

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БУДІВНИЦТВА І
АРХІТЕКТУРИ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Железняк Владислав Леонідович

УДК 69.003:004.65:658.5

ДИСЕРТАЦІЯ

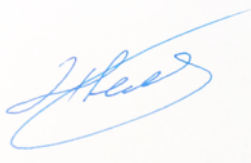
**ЦИФРОВА ТРАНСФОРМАЦІЯ ОРГАНІЗАЦІЇ БУДІВНИЦТВА:
МОДЕЛІ ТА ІНСТРУМЕНТИ ERP ПІДТРИМКИ УПРАВЛІНСЬКИХ
РІШЕНЬ**

192 – Будівництво та цивільна інженерія

19 – Архітектура та будівництво

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

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



В.Л. Железняк

Науковий керівник: **Тугай Олексій Анатолійович**

доктор технічних наук, професор

КИЇВ – 2026

АНОТАЦІЯ

Железняк Владислав Леонідович. Цифрова трансформація організації будівництва: моделі та інструменти ERP-підтримки управлінських рішень. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія», галузь знань 19 «Архітектура та будівництво». – Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, 2026.

Сучасний розвиток будівельної галузі характеризується суттєвим ускладненням організаційно-технологічних процесів реалізації будівельних проєктів, зростанням вимог до ефективності використання ресурсів, підвищенням рівня відповідальності учасників інвестиційно-будівельного процесу та необхідністю забезпечення стабільного досягнення цільових показників щодо строків, вартості та якості будівництва. Водночас функціонування будівельного виробництва відбувається в умовах високого рівня невизначеності, що обумовлено впливом зовнішніх і внутрішніх факторів, серед яких особливе значення мають коливання вартості матеріально-технічних ресурсів, зміни фінансування, порушення логістичних ланцюгів, необхідність коригування проєктних рішень та зростання складності взаємодії між учасниками будівельних проєктів.

Традиційні організаційно-технологічні підходи до управління будівництвом формувалися в умовах відносної стабільності та переважно орієнтувалися на використання детермінованих моделей планування. Такі моделі базуються на припущенні про незмінність основних параметрів реалізації проєкту протягом усього життєвого циклу будівництва. Однак сучасна практика свідчить, що фактичні умови реалізації будівельних проєктів суттєво відрізняються від початково запланованих, що призводить до необхідності постійного коригування організаційно-технологічних рішень.

Однією з ключових проблем сучасного будівництва є недостатній рівень інтеграції інформаційних потоків між замовниками, проєктувальниками,

підрядниками та іншими учасниками будівельного процесу. У більшості випадків інформація формується та обробляється у різних програмних середовищах, що ускладнює оперативний обмін даними, призводить до втрати актуальності інформації та знижує якість управлінських рішень. Як наслідок, навіть незначні зміни умов реалізації проєкту можуть спричиняти суттєві відхилення календарних графіків, збільшення витрат та зниження загальної ефективності організації будівельного виробництва.

У зв'язку з цим одним із найважливіших напрямів розвитку будівельної галузі є цифрова трансформація процесів управління. Впровадження сучасних цифрових технологій дозволяє забезпечити інтеграцію інформаційних потоків, підвищити прозорість процесів управління та створити умови для переходу від реактивного до проактивного управління будівельними проєктами. Особливе значення у цьому процесі мають технології Building Information Modeling (BIM), Enterprise Resource Planning (ERP) та Common Data Environment (CDE), які забезпечують створення єдиного цифрового середовища реалізації будівельного проєкту.

Використання BIM-технологій дозволяє формувати інформаційну модель об'єкта будівництва та забезпечувати взаємозв'язок між проєктними рішеннями і процесами реалізації проєкту. ERP-системи створюють можливості для інтеграції даних щодо ресурсів, фінансів, виконання робіт та календарного планування, тоді як CDE-платформи забезпечують організацію єдиного середовища обміну інформацією між усіма учасниками будівництва. Водночас аналіз наукових досліджень і практичного досвіду свідчить, що питання комплексної інтеграції зазначених технологій у межах єдиної моделі управління будівельним виробництвом залишається недостатньо дослідженим.

Наявні підходи здебільшого орієнтовані на автоматизацію окремих функцій управління та не забезпечують необхідного рівня адаптивності організаційно-технологічних систем до змін умов реалізації проєктів. У більшості випадків цифрові технології використовуються як інструменти обробки інформації, але не як елементи цілісної системи підтримки прийняття управлінських рішень. Це обумовлює необхідність розроблення нових наукових підходів до організації

будівельного виробництва, які поєднують можливості цифрових технологій із принципами адаптивного управління.

У роботі висунуто наукову гіпотезу, відповідно до якої підвищення ефективності організації будівельного виробництва в умовах динамічних змін може бути досягнуто шляхом формування адаптивної цифрової моделі управління, що базується на інтеграції BIM-, ERP- та CDE-технологій і забезпечує підтримку прийняття управлінських рішень на основі актуальних даних про стан будівельного проєкту.

Метою дисертаційної роботи є розроблення організаційно-технологічних засад забезпечення адаптивності будівельного виробництва в умовах динамічних змін реалізації проєктів на основі використання цифрових моделей та ERP-підтримки управлінських рішень.

Для досягнення поставленої мети виконано комплекс теоретичних, методологічних та прикладних досліджень, спрямованих на виявлення закономірностей функціонування будівельного виробництва в умовах невизначеності, формування адаптивної цифрової моделі управління та перевірку її ефективності в умовах реальних будівельних проєктів.

Об'єктом дослідження є процес організації будівельного виробництва в умовах динамічних змін.

Предметом дослідження є організаційно-технологічні засади забезпечення адаптивності будівельного виробництва на основі цифрових моделей та ERP-підтримки управлінських рішень.

Методологічну основу дослідження становлять системний, процесний та функціональний підходи, методи аналізу та синтезу, системного моделювання, порівняльного аналізу, а також сучасні інформаційно-аналітичні інструменти цифрового управління будівельними проєктами.

Основний зміст та результати дослідження

У першому розділі дисертаційної роботи досліджено теоретико-методологічні засади цифрової трансформації організації будівництва як сучасної концепції розвитку галузі в умовах зростання складності інвестиційно-будівельних

проектів та підвищення вимог до ефективності управління. Проведено комплексний аналіз еволюції організаційно-технологічних підходів до організації будівельного виробництва, починаючи від традиційних лінійних і потокових методів, мережевого планування та класичних систем управління проектами і завершуючи сучасними цифровими концепціями інтегрованого управління, що базуються на використанні інформаційних технологій.

Встановлено, що традиційні організаційно-технологічні моделі були сформовані в умовах відносної стабільності виробничого середовища та орієнтувалися на використання детермінованих моделей планування, у яких основні параметри проекту визначаються на початковому етапі та практично не змінюються протягом реалізації будівництва. Проведений аналіз сучасної практики реалізації будівельних проектів довів, що такі підходи вже не забезпечують необхідної ефективності в умовах високої динамічності зовнішнього середовища, змінності ресурсного забезпечення, нестабільності фінансування, логістичних обмежень, необхідності оперативного коригування проектних рішень та постійного виникнення нових ризиків.

У роботі систематизовано сучасні підходи до цифровізації будівельного виробництва та визначено, що ключовими напрямками розвитку цифрового управління є інтеграція інформаційного моделювання будівель (BIM), систем планування ресурсів підприємства (ERP) та спільного інформаційного середовища (CDE). На відміну від існуючих досліджень, де зазначені технології здебільшого розглядаються окремо, у дисертації вони проаналізовані як взаємопов'язана система підтримки прийняття управлінських рішень, що забезпечує безперервність інформаційних потоків протягом усього життєвого циклу будівельного проекту.

Особливу увагу приділено аналізу особливостей функціонування будівельного виробництва в умовах динамічних змін. Визначено основні фактори, що впливають на ефективність організації будівництва, серед яких економічні, організаційні, технологічні, ресурсні, інформаційні та зовнішні фактори. Обґрунтовано, що саме інформаційна неузгодженість між учасниками будівельного процесу є одним із ключових джерел втрати ефективності управління, що

проявляється у порушенні календарних графіків, збільшенні вартості виконання робіт, виникненні дублювання інформації та прийнятті управлінських рішень на основі застарілих даних.

