховуючи, що ERP забезпечує контроль витрат, ресурсів і термінів, а BIM формує геометрично-інформаційну основу об'єкта, їх спільне застосування дозволяє суттєво знизити рівень невизначеності, покращити сценарне планування та прискорити цикли прийняття управлінських рішень. Ефективність у даному випадку розглядається як інтегральна величина, котра об'єднує показники економії коштів, своєчасності виконання, точності виконаних робіт та рівня коригування ризиків. Підвищення глибини інтеграції (від фрагментарної взаємодії до повноцінної цифрової синхронізації) прямо впливає на оптимізацію процесів на кожному етапі життєвого циклу проєкту.



Рис. 2. Концептуальна схема з'єднання ERP та BIM у спільному середовищі даних (розроблено автором на основі [5])

На нижче наведеному рис. 3 представлено аналітичну залежність ефективності реалізації проекту від рівня інтеграції ERP+BIM, що демонструє, як поступове нарощування цифрової інтеграції між системами сприяє досягненню вищих показників продуктивності, узгодженості даних та адаптивності управління в умовах змінного будівельного середовища.

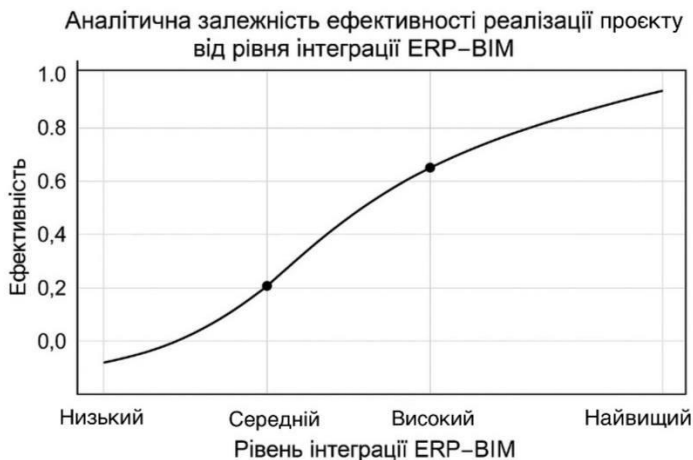


Рис. 3. Аналітична залежність ефективності реалізації проекту від рівня інтеграції ERP+BIM (розроблено автором на основі [6])

Інтегральна функція ефективності цифрового управління дає змогу виміряти інтегральний ефект цифрових платформ в управлінні проектом [7].

$$E = \int_0^T (\alpha_1 \times C_{ERP}(t) + \alpha_2 \times C_{BIM}(t)) dt, \quad (1)$$

де: E – узагальнена ефективність цифрового управління, α_1, α_2 – вагові коефіцієнти впливу ERP та BIM відповідно, $C_{ERP}(t), C_{BIM}(t)$ – функції цифрового покриття на момент часу t , T – тривалість життєвого циклу проекту.

Модель координування ресурсних потоків між ERP та BIM системами дозволяє визначити ступінь узгодженості ресурсного планування між платформами [8].

$$R_{sync} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |R_{ERP}^{(i)} - R_{BIM}^{(i)}|, \quad (2)$$

де: R_{sync} – середній показник розбіжності між ресурсними даними двох систем, $R_{ERP}^{(i)}, R_{BIM}^{(i)}$ – ресурси за ідентифікатором i у системах ERP та BIM відповідно, n – кількість зіставляваних елементів

Вектор ризиків цифрового відхилення у BIM-планах використовується для ідентифікації напрямків ризику в цифрових моделях об'єкта [9].

$$D_t = (\delta_{time}, \delta_{cost}, \delta_{scope}), \quad (3)$$

де: D_t – вектор ризиків на момент часу t , δ_{time} – часові зсуви, δ_{cost} – перевитрати бюджету, δ_{scope} – зміни обсягу робіт.

Для повноцінного аналізу взаємодії ERP- та BIM-систем у контексті промислового будівництва необхідно розглядати їх окремі функціональні можливості, здійснити системне зіставлення ключових структурних параметрів, котрі формують основу цифрової стратегії підприємства. Зіставлення дозволяє визначити ступінь сумісності між платформами, виявити потенційні точки інтеграції, оцінити гнучкість масштабування та ступінь адаптивності до змінних зовнішніх умов. Особливо важливим є розгляд таких характеристик, як типи оброблюваних даних, моделі оновлення інформації, глибина сценарної підтримки, аналітична здатність та ступінь взаємодії із зовнішніми підсистемами. Формалізований підхід до порівняння дозволяє ідентифікувати слабкі ланки у поточній цифровій конфігурації, сформулювати основу для побудови інтегрованої інфраструктури управління.

У таблиці 1 представлено зіставлення структурних параметрів ERP та BIM у межах цифрової стратегії підприємства, котре охоплює ключові технічні, функціональні та процесні характеристики, що визначають ефективність їх спільного використання в умовах промислового будівництва.

У промисловому будівництві процес розрахунку потреб у ресурсах є елементом логістичного забезпечення, критичним етапом, від якого залежить ритмічність виконання робіт, фінансова стабільність проекту та загальна відповідність стратегічним цілям підприємства. Моделі автоматизованого розрахунку потреб у ресурсах, котрі формуються на основі методології MRPII (Manufacturing Resource Planning), є логічним продовженням систем першого покоління MRP і дозволяють значно розширити горизонт планування.

Таблиця 1

Зіставлення структурних параметрів ERP та BIM у межах цифрової стратегії підприємства

Параметр	ERP (Enterprise Resource Planning)	BIM (Building Information Modeling)
<i>Тип даних</i>	Транзакційні, ресурсні, фінансові, логістичні	Геометричні, часові, матеріальні, просторові, вартісні
<i>Основна функція</i>	Управління ресурсами, постачанням, бюджетом, людськими ресурсами	Моделювання об'єкта, симуляція виконання, оцінка вартості та часу
<i>Оновлення інформації</i>	Таблично-орієнтоване, модульне, часто ручне	Автоматизоване, об'єктно-орієнтоване, сценарне
<i>Інтерфейс та візуалізація</i>	Аналітичні панелі, звіти, таблиці, діаграми	3D/4D/5D візуалізація, інтерактивні моделі, віртуальні середовища
<i>Інтеграція з іншими системами</i>	Через API, REST, SOAP; інтеграція з CRM, SCM, HRM	Через IFC, BCF, COBie; інтеграція з CAD/CAE, ERP
<i>Частота оновлення</i>	Переважно подієва, періодична	Нерегулярна або в режимі реального часу (при IoT/датчиках)
<i>Механізм синхронізації</i>	Централізоване управління транзакціями	Розподілене оновлення компонентів моделі
<i>Гнучкість налаштування</i>	Висока через конфігурацію модулів, залежить від розробника	Висока через параметричні об'єкти, залежить від платформи BIM
<i>Використання аналітики</i>	Фінансове прогнозування, KPI, варіативне планування	Аналіз продуктивності, варіантів проекту, зіставлення план-факт
<i>Цінність у цифровій стратегії підприємства</i>	Забезпечує економічну керованість, контроль ресурсів	Формує цифровий близнюк об'єкта, забезпечує технічну точність і наглядність

Джерело: розроблено автором на основі [10]

Якщо класичне MRP фокусувалося переважно на кількісному обчисленні необхідних матеріалів згідно зі структурою виробу (Bill of Materials) та виробничим розкладом (Master Production Schedule), то концепція MRPII охоплює ширший спектр процесів, включаючи планування потужностей, оцінку фінансових обмежень, погодження графіків постачання, ресурсне узгодження з підрядниками, а також інтеграцію з HR та фінансовими модулями [11].