У першому розділі також виконано критичний аналіз існуючих організаційно-технологічних моделей управління будівництвом та визначено їх переваги й обмеження. Показано, що більшість сучасних моделей не забезпечує достатнього рівня адаптивності до змін зовнішнього середовища, оскільки орієнтована переважно на автоматизацію окремих управлінських функцій, а не на створення інтегрованої системи підтримки прийняття рішень. Доведено необхідність переходу від статичних моделей організації будівельного виробництва до адаптивних цифрових моделей, здатних функціонувати в умовах постійної зміни параметрів реалізації проєктів.

На основі проведеного аналізу сформовано теоретичні передумови створення адаптивної цифрової моделі організації будівництва, яка поєднує принципи системного підходу, інформаційної інтеграції, адаптивного управління та цифрової підтримки прийняття управлінських рішень. Обґрунтовано, що інтеграція BIM-, ERP- та CDE-технологій забезпечує формування єдиного цифрового середовища, у межах якого управління будівельним проєктом здійснюється на основі актуальних даних, що створює передумови для підвищення ефективності використання ресурсів, скорочення строків реалізації проєктів та зниження рівня організаційних ризиків.

У другому розділі дисертаційної роботи здійснено комплексне дослідження факторів, що визначають ефективність прийняття організаційно-технологічних рішень у процесі реалізації будівельних проєктів, та сформовано методологічні засади побудови адаптивної цифрової моделі управління будівельним виробництвом. Дослідження базується на положенні, що сучасне будівництво функціонує як багаторівнева відкрита система, у якій прийняття управлінських рішень залежить від великої кількості взаємопов'язаних технічних, економічних, організаційних, інформаційних та зовнішніх факторів, які постійно змінюються протягом життєвого циклу проєкту.

На основі системного аналізу визначено структуру організаційно-технологічних рішень у будівництві та встановлено їх місце у загальній системі управління реалізацією інвестиційно-будівельних проєктів. Обґрунтовано, що кожне управлінське рішення формується під впливом комплексу взаємозалежних факторів, серед яких особливу роль відіграють забезпеченість ресурсами, календарні обмеження, фінансовий стан проєкту, технологічні особливості виконання робіт, інформаційна взаємодія між учасниками будівництва та рівень цифрової зрілості організації. Запропоновано структурну модель взаємозв'язку зазначених факторів, яка дозволяє комплексно оцінювати їх вплив на кінцеві результати реалізації будівельного проєкту.

У роботі здійснено класифікацію факторів динамічних змін, що виникають у процесі реалізації будівельних проєктів. На відміну від існуючих підходів, які здебільшого розглядають окремі види ризиків або виробничих відхилень, запропоновано комплексну систему класифікації, яка об'єднує зовнішні, внутрішні, ресурсні, технологічні, економічні, організаційні та інформаційні фактори. Для кожної групи визначено характер впливу на процес організації будівництва, можливі наслідки виникнення відхилень та механізми їх компенсації шляхом використання сучасних цифрових технологій.

Особливу увагу приділено дослідженню впливу динамічних змін на ефективність організації будівельного виробництва. Встановлено, що найбільш критичними наслідками несвоєчасного реагування на зміни є порушення календарних графіків, зростання вартості виконання робіт, зниження продуктивності використання матеріально-технічних ресурсів, погіршення координації між учасниками будівельного процесу та зменшення загальної керованості проєктом. Доведено, що традиційні методи управління не забезпечують своєчасної адаптації до таких змін, оскільки орієнтовані переважно на реактивне усунення вже виниклих відхилень.

У дисертації виконано критичний аналіз обмежень традиційних підходів до організації будівництва в умовах цифрової трансформації галузі. Визначено, що використання ізольованих інформаційних систем, дублювання даних, відсутність

єдиних механізмів інформаційного обміну та недостатній рівень автоматизації процесів прийняття рішень істотно знижують ефективність управління будівельними проєктами. Обґрунтовано, що головною причиною виникнення більшості організаційно-технологічних проблем є фрагментарність інформаційного забезпечення та відсутність інтегрованого цифрового середовища, у якому всі учасники проєкту працюють з актуальними та узгодженими даними.

Значне місце у другому розділі відведено дослідженню інформаційного забезпечення прийняття управлінських рішень на основі ERP-систем. Проаналізовано функціональні можливості сучасних ERP-платформ щодо інтеграції даних про ресурси, строки, фінансові показники, виконання робіт та управління змінами. Встановлено, що використання ERP-систем забезпечує централізацію інформації, підвищує оперативність аналізу стану будівельного проєкту та створює передумови для переходу від реактивного до проактивного управління, орієнтованого на прогнозування можливих відхилень і своєчасне прийняття коригувальних управлінських рішень.

У результаті проведених досліджень сформовано методологічні засади побудови адаптивної цифрової моделі організації будівництва. Запропонована методологія базується на принципах системності, інформаційної інтеграції, безперервності обміну даними, адаптивності, багатоваріантності управлінських рішень та використанні цифрових технологій як інструменту підтримки процесів управління. На відміну від традиційних організаційно-технологічних моделей, запропонований підхід передбачає безперервне оновлення інформації про стан будівельного проєкту, автоматизований аналіз впливу змін на основні параметри реалізації будівництва та формування альтернативних сценаріїв подальшого розвитку подій.

Обґрунтовано концептуальну модель адаптивного цифрового управління, у якій ERP-система виконує функцію центральної інформаційно-аналітичної платформи, BIM-модель забезпечує інформаційну основу щодо характеристик об'єкта будівництва, а CDE формує єдине цифрове середовище взаємодії всіх учасників будівельного процесу. Така інтеграція забезпечує оперативне виявлення

відхилень, автоматизовану оцінку їх впливу на реалізацію проєкту, формування можливих варіантів реагування та підтримку прийняття найбільш ефективних організаційно-технологічних рішень.

Результати другого розділу створили науково-методичне підґрунтя для розроблення власної адаптивної цифрової моделі підтримки управлінських рішень, яка представлена у наступному розділі дисертації. Саме проведений аналіз факторів динамічних змін, визначення закономірностей їх впливу на організацію будівельного виробництва та обґрунтування принципів інформаційної інтеграції стали основою формування авторської концепції цифрової трансформації управління будівельними проєктами, що забезпечує підвищення ефективності, адаптивності та стійкості будівельного виробництва в умовах сучасних викликів.

У третьому розділі дисертаційної роботи розроблено науково-методичні засади формування адаптивної моделі цифрової підтримки управлінських рішень, яка забезпечує інтеграцію інформаційних, організаційно-технологічних та управлінських процесів у межах єдиного цифрового середовища реалізації будівельних проєктів. Основною ідеєю запропонованого підходу є перехід від фрагментарного використання окремих цифрових інструментів до комплексної системи управління, у якій інформація про об'єкт будівництва, ресурси, календарні параметри, фінансові показники та виробничі процеси функціонує як єдина взаємопов'язана система підтримки прийняття управлінських рішень.

Розроблення авторської моделі ґрунтується на результатах попередніх теоретичних досліджень та аналізі закономірностей функціонування будівельного виробництва в умовах невизначеності. Обґрунтовано, що сучасна система організації будівництва повинна забезпечувати не лише інформаційне супроводження виробничих процесів, а й можливість безперервного аналізу стану реалізації проєкту, прогнозування розвитку ситуації, оцінювання альтернативних сценаріїв та автоматизованої підтримки прийняття управлінських рішень. Саме ця концепція стала основою побудови запропонованої цифрової моделі.

У роботі сформульовано принципи формування цифрової моделі організації будівництва, до яких віднесено принципи системної інтеграції, адаптивності,

безперервності інформаційного обміну, актуальності даних, багатоваріантності управлінських рішень, прогнозування можливих відхилень та забезпечення оперативного реагування на зміни умов реалізації проєкту. На відміну від існуючих моделей, запропонований підхід розглядає інформаційні ресурси як один із ключових елементів організаційно-технологічної системи, що безпосередньо впливає на ефективність управління будівельним виробництвом.