Основна перевага моделей MRPII полягає в тому, що вони формують таблиці потреб у матеріалах, здійснюють оптимізацію використання виробничих ресурсів, як обладнання, робоча сила, допоміжні механізми, логістичні потужності та навіть енергетичні ресурси. У контексті промислового будівництва означає можливість розрахувати обсяг бетону, арматури, сендвіч-панелей чи кабельних систем, синхронізувати потреби з доступним парком техніки, графіками роботи працівників, рівнем завантаженості кранів, витратами енергії на обігрів та сушку приміщень, а також циклічністю підвезення ресурсів. У структурі ERP-систем MRPII реалізується через спеціальні модулі управління виробництвом (Production

Planning), складським обліком (Inventory Control), плануванням постачання (Procurement Planning), а також за рахунок з'єднання з модулями Business Intelligence (BI), котрі здійснюють аналітичне підсилення процесу планування на основі історичних та прогнозних даних.

Побудова сценаріїв оптимізації на базі ERP-аналітики є ще одним потужним інструментом, що дозволяє розширити функціонал MRPII до рівня адаптивного управління. Суть процесу полягає у симуляції альтернативних варіантів реалізації проекту залежно від змін зовнішніх умов, внутрішніх параметрів чи обмежень. Застосовуючи ERP-аналітику, керівники можуть створити множину сценаріїв — базовий (plan A), інерційний (plan B), оптимістичний (plan C), антикризовий (plan D) — кожен із яких передбачає конкретний рівень доступності ресурсів, швидкість постачання, трудомісткість операцій, коливання цін або погодні ризики. Кожен із цих сценаріїв має свій набір KPI (key performance indicators), є котрі обчислюються в ERP-системі в автоматичному режимі: терміни виконання, відсоток відхилення від бюджету, індекс безперервності ланцюга постачань, показники використання людського ресурсу. Аналітичні панелі ERP-систем (наприклад, SAP S/4HANA, Oracle NetSuite, Microsoft Dynamics 365) надають керівникам можливість бачити поточний стан справ та прогнозні лінії розвитку, що значно посилює стратегічне управління в умовах обмежених ресурсів або нестабільного ринку [12].

Особливо важливо враховувати, що точність ERP-моделювання є похідною від якості первинних даних, від стабільності зовнішнього середовища, внутрішніх організаційних практик та технологічної зрілості самої компанії. У динамічному середовищі, де зміни відбуваються щоденно — коливаються ціни на матеріали, зростають терміни поставок, змінюються підрядники або погіршуються погодні умови — ERP-системи стикаються з численними викликами, котрі можуть знижувати точність прогнозів. Якщо дані про залишки на складі оновлюються вручну або із запізненням, розрахунок потреб у матеріалах може бути неточним, що спричинить затримки або перевитрати. Якщо плани-графіки виконання робіт не синхронізуються з фактичними затримками на об'єкті, модель ERP буде відображати оптимістичний, але не релевантний стан проекту. Якщо в систему не закладено механізмів обробки багатосценарних змін, ERP-модуль не зможе дати швидкої реакції на зміну пріоритетів.

Фактори, що впливають на точність ERP-моделювання в динамічному середовищі, можна умовно згрупувати в три категорії: технологічні, організаційні та зовнішні. До технологічних належать якість інтеграції з датчиками IoT, наявність автоматизованих API для отримання реальних даних, швидкість оновлення інформації та рівень сумісності з BIM-моделями. Організаційні фактори включають рівень цифрової зрілості персоналу, дисципліну введення даних, швидкість ухвалення управлінських рішень і наявність внутрішніх регламентів. Зовнішні — це зміни на ринку будматеріалів, регуляторні коливання, геополітичні впливи, інфляція, форс-мажори. В умовах динамічного середовища здатність ERP-системи адаптуватися до нових даних у реальному часі, перераховувати потреби з урахуванням сценарних коригувань і автоматично оновлювати аналітичні панелі стає ключовим чинником успіху цифрового управління у промисловому будівництві [13].