Центральним результатом третього розділу стало розроблення концепції інтегрованого цифрового середовища **BIM–ERP–CDE**, яка забезпечує об'єднання всіх основних інформаційних потоків будівельного проєкту в єдиній цифровій платформі. Встановлено, що інформаційна модель будівлі (BIM) повинна виступати базовим джерелом технічної інформації щодо характеристик об'єкта будівництва, ERP-система — забезпечувати управління ресурсами, фінансами, календарним плануванням та виробничими процесами, тоді як CDE створює організаційні умови для ефективної взаємодії всіх учасників інвестиційно-будівельного процесу. Такий підхід дозволяє усунути дублювання інформації, забезпечити синхронізацію даних і сформуванню єдину інформаційну основу прийняття управлінських рішень.

У дисертації запропоновано модель взаємодії основних параметрів будівельного проєкту, яка враховує взаємозалежність робіт, ресурсів, календарних строків, фінансових показників та зовнішніх умов реалізації будівництва. На відміну від існуючих моделей, вона дозволяє оцінювати наслідки будь-яких змін не ізольовано, а з урахуванням їх комплексного впливу на функціонування всієї організаційно-технологічної системи. Завдяки цьому створюється можливість своєчасного виявлення потенційних ризиків, прогнозування розвитку ситуації та вибору найбільш ефективних варіантів реагування.

Особливе місце у роботі займає розроблений механізм підтримки прийняття управлінських рішень у середовищі ERP. Запропоновано алгоритм інформаційно-аналітичної обробки даних, який забезпечує автоматизоване формування альтернативних організаційно-технологічних рішень, їх багатокритеріальне оцінювання та вибір оптимального варіанта залежно від поточного стану реалізації будівельного проєкту. На відміну від традиційних підходів, у яких ERP

використовується переважно як система обліку ресурсів, у запропонованій моделі вона виконує функцію інтелектуальної платформи підтримки управління, що забезпечує інтеграцію даних, їх аналіз, прогнозування та інформаційний супровід процесу прийняття рішень.

Одним із найбільш вагомих результатів дисертації стало розроблення моделі адаптивного перебудування організаційно-технологічних процесів. Встановлено, що ефективність функціонування будівельного виробництва визначається не лише оптимальністю початкових планових параметрів, а насамперед здатністю системи оперативно реагувати на зміни зовнішнього і внутрішнього середовища. Запропонована модель передбачає постійний моніторинг фактичного стану реалізації проєкту, автоматичне виявлення відхилень від планових показників, аналіз причин їх виникнення, прогнозування можливих наслідків та формування комплексу коригувальних організаційно-технологічних заходів.

У межах дослідження вперше сформовано систему показників оцінювання ефективності та адаптивності будівельного виробництва, яка дозволяє комплексно оцінювати результативність функціонування цифрової системи управління. На відміну від традиційних підходів, що орієнтуються переважно на оцінювання календарних строків або вартості виконання робіт, запропонована система показників враховує рівень інформаційної узгодженості, ступінь адаптивності організаційно-технологічної системи, ефективність використання ресурсів, оперативність прийняття управлінських рішень, стабільність функціонування виробничих процесів та інтегральну результативність цифрового управління.

Науковою новизною запропонованої моделі є введення кількісної оцінки інформаційної узгодженості як одного з визначальних параметрів ефективності організації будівництва. Доведено, що саме рівень синхронізації інформаційних потоків між учасниками проєкту істотно впливає на швидкість прийняття управлінських рішень, ефективність використання ресурсів та здатність будівельної системи адаптуватися до динамічних змін. Запропонований коефіцієнт інформаційної узгодженості дозволяє кількісно оцінювати якість функціонування

інтегрованого цифрового середовища та використовувати отримані результати для подальшої оптимізації процесів управління.

Завершальним етапом третього розділу стало розроблення алгоритму практичної реалізації моделі цифрової підтримки управління. Алгоритм охоплює повний цикл функціонування цифрової системи — від отримання інформації про поточний стан будівельного проєкту, її інтеграції та аналітичної обробки до формування альтернативних управлінських рішень, оцінювання їх ефективності, вибору оптимального варіанта та контролю результатів його реалізації. Такий підхід забезпечує безперервність процесу управління, своєчасне реагування на зміни та створює передумови для формування принципово нового рівня цифрової організації будівельного виробництва.

У цілому результати третього розділу становлять основний науковий внесок дисертаційного дослідження, оскільки саме в ньому сформовано авторську адаптивну модель цифрової підтримки управлінських рішень, що інтегрує технології BIM, ERP та CDE у єдину інформаційно-аналітичну систему. Запропоновані науково-методичні положення створюють основу для переходу від традиційних моделей управління до сучасної цифрової концепції організації будівництва, орієнтованої на адаптивність, інформаційну інтеграцію та прийняття управлінських рішень на основі актуальних даних.

У четвертому розділі дисертаційної роботи здійснено практичну апробацію розробленої адаптивної моделі цифрової підтримки управлінських рішень та виконано комплексне оцінювання ефективності її застосування у процесі реалізації будівельних проєктів. Основною метою даного етапу дослідження стало підтвердження практичної придатності запропонованих теоретичних положень, перевірка ефективності інтегрованого цифрового середовища BIM–ERP–CDE в умовах реального будівельного виробництва, а також визначення економічної доцільності впровадження цифрових технологій у систему організації будівництва.

Для забезпечення можливості практичного використання запропонованих наукових положень автором розроблено методику впровадження адаптивної цифрової моделі управління будівельними проєктами. Методика визначає

послідовність переходу від традиційних підходів до цифрового управління та включає етапи формування цифрової інформаційної моделі проєкту, інтеграції BIM-, ERP- та CDE-платформ, організації єдиного інформаційного середовища, налаштування механізмів автоматизованого обміну даними, формування системи моніторингу виконання робіт та організації підтримки процесу прийняття управлінських рішень на основі актуальної інформації.

Практичну перевірку розробленої моделі проведено на прикладі реалізації будівельних проєктів різного рівня складності, що дозволило оцінити універсальність запропонованих підходів та їх ефективність за різних організаційно-технологічних умов. У процесі апробації виконано адаптацію цифрової моделі до особливостей конкретних будівельних об'єктів, здійснено інтеграцію інформаційних потоків між учасниками будівництва та організовано використання ERP-платформи як центрального елемента підтримки управління проєктами.

Особливу увагу приділено дослідженню практичного функціонування інтегрованого цифрового середовища, у якому BIM-модель забезпечувала інформаційну основу щодо характеристик об'єкта будівництва, ERP-система здійснювала управління ресурсами, календарними графіками, фінансовими потоками та виробничими процесами, а CDE-платформа забезпечувала єдиний інформаційний простір взаємодії всіх учасників будівництва. Такий підхід дозволив суттєво скоротити час оброблення інформації, мінімізувати дублювання даних, забезпечити прозорість виконання робіт та підвищити якість інформаційної взаємодії між усіма учасниками реалізації проєкту.

У процесі практичного застосування моделі проведено порівняльний аналіз традиційних організаційно-технологічних підходів та запропонованої цифрової системи управління. За результатами дослідження встановлено, що використання інтегрованого цифрового середовища забезпечує суттєве підвищення оперативності прийняття управлінських рішень, скорочення часу оброблення інформації, покращення координації виробничих процесів та підвищення ефективності використання матеріально-технічних, трудових і фінансових

ресурсів. Доведено, що цифрова інтеграція інформаційних потоків сприяє значному зменшенню кількості організаційних помилок, своєчасному виявленню відхилень від планових показників та підвищенню достовірності управлінської інформації.

Виконане оцінювання ефективності впровадження ERP-підтримки підтвердило високу результативність запропонованої моделі. Встановлено, що використання цифрової системи управління дозволяє істотно скоротити тривалість підготовки та погодження управлінських рішень, забезпечити більш раціональне використання виробничих ресурсів, підвищити рівень інформаційної узгодженості між усіма учасниками будівельного процесу та мінімізувати негативний вплив динамічних змін на результати реалізації будівельних проєктів. Особливого значення набуває можливість оперативного аналізу альтернативних сценаріїв розвитку подій, що забезпечує прийняття найбільш ефективних управлінських рішень у режимі реального часу.

У роботі проведено комплексне економічне оцінювання результатів цифрової трансформації організації будівництва. На основі аналізу показників ефективності встановлено, що витрати, пов'язані із впровадженням цифрових технологій та створенням інтегрованого інформаційного середовища, компенсуються за рахунок скорочення непродуктивних витрат, підвищення продуктивності використання ресурсів, зменшення кількості організаційних помилок, оптимізації календарних графіків та підвищення загальної керованості будівельними проєктами. Результати дослідження підтвердили економічну доцільність використання запропонованої моделі та засвідчили можливість отримання стійкого економічного ефекту вже на початкових етапах її практичного застосування.

За результатами апробації встановлено, що використання адаптивної цифрової моделі дозволяє суттєво знизити рівень відхилень від планових строків виконання будівельних робіт, скоротити перевитрати матеріально-технічних ресурсів, підвищити оперативність прийняття управлінських рішень та забезпечити більш ефективне управління змінами, що виникають у процесі реалізації проєктів. Практична перевірка також підтвердила можливість масштабування

запропонованої моделі для використання на будівельних об'єктах різного функціонального призначення, складності та вартості.

На підставі узагальнення результатів практичного впровадження сформовано методичні рекомендації щодо поетапного переходу будівельних підприємств до використання інтегрованих цифрових технологій управління. Запропоновано комплекс організаційних, інформаційних та технічних заходів, спрямованих на забезпечення ефективної інтеграції BIM-, ERP- та CDE-платформ у діяльність будівельних організацій, визначено умови успішного впровадження цифрових систем управління, окреслено вимоги до інформаційної взаємодії між учасниками будівельного процесу та сформовано рекомендації щодо подальшого розвитку цифрової трансформації будівельної галузі.

Практична реалізація результатів дослідження підтвердила достовірність сформульованих у дисертації наукових положень та ефективність запропонованої адаптивної моделі цифрової підтримки управлінських рішень. Доведено, що інтеграція інформаційного моделювання, систем управління ресурсами підприємства та спільного інформаційного середовища забезпечує якісно новий рівень організації будівельного виробництва, підвищує ефективність використання ресурсного потенціалу, сприяє скороченню строків реалізації будівельних проєктів, підвищує рівень керованості виробничими процесами та створює науково обґрунтовані передумови для подальшої цифрової трансформації будівельної галузі України.

Отримані результати дослідження у сукупності формують завершену науково-методологічну основу цифрової трансформації організації будівельного виробництва, орієнтовану на підвищення ефективності управління будівельними проєктами в умовах динамічних змін зовнішнього та внутрішнього середовища. Запропоновані у дисертації наукові положення, моделі, методичні підходи та алгоритми забезпечують комплексне поєднання організаційно-технологічних процесів із сучасними цифровими технологіями управління та створюють передумови для переходу від традиційних методів організації будівництва до

інтегрованого інформаційно-керованого середовища прийняття управлінських рішень.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у розробленні адаптивної цифрової моделі організації будівельного виробництва, що інтегрує технології BIM, ERP та CDE у єдине інформаційно-аналітичне середовище підтримки прийняття управлінських рішень. У роботі вперше запропоновано підхід до оцінювання інформаційної узгодженості як одного з визначальних чинників ефективності організації будівництва, удосконалено методичні підходи до формування організаційно-технологічних рішень в умовах невизначеності та набули подальшого розвитку теоретичні положення щодо адаптивного управління будівельним виробництвом у цифровому середовищі.

Практичне значення результатів дослідження полягає у можливості використання розроблених моделей, алгоритмів та методичних рекомендацій під час реалізації інвестиційно-будівельних проєктів, впровадження ERP-систем у діяльність будівельних підприємств, формування інтегрованих цифрових середовищ управління та розвитку сучасних підходів до цифрової трансформації будівельної галузі. Практична апробація підтвердила ефективність запропонованих рішень щодо підвищення оперативності прийняття управлінських рішень, покращення використання ресурсів, скорочення строків реалізації будівельних проєктів, зниження організаційних ризиків та забезпечення більш високого рівня координації між усіма учасниками будівництва.

Основні положення дисертаційного дослідження апробовано під час виконання науково-дослідних робіт, реалізації будівельних проєктів, а також представлені на міжнародних і всеукраїнських науково-практичних конференціях. Результати дослідження опубліковано у наукових виданнях, що індексуються у міжнародних наукометричних базах даних, фахових виданнях України, колективній монографії та матеріалах наукових конференцій, що підтверджує їх наукову достовірність, практичну значущість та відповідність сучасному рівню розвитку будівельної науки.

Дисертаційна робота є завершеним самостійним науковим дослідженням, у якому вирішено актуальне науково-прикладне завдання щодо розроблення організаційно-технологічних засад забезпечення адаптивності будівельного виробництва на основі використання цифрових моделей та ERP-підтримки управлінських рішень. Отримані результати характеризуються науковою новизною, теоретичною обґрунтованістю та практичною цінністю, а їх упровадження сприятиме підвищенню ефективності реалізації будівельних проєктів, розвитку цифрового управління у будівництві та подальшому впровадженню сучасних інформаційних технологій у практику організації будівельного виробництва.

Ключові слова: цифрова трансформація, організація будівництва, будівельне виробництво, ERP, BIM, CDE, цифрове управління, адаптивне управління, інформаційне моделювання, організаційно-технологічні рішення, підтримка прийняття управлінських рішень, цифровізація будівництва, інформаційна інтеграція, управління будівельними проєктами, ефективність будівельного виробництва.

ABSTRACT

Zhelezniak Vladyslav Leonidovych. Digital Transformation of Construction Management: Models and ERP-Based Decision Support Tools. – Qualifying scientific work submitted as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy (PhD) in Specialty 192 “Construction and Civil Engineering”, Field of Knowledge 19 “Architecture and Construction”. – Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, 2026.

The contemporary development of the construction industry is characterized by a substantial increase in the complexity of organizational and technological processes associated with the implementation of construction projects, growing requirements for the efficient utilization of resources, increasing responsibility of all participants involved in investment and construction activities, and the necessity to ensure the stable achievement of target indicators related to project duration, cost, and quality. At the same time, construction production currently operates under conditions of considerable uncertainty caused by the simultaneous influence of numerous external and internal factors, including fluctuations in the prices of construction materials and technical resources, changes in financing mechanisms, disruptions in logistics chains, the need for continuous adjustment of design solutions, and the growing complexity of interaction among all stakeholders participating in the construction process.

Traditional organizational and technological approaches to construction management were developed under conditions of relative stability and were primarily based on deterministic planning models. These approaches assumed that the principal parameters of a construction project remained unchanged throughout its entire life cycle. However, modern construction practice demonstrates that the actual conditions of project implementation differ significantly from those anticipated during the planning stage. Consequently, organizational and technological decisions require continuous revision and adaptation in response to changing project conditions.

One of the fundamental challenges of contemporary construction lies in the insufficient integration of information flows among clients, designers, contractors, consultants, suppliers, and other project participants. In most practical cases, information is generated, processed, and stored within separate software environments, which considerably complicates the timely exchange of data, reduces information consistency, and negatively affects the quality of managerial decision-making. As a result, even relatively minor deviations in project conditions may lead to significant schedule delays, cost overruns, inefficient resource utilization, and a general decrease in the effectiveness of construction project management.

In this context, digital transformation has become one of the key strategic directions for the development of the construction industry. The implementation of advanced digital technologies enables the integration of information flows, improves the transparency of management processes, and facilitates the transition from reactive to proactive construction project management. Particular importance in this process belongs to the technologies of **Building Information Modeling (BIM)**, **Enterprise Resource Planning (ERP)**, and **Common Data Environment (CDE)**, which together provide the foundation for creating an integrated digital environment throughout the entire life cycle of a construction project.

The implementation of BIM technologies makes it possible to develop a comprehensive digital representation of a construction facility and to establish direct links between design solutions and construction processes. ERP systems provide opportunities for integrating information concerning resources, finances, scheduling, procurement, and project execution, whereas CDE platforms establish a unified environment for information exchange among all stakeholders involved in project delivery. Nevertheless, an analysis of existing scientific publications and practical experience indicates that the issue of comprehensive integration of these technologies within a single adaptive construction management model has not yet been sufficiently investigated.