Поєднання моделей MRPII, ERP-аналітики та адаптивної оптимізації в умовах змін формує замкнутий цифровий цикл ресурсного управління, котрий прогнозує,

реагує, моделює, адаптує та вдосконалює рішення для забезпечення сталого й рентабельного будівництва.

Для повного розуміння механізмів цифрової взаємодії між ERP- та BIM-середовищами в контексті промислового будівництва важливо візуалізувати ключові аспекти їхньої структурної і процесної інтеграції. Передусім варто розглянути, яким чином відбувається синхронізація будівельних фаз між двома системами: ERP відповідає за фінансове, логістичне та ресурсне планування, тоді як BIM відображає фактичний стан об'єкта у тривимірному та часовому вимірах. Узгодженість цих двох платформ є вирішальною для уникнення конфліктів у графіках, дублювання витрат або неконтрольованого зсуву дедлайнів. Побудова моделі синхронізації дозволяє чітко відобразити відповідність між запланованими ERP-етапами (Procurement, Execution, Commissioning) і відповідними фазами BIM-моделі (LOD300, LOD350, LOD400), формуючи основу для створення динамічного цифрового близнюка.

Додатково, у межах адаптивного управління проектом, необхідно реалізувати контроль змін, котрі виникають під час реалізації проекту. Оскільки BIM-модель зазнає оновлень у відповідь на фактичні події на будівельному майданчику, важливо, щоб зміни не залишалися ізольованими у візуальному середовищі, а інтегрувались у фінансово-ресурсний блок ERP. Конструкція модуля контролю змін у BIM з інтеграцією до ERP дозволяє автоматизувати відстеження модифікацій, порівнювати версії моделей (As-Planned vs As-Built), реєструвати вплив змін на бюджет, графік та обсяг робіт, а також генерувати сигнал для перегляду відповідних розділів кошторису або графіка.

На нижче наведеному рис. 4 зображено модель синхронізації фаз будівництва між ERP- і BIM-середовищем, котра відображає взаємозв'язки між плановими ERP-етапами та фазами створення BIM-моделі, з урахуванням контрольних точок інтеграції та обміну даними.

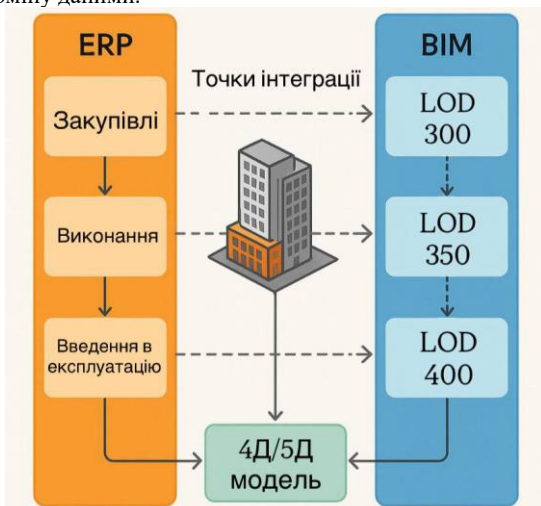


Рис. 4. Модель синхронізації фаз будівництва між ERP- і BIM-середовищем
(розроблено автором на основі [14])

На рис. 5 подано конструкцію модуля контролю змін у BIM з інтеграцією до ERP-системи, де візуалізовано логіку передачі оновлень між середовищами, тригерні події, аналітичні блоки та канали впливу змін на проєктне управління.



Рис. 5. Конструкція модуля контролю змін у BIM з інтеграцією до ERP-системи
(розроблено автором на основі [15])

Застосування BIM-моделі як інструмента фіксації фактичного стану робіт дає змогу автоматизовано зчитувати реальні об'єми, хронологію виконання та вартісну динаміку, що дозволяє щоденно зіставляти її з аналітичними блоками ERP. Дає змогу виявити системні похибки в алгоритмах кошторису, прорахунки в логістиці або проблеми з оновленням контрактних даних. Графічне зображення динаміки відхилень формує базу для прийняття управлінських рішень щодо перерозподілу ресурсів, уточнення пріоритетів або зміни стратегії закупівель.