Existing approaches are mainly focused on the automation of individual management functions and therefore fail to provide the level of adaptability required under rapidly changing construction conditions. In most cases, digital technologies are

employed merely as information-processing tools rather than as components of an integrated decision-support system. Consequently, there is a need to develop fundamentally new scientific approaches to construction management that combine the capabilities of digital technologies with the principles of adaptive organizational and technological management.

The dissertation is based on the scientific hypothesis that improving the efficiency of construction management under conditions of dynamic change can be achieved through the development of an adaptive digital management model integrating BIM, ERP, and CDE technologies into a unified decision-support environment operating on the basis of continuously updated project information.

The purpose of the dissertation is to develop organizational and technological principles for ensuring the adaptability of construction production under dynamically changing project implementation conditions through the application of digital models and ERP-based decision support systems.

To achieve this objective, a comprehensive set of theoretical, methodological, and applied studies was carried out to identify the regularities governing construction production under conditions of uncertainty, to develop an adaptive digital management model, and to verify its effectiveness through practical implementation in real construction projects.

The **object of the research** is the process of organizing construction production under conditions of dynamic change.

The **subject of the research** is the organizational and technological principles for ensuring the adaptability of construction production based on digital models and ERP-supported managerial decision-making.

The methodological framework of the research is based on the principles of systems analysis, process-oriented and functional approaches, methods of analysis and synthesis, system modelling, comparative analysis, and contemporary information and analytical tools used in digital construction project management.

Main Content and Research Results

Chapter 1 examines the theoretical and methodological foundations of the digital transformation of construction management as a contemporary concept for the development of the construction industry under conditions of increasing complexity of investment and construction projects and growing requirements for management efficiency. A comprehensive analysis of the evolution of organizational and technological approaches to construction management is presented, beginning with traditional linear and flow-based construction methods, network planning techniques, and classical project management systems, and extending to contemporary digital concepts of integrated management based on advanced information technologies.

It has been established that traditional organizational and technological models were developed under conditions of a relatively stable production environment and were based on deterministic planning approaches, in which the principal parameters of a construction project are defined at the initial stage and remain virtually unchanged throughout the project implementation process. The conducted analysis of contemporary construction practice has demonstrated that such approaches are no longer capable of ensuring the required level of management efficiency under conditions of rapidly changing external environments, fluctuations in resource availability, instability of financial support, disruptions in logistics chains, the necessity for continuous adjustment of design solutions, and the constant emergence of new organizational and technological risks.

The dissertation systematizes contemporary approaches to the digitalization of construction production and establishes that the key direction of modern construction management lies in the integration of **Building Information Modeling (BIM)**, **Enterprise Resource Planning (ERP)** systems, and the **Common Data Environment (CDE)**. Unlike previous studies, where these technologies have generally been considered separately, the present research examines them as interconnected components of a comprehensive decision-support system capable of ensuring the continuity of information flows throughout the entire life cycle of a construction project.

Particular attention is devoted to investigating the specific characteristics of construction production under conditions of dynamic change. The principal factors

affecting the efficiency of construction management have been identified and classified into economic, organizational, technological, resource-related, informational, and external groups. It has been substantiated that information inconsistency among project participants represents one of the major causes of management inefficiency, resulting in schedule delays, increased construction costs, duplication of information, inconsistencies in project documentation, and managerial decisions based on incomplete or outdated information.

The first chapter also provides a critical analysis of existing organizational and technological construction management models, identifying their principal advantages and limitations. It is demonstrated that most contemporary approaches fail to ensure an adequate level of adaptability to changing project environments because they are primarily focused on automating individual management functions rather than establishing an integrated decision-support system capable of responding dynamically to changing project conditions. Consequently, the necessity of transitioning from static construction management models to adaptive digital systems capable of continuous adjustment throughout project implementation has been scientifically substantiated.

Based on the conducted theoretical analysis, the dissertation establishes the scientific prerequisites for developing an adaptive digital construction management model integrating the principles of systems engineering, information integration, adaptive management, and digital decision support. It has been demonstrated that the integration of BIM, ERP, and CDE technologies provides the basis for creating a unified digital environment in which construction project management is performed using continuously updated information. Such integration creates favourable conditions for improving resource utilization efficiency, reducing project implementation time, minimizing organizational risks, and increasing the overall effectiveness of construction production management.

Chapter 2 presents a comprehensive investigation of the factors determining the efficiency of organizational and technological decision-making during construction project implementation and develops the methodological foundations for an adaptive digital construction management model. The research is based on the concept that modern

construction represents a complex open system in which managerial decisions are influenced by numerous interrelated technical, economic, organizational, informational, and environmental factors continuously changing throughout the project life cycle.

Using a systems analysis approach, the organizational and technological decision-making structure in construction has been identified, and its role within the overall management system of investment and construction projects has been determined. It has been substantiated that every managerial decision is formed under the influence of a complex combination of interconnected factors, among which resource availability, scheduling constraints, project financing, technological characteristics of construction processes, information interaction among project stakeholders, and the level of organizational digital maturity play a decisive role. A structural model describing the interaction of these factors has been developed, making it possible to evaluate their integrated influence on the final performance indicators of construction projects.

The dissertation proposes a comprehensive classification of dynamic changes occurring during construction project implementation. Unlike existing approaches, which generally consider only individual categories of risks or production deviations, the proposed classification integrates external, internal, technological, organizational, resource-related, economic, and informational factors into a unified analytical framework. For each category, the nature of its influence on construction management, its potential consequences, and appropriate mechanisms for compensation through digital technologies have been identified and substantiated.

Special attention is devoted to analysing the influence of dynamic changes on the efficiency of construction production. The study demonstrates that the most critical consequences of untimely responses to project changes include violations of construction schedules, increased project costs, reduced efficiency in resource utilization, deterioration of coordination among project participants, and an overall decline in project controllability. It has also been proven that traditional management approaches are incapable of providing timely adaptation because they mainly rely on reactive responses after deviations have already occurred rather than preventing them proactively.

The dissertation further presents a critical assessment of the limitations of traditional construction management approaches within the context of digital transformation. It has been established that isolated information systems, duplicated datasets, the absence of unified mechanisms for information exchange, and insufficient automation of managerial processes significantly reduce project management efficiency. It is argued that the principal cause of most organizational and technological problems lies in fragmented information management and the absence of an integrated digital environment in which all project participants operate using synchronized and continuously updated information.

A significant part of Chapter 2 is devoted to investigating information support for managerial decision-making based on Enterprise Resource Planning (ERP) systems. The functional capabilities of contemporary ERP platforms regarding the integration of data on resources, project schedules, financial indicators, construction progress, procurement, and change management have been comprehensively analysed. The study demonstrates that ERP systems provide centralized information management, improve the operational efficiency of project monitoring, and create the necessary conditions for the transition from reactive management to proactive management based on forecasting potential deviations and implementing timely corrective organizational and technological measures.

As a result of the conducted research, the methodological foundations for developing an adaptive digital construction management model have been established. The proposed methodology is based on the principles of systems integration, continuous information exchange, adaptability, multi-criteria decision-making, and the application of digital technologies as comprehensive instruments for supporting managerial processes. Unlike traditional organizational and technological models, the proposed approach provides continuous updating of project information, automated assessment of the influence of dynamic changes on the principal project parameters, and the generation of alternative development scenarios that enable managers to respond promptly to changing construction conditions.

A conceptual model of adaptive digital construction management has been developed, in which the ERP system performs the role of the central information and analytical platform, the BIM model serves as the primary source of technical information concerning the construction facility, and the Common Data Environment (CDE) establishes a unified digital space for communication and collaboration among all project stakeholders. The integration of these components ensures the timely identification of deviations, automated assessment of their influence on project implementation, generation of alternative response scenarios, and support for selecting the most effective organizational and technological decisions.

The results obtained in Chapter 2 constitute the scientific and methodological basis for developing the author's adaptive digital decision-support model presented in the subsequent chapter of the dissertation. The comprehensive analysis of dynamic change factors, identification of the regularities governing their influence on construction production, and substantiation of the principles of information integration have become the foundation for the author's concept of digital transformation in construction management, aimed at increasing the efficiency, adaptability, and resilience of construction production under rapidly changing project conditions.