На нижче наведеному рис. 6 відображено динаміку відхилень фактичних витрат у BIM щодо ERP-прогнозу, котра ілюструє часову еволюцію різниці між очікуваними витратами та фактично зафіксованими значеннями, а також дозволяє виявити критичні точки розбіжності, що потребують додаткової аналітичної уваги та управлінського реагування.

Функція сценарного згладжування буферів ресурсів дозволяє моделювати процес плавного зменшення ресурсного запасу із урахуванням випадкових подій, типових для будівельного проєкту [17].

$$B(t) = B_0 \times e^{-\lambda t} + \sigma \times \xi(t), \quad (4)$$

де: $B(t)$ – фактичний обсяг буферного ресурсу на момент часу t , B_0 – початковий розмір буфера, λ – коефіцієнт темпу витрати або згасання буфера, σ – параметр волатильності, $\xi(t)$ – випадкова функція (стохастичне збурення або сценарний вплив).

Модель обчислення цифрового індексу відповідності BIM-факт дозволяє уніфіковано оцінити рівень точності виконання робіт щодо початкової моделі на підставі просторових, часових і матеріальних показників [18].

$$CI = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i, \quad \delta_i = \{1,0\}, \quad \text{якщо } |BIM_{\{i\}}^{as-built} - BIM_{\{i\}}^{as-planned}| \leq \epsilon \text{ інакше, } (5)$$

де: CI – цифровий індекс відповідності між фактичною та запланованою BIM-моделлю, n – кількість об'єктів або елементів моделі, ϵ – допустимий поріг відхилення, δ_i – бінарна змінна відповідності для кожного елемента.

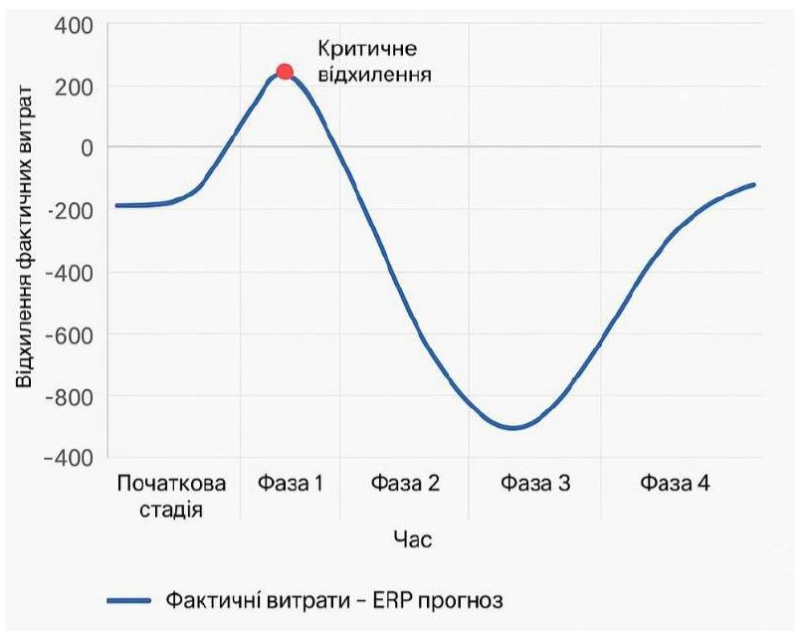


Рис. 6. Динаміка відхилень фактичних витрат у BIM щодо ERP-прогнозу (розроблено автором на основі [16])

Алгоритмічна функція реакції ERP-модуля на оновлення BIM-сигналів є основою адаптивної реакції ERP-системи на події, зафіксовані у BIM-моделі, й дозволяє перераховувати графіки, бюджети та логістику в режимі майже реального часу [19].

$$U_{t+1} = U_t + \Delta_{info} \times \frac{\partial P}{\partial t} + \nabla Q, \quad (6)$$

де: U_t – поточний стан ERP-модуля управління ресурсами, Δ_{info} – інтенсивність або масивність нового ВІМ-сигналу (зміна об'єкта, фази, кошторису), $\frac{\partial P}{\partial t}$ – швидкість зміни планового тиску на ресурс (наприклад, фінансування, постачання), ∇Q – градієнт просторової зміни обсягів робіт у ВІМ-середовищі.

Висновок.

Інтеграція систем ERP і ВІМ у промисловому будівництві відкриває новий етап цифрового управління, заснований на взаємозв'язку між фінансово-ресурсними та техніко-виробничими даними. Такий підхід дозволяє створити єдину інформаційну інфраструктуру, у якій процеси планування, контролю та звітності відбуваються в режимі реального часу. ERP виступає як аналітичне ядро управління ресурсами, тоді як ВІМ – як візуально-аналітичний інструмент, що відображає стан об'єкта. Їх взаємодія забезпечує повну прозорість життєвого циклу проєкту, зменшує невизначеність і підвищує адаптивність підприємства до ринкових змін.

Практична цінність ERP+ВІМ полягає у скороченні витрат, підвищенні точності прогнозів і швидкості ухвалення рішень. Запровадження цифрових двійників, автоматизованого контролю змін і аналітичних моделей ефективності створює умови для побудови стійкої цифрової екосистеми промислового будівництва. У перспективі поєднання ERP і ВІМ стане основою для створення «розумних» підприємств, де всі процеси – від планування до експлуатації – інтегровані в єдину адаптивну цифрову платформу управління.

Список літератури:

1. Деркач А.Є. Економіко-цифровий інструментарій впровадження реінжинірингу на будівельному підприємстві: дис. ... доктора філософії: 051 Економіка. К.: КНУБА, 2023. URL: https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2023/12/dysertacziya_derkach-andrij.pdf.
2. Що таке ERP? Вичерпний путівник по системам управління бізнесом. URL: <https://ith.eu/uk/blog/що-таке-erp-вичерпний-путівник-по-систем/>.
3. Що таке ERP-система управління підприємством та де її краще розмістити? Стаття з серії "Пояснюємо основи IT-інфраструктури". URL: <https://www.sim-networks.com/ukr/blog/enterprise-resource-planning-systems-and-cloud-infrastructure>.
4. ERP-системи. Комплексне рішення по управлінню ресурсами підприємства і бізнесом в цілому. URL: <https://www.softinform.com.ua/erp-system-ua/>.
5. Що таке ERP і навіщо він потрібен? URL: <https://b-fin.tech/blog/what-is-erp>.
6. Рибак І., Гарафонова О. (2025). Цифрова трансформація як інструмент удосконалення управління стратегічним розвитком підприємства. *Herald of Khmelnytskyi National University. Economic Sciences*, 2025, 346(5), 93-98. <https://doi.org/10.31891/2307-5740-2025-346-5-12>
7. Стоянець Н. Управління інноваційним розвитком підприємств в умовах глобалізаційних викликів. *Економіка та суспільство*, 2024, (60). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-60-86>
8. Терлецька Ю. Управління розвитком підприємства в умовах цифрової трансформації бізнесу. *Економіка та суспільство*, 2023, (54). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-54-2>

9. Дячков Д., Потапюк І., Капран І. Економічна безпека в системі стратегічного управління підприємством. *Економіка та суспільство*, 2021, (24). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2021-24-7>

10. Халілов А. Менеджмент будівельних проєктів з застосуванням BIM технологій та штучного інтелекту на цифровій платформі: дис. ... д-ра філософії: 073 Менеджмент. Київ: КНУБА, 2024. 176 с. URL: <https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2024/06/halilov-dysertacziya.pdf>

11. Дружинін М.А. Система функціонально-цифрового супроводу організації збірного будівництва: реферат ... д-ра техн. наук: 05.23.08. К.: КНУБА, 2025. 42 с. URL: <https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2025/05/referat-druzhynin-ma.pdf>.