Chapter 3 presents the development of the scientific and methodological principles underlying an adaptive digital decision-support model that integrates informational, organizational, technological, and managerial processes into a unified digital environment for construction project implementation. The principal concept of the proposed approach consists in replacing the fragmented application of individual digital tools with an integrated management system in which information concerning the construction facility, project resources, schedules, financial indicators, and production processes functions as a unified interconnected decision-support system.

The development of the proposed model is based on the theoretical findings obtained in the previous chapters together with an analysis of the regularities governing construction production under conditions of uncertainty and continuous change. It has been substantiated that a contemporary construction management system should not merely provide information support for production processes but should also ensure

continuous monitoring of project implementation, forecasting of possible developments, evaluation of alternative management scenarios, and automated support for managerial decision-making. These principles constitute the conceptual basis for the proposed adaptive digital model.

The dissertation formulates the fundamental principles governing the development of the digital construction management model, including systems integration, adaptability, continuity of information exchange, data reliability and consistency, multi-criteria decision-making, forecasting of potential deviations, and rapid response to changing project conditions. Unlike existing approaches, the proposed model considers information resources not simply as supporting data but as one of the key components of the organizational and technological system directly influencing the efficiency of construction management.

The central scientific achievement of Chapter 3 is the development of the concept of an integrated **BIM–ERP–CDE digital environment**, which combines all principal information flows of a construction project into a unified digital platform. It has been established that the Building Information Model (BIM) should function as the primary source of technical information describing the construction facility; the Enterprise Resource Planning (ERP) system should provide integrated management of resources, finances, scheduling, procurement, and production processes; while the Common Data Environment (CDE) should ensure effective collaboration and information exchange among all participants involved in investment and construction activities. Such integration eliminates information duplication, synchronizes data, and creates a unified information basis for managerial decision-making throughout the entire project life cycle.

The dissertation further proposes a model describing the interaction of the principal construction project parameters, taking into account the interdependence of construction activities, resource allocation, project schedules, financial performance, and external environmental conditions. Unlike existing approaches, the proposed model makes it possible to evaluate the consequences of any project change not in isolation but in terms of its integrated influence on the functioning of the entire organizational and technological system. This creates opportunities for the early identification of potential

risks, forecasting project development scenarios, and selecting the most efficient organizational and technological responses.

A special place in the proposed concept is occupied by the mechanism for supporting managerial decision-making within the ERP environment. The dissertation develops an information and analytical algorithm that provides automated generation of alternative organizational and technological solutions, their multi-criteria evaluation, and the selection of the optimal alternative depending on the current status of project implementation. Unlike conventional approaches, in which ERP systems are primarily employed as instruments for resource accounting and financial management, the proposed model transforms ERP into an intelligent decision-support platform capable of integrating heterogeneous data, performing analytical processing, forecasting project development, and providing continuous information support throughout the managerial decision-making process.

One of the most significant scientific achievements of the dissertation is the development of a model for the adaptive restructuring of organizational and technological processes in construction. The research demonstrates that the efficiency of construction production depends not only on the optimality of the initial planning solutions but primarily on the capability of the management system to respond promptly to changes occurring in both the external and internal project environment. The proposed model incorporates continuous monitoring of the actual project status, automated identification of deviations from planned indicators, analysis of the causes of these deviations, forecasting of their potential consequences, and generation of appropriate corrective organizational and technological measures.

Within the framework of the research, a comprehensive system of indicators for assessing the efficiency and adaptability of construction production has been developed. Unlike traditional evaluation approaches, which focus mainly on project duration or construction cost, the proposed assessment system considers the level of information consistency, adaptability of the organizational and technological system, efficiency of resource utilization, responsiveness of managerial decision-making, stability of production processes, and the overall effectiveness of digital construction management.

This integrated system of indicators provides an objective basis for evaluating the performance of digital management systems and supports continuous improvement of organizational processes.

A significant element of the proposed methodology is the introduction of quantitative assessment of information consistency as one of the principal indicators determining the efficiency of construction management. The research proves that the degree of synchronization of information flows among project participants directly influences the speed and quality of managerial decision-making, the efficiency of resource utilization, the reduction of organizational conflicts, and the capability of the construction management system to adapt to dynamic project conditions. The proposed Information Consistency Index enables quantitative evaluation of the effectiveness of an integrated digital environment and provides analytical support for further optimization of construction management processes.

Another important scientific contribution consists in the development of an algorithm for the practical implementation of the adaptive digital decision-support model. The proposed algorithm encompasses the complete operational cycle of the digital management system, beginning with the acquisition of information concerning the current project status, followed by data integration, analytical processing, identification of deviations, generation of alternative managerial decisions, multi-criteria evaluation of these alternatives, selection of the optimal solution, implementation of the selected decision, and continuous monitoring of its effectiveness. Such an approach ensures uninterrupted management processes, timely adaptation to changing project conditions, and establishes the foundation for a fundamentally new level of digital construction management.

The dissertation also substantiates the functional architecture of the integrated digital management environment, defining the interaction between its principal subsystems and the information flows connecting them. Particular attention is devoted to establishing the relationships among technical information contained in BIM models, organizational and economic information processed by ERP systems, and collaborative information managed within the Common Data Environment. The proposed architecture

provides consistency and integrity of information throughout the project life cycle and significantly reduces the probability of information losses, inconsistencies, and duplication.

It has been demonstrated that the implementation of the proposed adaptive model enables the transition from fragmented management of individual construction processes to integrated management of the entire organizational and technological system. Such integration substantially increases management flexibility, improves the transparency of managerial procedures, enhances the reliability of forecasting, and enables timely adaptation of construction production to continuously changing implementation conditions.

The results presented in Chapter 3 constitute the principal scientific contribution of the dissertation, since this chapter introduces the author's adaptive digital decision-support model integrating BIM, ERP, and CDE technologies into a unified information and analytical environment for construction management. The proposed scientific and methodological framework establishes the theoretical and practical basis for transforming traditional construction management into an adaptive digital management system capable of supporting informed managerial decision-making based on continuously updated, integrated, and reliable project information.

Chapter 4 is devoted to the practical implementation and experimental verification of the proposed adaptive digital decision-support model, as well as to a comprehensive assessment of its effectiveness in the management of construction projects. The primary objective of this stage of the research is to confirm the practical applicability of the developed theoretical principles, to evaluate the performance of the integrated BIM–ERP–CDE environment under real construction conditions, and to determine the organizational and economic feasibility of implementing digital technologies in construction management.

To ensure the practical applicability of the proposed scientific developments, a comprehensive methodology for implementing the adaptive digital construction management model has been developed. The methodology defines the sequence of organizational and technological measures required for transitioning from traditional

construction management approaches to integrated digital management. It includes the creation of digital information models, integration of BIM, ERP, and CDE platforms, establishment of a unified information environment, configuration of automated data exchange mechanisms, implementation of continuous project monitoring procedures, and organization of managerial decision support based on real-time project information.

The proposed adaptive digital model was validated through its application to construction projects of varying complexity, which made it possible to assess its universality, scalability, and effectiveness under different organizational and technological conditions. During the implementation process, the model was adapted to the specific characteristics of individual construction projects, while information flows among all project participants were integrated within a unified digital environment. In this framework, the ERP platform functioned as the central management component responsible for coordinating resources, monitoring project performance, and supporting managerial decision-making.

Particular attention was paid to evaluating the practical operation of the integrated digital environment, in which the Building Information Model served as the primary source of technical information describing the construction facility, the Enterprise Resource Planning system performed the functions of resource, financial, scheduling, and production management, and the Common Data Environment ensured a unified digital space for communication, coordination, and information exchange among all project stakeholders. The implementation of this integrated approach significantly reduced information processing time, eliminated data duplication, increased the transparency of construction processes, and substantially improved the quality and reliability of information exchange throughout project implementation.