12. Посібник з впровадження інформаційного моделювання в будівництві, створений Європейським державним сектором Стратегічні дії щодо роботи будівельного сектору: рушійна цінність, інновації та зростання. URL: https://cubim.eu/wp-content/uploads/2020/12/2017_EU-BIM-Handbook_ua.pdf.

13. BIM-технології в будівництві. URL: <https://dedalsoft.com.ua/blog/bim-tehnologii-v-budivnistvi>.

14. Воробієнко П.П., Нікітюк Л.А., Резніченко П.І. Телекомунікаційні та інформаційні мережі: підручник. К.: САММІТ-Книга, 2010. 708 с. URL: <https://ktpu.kpi.ua/wp-content/uploads/2014/02/Vorobiyenko-P.P.-Telekomunikatsijni-ta-informatsijni-merezhi.pdf>

15. Ivakhnenko I., Ryzhakova G., Chupryna I., Kushnir I., Druzhynina I., Vakolyuk A. Information-analytical support and organizational-structural regulation of operational activity of enterprises: economic evaluation and construction of management systems. *Управління розвитком складних систем*, 2021, (46), 91–99. <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2021.46.91-99>

16. Кобельчук О., Конончук Р. Дослідження оптимізації будівельного процесу за допомогою цифровізації проєктів будівництва. *Шляхи підвищення ефективності будівництва*, 2025, 55(2), 174–181. URL: <http://ways.knuba.edu.ua/article/view/336010>

17. Садовяк М. Сутнісні характеристики матеріально-технічного забезпечення будівельних підприємств. *Економіка та суспільство*, 2024, (69). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-69-95>

18. Чуприна Ю.А. Залучення прикладних переваг bim-технологій до методики і практики формування життєвого циклу проєктів в складі державних цільових програм, які втілюються будівельним кластером. *Економіка та держава*. 2019. № 3. С. 67-70.

Oleksandr IVANYNA

Use of resource management systems (erp, bim) in industrial construction

The integration of Enterprise Resource Planning (ERP) and Building Information Modeling (BIM) systems in industrial construction forms a new management paradigm focused on digital synchronization, transparency, and improving efficiency across all stages of a facility's life cycle. The development of these technologies makes it possible to unite financial, material, temporal, and geometric data within a single information environment that ensures end-to-end resource management – from planning to operation. ERP systems provide centralized control of resource, financial, logistics, and personnel flows, while BIM focuses on visual and analytical modeling of the

facility. Their integration creates an intelligent management platform capable of responding to changes in real time.

The core idea lies in the creation of a Common Data Environment (CDE), where information is synchronized among all project participants, minimizing the risk of data duplication or loss. ERP systems gain direct access to BIM model parameters, allowing for the automatic updating of cost estimates, delivery schedules, work volumes, and equipment utilization levels. Through the use of API connections, IFC and COBie formats, and cloud-based platforms such as Autodesk Forge or Trimble Connect, an integrated interaction between systems is achieved. Such solutions enable simulated forecasting, model-based execution (MBE), and the creation of a Digital Twin of the facility.

In industrial construction, ERP and BIM function not only as technical tools but also as strategic mechanisms for enhancing efficiency – reducing cost overruns, optimizing logistics, shortening implementation timelines, and controlling risks. Mathematical models describing ERP+BIM interactions, including analytical efficiency functions and digital deviation risk vectors, make it possible to quantitatively assess the results of digital integration. Efficiency is treated as an integral function dependent on the level of digital maturity, the speed of data updates, and the system's scenario adaptability.

Thus, the use of ERP and BIM in industrial construction provides the foundation for establishing a digital management ecosystem in which decisions are based on reliable data, and processes are monitored in real time. This approach improves planning accuracy, enhances project resilience, and strengthens the competitiveness of the construction industry.

Keywords: *ERP, BIM, industrial construction, digitalization, resource management, system integration, digital twin, efficiency.*