A comparative analysis between traditional organizational and technological approaches and the proposed adaptive digital management system was carried out during the practical implementation stage. The obtained results demonstrated that the application of the integrated digital environment considerably improves the efficiency of managerial decision-making, reduces the time required for information processing, enhances coordination among construction participants, and increases the efficiency of utilizing

material, technical, financial, and human resources. Furthermore, the integration of information flows significantly decreases the number of organizational errors, enables timely identification of deviations from planned project indicators, and substantially improves the reliability of managerial information.

The evaluation of ERP-based decision support confirmed the high effectiveness of the proposed model. The research demonstrated that the implementation of the digital management system substantially reduces the time required for preparing, coordinating, and approving managerial decisions, improves resource allocation, increases the level of information consistency among all construction participants, and minimizes the negative impact of dynamic changes on project implementation. An especially important advantage of the proposed approach is its capability to analyse alternative development scenarios in real time, thereby enabling managers to select the most efficient organizational and technological solutions under changing project conditions.

A comprehensive economic assessment of the digital transformation of construction management was also conducted. Based on the analysis of performance indicators, it was established that the investments associated with implementing digital technologies and developing an integrated information environment are compensated through reductions in unproductive costs, improvements in resource utilization efficiency, decreases in organizational errors, optimization of construction schedules, and enhancement of overall project controllability. The obtained results confirm the economic feasibility of implementing the proposed adaptive model and demonstrate the possibility of achieving sustainable economic benefits even during the initial stages of practical implementation.

The practical verification further demonstrated that the adaptive digital management model significantly reduces deviations from planned construction schedules, minimizes excessive consumption of material and technical resources, improves the responsiveness of managerial decision-making, and provides more effective management of organizational and technological changes arising during project implementation. The conducted investigations also confirmed the scalability of the

proposed model, proving that it can be successfully applied to construction projects of various functional purposes, sizes, complexity levels, and investment values.

Based on the practical implementation results, methodological recommendations for the phased transition of construction enterprises toward integrated digital management technologies have been developed. These recommendations include a comprehensive set of organizational, informational, technological, and managerial measures aimed at ensuring the effective integration of BIM, ERP, and CDE platforms into construction companies. The dissertation identifies the principal organizational conditions necessary for successful digital transformation, formulates requirements for effective information interaction among project participants, and proposes practical recommendations for the further development of digital construction management within the construction industry.

The practical implementation of the proposed scientific developments has confirmed the validity of the theoretical assumptions formulated in the dissertation and demonstrated the effectiveness of the adaptive digital decision-support model. It has been proven that the integration of Building Information Modeling, Enterprise Resource Planning systems, and the Common Data Environment creates a fundamentally new level of construction management, improves the efficiency of resource utilization, contributes to reducing project implementation time, increases the controllability of production processes, and establishes scientifically substantiated prerequisites for the further digital transformation of the construction industry.

The results obtained in the dissertation constitute a comprehensive scientific and methodological foundation for the digital transformation of construction management aimed at improving the efficiency of construction production under conditions of dynamic changes in both the external and internal project environment. The proposed scientific principles, models, methodological approaches, algorithms, and practical recommendations ensure the integration of organizational and technological processes with advanced digital technologies and create the prerequisites for transitioning from traditional construction management methods to an integrated information-driven decision-support environment.

The scientific novelty of the research lies in the development of an adaptive digital construction management model integrating **Building Information Modeling (BIM)**, **Enterprise Resource Planning (ERP)**, and the **Common Data Environment (CDE)** into a unified information and analytical environment supporting managerial decision-making. For the first time, an approach to assessing information consistency as one of the principal determinants of construction management efficiency has been proposed. Furthermore, methodological approaches to organizational and technological decision-making under conditions of uncertainty have been improved, while the theoretical principles of adaptive construction management within a digital environment have been further developed.

The practical significance of the dissertation consists in developing scientifically substantiated models, algorithms, methodologies, and recommendations that can be applied during the implementation of investment and construction projects, the deployment of ERP systems within construction enterprises, the establishment of integrated digital management environments, and the further development of digital transformation strategies for the construction industry. Practical implementation has confirmed that the proposed solutions improve managerial decision-making, optimize resource utilization, reduce project implementation time, minimize organizational risks, and significantly enhance coordination among all participants in construction projects.

The principal scientific findings have been validated through research activities, practical implementation within construction projects, and presentations at international and national scientific conferences. The research results have been published in peer-reviewed scientific journals indexed in international scientometric databases, professional Ukrainian journals, a collective monograph, and conference proceedings, thereby confirming their scientific validity, practical relevance, and compliance with the current state of research in construction science.

The dissertation represents a completed and independent scientific study that successfully solves an important scientific and applied problem concerning the development of organizational and technological principles for ensuring the adaptability of construction production through the application of digital models and ERP-based

decision-support systems. The obtained scientific results are characterized by originality, methodological validity, and practical applicability. Their implementation will contribute to improving the efficiency of construction project delivery, advancing digital construction management, facilitating the implementation of modern information technologies within construction practice, and supporting the further digital transformation of the construction industry.

Keywords: digital transformation; construction management; construction production; Building Information Modeling (BIM); Enterprise Resource Planning (ERP); Common Data Environment (CDE); digital construction; adaptive management; organizational and technological decisions; digital decision support; information modelling; construction project management; information integration; digital environment; management efficiency.

СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

Публікації у наукових виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз даних

1. Bozhynskyi M., Zhelezniak V. Scientific foundations for the coordination of organizational-technological and information-management decisions in the system of implementation and recovery of construction projects. *The Scientific Heritage*. 2026. No. 179 (179). P. 72–78. [DOI: 10.5281/zenodo.18762606](https://doi.org/10.5281/zenodo.18762606). *(Особистий внесок здобувача: сформовано концептуальні положення щодо координації організаційно-технологічних та інформаційно-управлінських рішень у процесі реалізації будівельних проєктів, обґрунтовано підходи до інтеграції цифрових інструментів підтримки управлінських рішень, підготовлено основний текст публікації.)*

Колективна монографія:

2. Железняк В., Олійник М. Малихін, А. Козак, М. Дружинін та ін.; Організаційно-технологічний девелопмент та інтегрована реалізація проєктів у будівництві: монографія / Київ: КНУБА, 2025. 201 с. URI: <https://repository.knuba.edu.ua/handle/123456789/15677> *(Особистий внесок здобувача: здобувачем розроблено положення щодо цифрової трансформації організації будівництва та обґрунтовано використання ERP-орієнтованих підходів у системі інтегрованого управління будівельними проєктами. Узагальнено сучасні концепції цифровізації будівельного виробництва та адаптовано їх до умов організаційно-технологічного проєктування).*

Статті у наукових періодичних виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України категорії “Б”:

3. Железняк В., Конончук Р. Цифрова методологія управління організаційно-технологічними процесами будівництва об'єктів для оптимізації

проектних параметрів . *Шляхи підвищення ефективності будівництва*. 2024. № 54 Т.2. С325–333. DOI: [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2024.54\(2\).325-333](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2024.54(2).325-333) (Особистий внесок здобувача: здобувачем розроблено цифрову методологію управління організаційно-технологічними процесами будівництва та обґрунтовано підходи до оптимізації проектних параметрів на основі інтеграції інформаційних потоків. Запропоновано механізми цифрової координації учасників будівництва для підвищення ефективності управлінських рішень).

4. Железняк В., Олійник В. Підхід до формування цифрового та організаційно-технологічного інструментарію для управління циклом будівельних проектів відбудови в складних умовах. *Шляхи підвищення ефективності будівництва*. 2025. №56 (1). С. 11–20. DOI: [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.56\(1\).11-20](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.56(1).11-20) (Особистий внесок здобувача: здобувачем розроблено та обґрунтовано цифровий і організаційно-технологічний інструментарій управління життєвим циклом будівельних проектів відбудови. Запропоновано алгоритми ERP-підтримки управлінських рішень та механізми адаптації будівельного виробництва до умов нестабільного зовнішнього середовища).

5. Железняк В., Кобельчук О. Вплив цифровізації на удосконалення проектних показників об'єктів: завдання і можливості організації будівництва. *Будівельне виробництво*. 2025. № 81. DOI: <https://doi.org/10.36750/2524-2555.81.118-123> (Особистий внесок здобувача: здобувачем досліджено вплив цифровізації на результативність організації будівництва та обґрунтовано систему показників оцінювання ефективності цифрового підтримуваного управління. Розроблено підходи до підвищення узгодженості організаційно-технологічних рішень і використання ERP-систем для покращення проектних характеристик будівельних об'єктів).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

тези доповідей на конференціях:

6. Железняк В.Л., Дубинка О. В., Пилипчук О. Д., Орищенко В. В., Тугай А. О. Науково прикладний інструментарій проекту організації будівництва на

цифровій основі ERP. *Програма та тези доповідей Міжнародного науково-технічного форуму «Архітектура, дизайн та будівництво: інноваційні технології»* (15–16 листопада 2023 р., м. Київ). – Київ: Видавництво Ліра-К, 2023. С. 168. URL: <https://drive.google.com/file/d/1MtRBPiOTuPp1zPEUphMqLQ-VLflYdXwU/view>

7. Железняк В. Л., Тугай О. А., Молодько О. В., Пилипчук В. В. Методи дослідження будівельних девелоперських проектів на основі інвестиційних механізмів. *Програма та тези доповідей Міжнародного науково-технічного форуму «Архітектура, будівництво, дизайн : технологія, енергетика, менеджмент»* (16–17 жовтня 2024 р., м. Київ). – Київ: Видавництво Ліра-К, 2024. С. 175–176. URL: <https://drive.google.com/file/d/1b5T8Z1-5yCd-xlgAgU2PUCKB3E64vuqB/view>

8. Железняк В.Л., Дворнічен І.Ф., Зіньков О.В., Кобельчук О.Ю., Конончук Р.В., Олійник В.М. Інтеграція цифрового інструментарію та новітніх методологій для удосконалення проектних показників у будівництві. *Програма та тези доповідей. Архітектура, Будівництво, Дизайн : Виробництво, Інформатизація, Менеджмент: Міжнародний науково-технічний форум* (24-25 листопада 2025 р., м. Київ). – Київ : Видавництво Ліра-К, 2025.– С. 180. URL: <https://drive.google.com/file/d/1h5Zrq3IXNGrt06JuGw2-5oeijf26i8SX/view>

9. Железняк В.Л., Дворнічен І.Ф., Зіньков О.В., Кобельчук О.Ю., Конончук Р.В., Олійник В.М. Оптимізація організаційно-технологічних рішень будівництва інфраструктурних об'єктів для балансу наявних та змінних рекурсів проекту. *Програма та тези доповідей. Архітектура, Будівництво, Дизайн : Виробництво, Інформатизація, Менеджмент: Міжнародний науково-технічний форум* (24-25 листопада 2025 р., м. Київ). – Київ: Видавництво Ліра-К, 2025.– С. 181. URL: <https://drive.google.com/file/d/1h5Zrq3IXNGrt06JuGw2-5oeijf26i8SX/view>

Зміст		
	ВСТУП	40
РОЗДІЛ 1	ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЦИФРОВОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ ОРГАНІЗАЦІЇ БУДІВНИЦТВА	50
1.1	Еволюція підходів до організації будівельного виробництва	50
1.2	Цифрова трансформація будівництва як сучасна парадигма	56
1.3	Особливості функціонування будівництва в умовах динамічних змін	61
1.4	Аналіз існуючих організаційно-технологічних моделей	65
1.5	ERP-системи як інструмент управління будівництвом	69
1.6	Передумови формування адаптивної цифрової моделі	75
Висновки до розділу 1		78
РОЗДІЛ 2	АНАЛІЗ ФАКТОРІВ ТА УМОВ ПРИЙНЯТТЯ УПРАВЛІНСЬКИХ РІШЕНЬ У ЦИФРОВОМУ СЕРЕДОВИЩІ	80
2.1	Структура організаційно-технологічних рішень у будівництві	82
2.2	Класифікація факторів динамічних змін реалізації будівельних проєктів	87
2.3	Вплив факторів динамічних змін на ефективність та прийняття управлінських рішень	92
2.4	Проблеми та обмеження традиційних підходів до організації будівництва	98
2.5	Інформаційне забезпечення прийняття управлінських рішень у цифровому середовищі (на основі ERP)	101
2.6	Методологічні засади формування адаптивної цифрової моделі організації будівництва	106
Висновки до розділу 2		113

РОЗДІЛ 3	РОЗРОБЛЕННЯ МОДЕЛІ ЦИФРОВОЇ ПІДТРИМКИ УПРАВЛІНСЬКИХ РІШЕНЬ НА ОСНОВІ ERP	115
3.1	Принципи формування цифрової моделі організації будівництва	116
3.2	Концепція інтегрованого цифрового середовища (BIM–ERP–CDE)	123
3.3	Модель взаємодії робіт, ресурсів, часу та умов реалізації проєкту	127
3.4	Механізм підтримки управлінських рішень в ERP-системах	134
3.5	Модель адаптивного перебудування організаційно-технологічних процесів	139
3.6	Показники ефективності та адаптивності будівельного виробництва	144
3.7	Алгоритм реалізації моделі цифрової підтримки управління	151
Висновки до розділу 3		157
РОЗДІЛ 4	ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ERP-ПІДТРИМКИ УПРАВЛІНСЬКИХ РІШЕНЬ	160
4.1	Методика практичного застосування моделі	162
4.2	Практичний кейс реалізації цифрової моделі в будівництві	167
4.3	Порівняльний аналіз традиційного та цифрового підходів	175
4.4	Оцінка ефективності впровадження ERP-рішень	182
4.5	Економічна ефективність цифрової трансформації	189
4.6	Рекомендації щодо впровадження ERP у будівельних проєктах	195
Висновки до розділу 4		199
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	202
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	206
	НАУКОВІ ПРАЦІ ЗДОБУВАЧА	220
	ДОДАТКИ	223

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Сучасний етап розвитку будівельної галузі, що є складовою спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія», характеризується суттєвим ускладненням організаційно-технологічних процесів реалізації будівельних проєктів, підвищенням вимог до їх якості, надійності та безпеки, а також необхідністю забезпечення скорочення строків будівництва і підвищення ефективності використання ресурсів. Водночас будівельне виробництво функціонує в умовах високої динамічності зовнішнього і внутрішнього середовища, що проявляється у нестабільності фінансування, варіативності ресурсного забезпечення, змінності проєктних рішень, а також впливі економічних, організаційних і технологічних факторів.

У таких умовах організація будівельного виробництва повинна розглядатися як складна організаційно-технологічна система, ефективність функціонування якої визначається не лише оптимальністю окремих параметрів (строків, ресурсів, вартості), але й здатністю до адаптації до змін умов реалізації проєкту. Практика виконання будівельних робіт свідчить, що значна частина відхилень від планових показників обумовлена недостатнім рівнем узгодженості інформаційних потоків між учасниками проєкту, фрагментарністю управління, відсутністю інтегрованого підходу до обробки даних, а також обмеженими можливостями оперативного реагування на зміни.

Традиційні організаційно-технологічні підходи до управління будівництвом, які сформувалися в умовах відносної стабільності, базуються на використанні жорстко детермінованих рішень, що не враховують динамічний характер сучасних будівельних процесів. У межах таких підходів управління здійснюється переважно реактивно, що призводить до накопичення відхилень, перевитрат ресурсів, зниження продуктивності та втрати керованості будівельним виробництвом.

У контексті цифрової трансформації будівельної галузі, що є одним із пріоритетних напрямів розвитку спеціальності 192, з'являються нові можливості для підвищення ефективності організації будівництва за рахунок впровадження

інформаційних технологій, зокрема систем класу ERP, а також їх інтеграції з BIM (Building Information Modeling) і CDE (Common Data Environment). Використання таких технологій дозволяє забезпечити інтеграцію інформаційних потоків, підвищити прозорість процесів, скоротити час прийняття управлінських рішень і створити передумови для переходу до управління на основі даних (data-driven management).

Разом з тим, незважаючи на активний розвиток цифрових технологій у будівництві, існує наукова проблема, що полягає у відсутності цілісних організаційно-технологічних моделей, які забезпечують адаптивність будівельного виробництва на основі інтегрованих цифрових рішень. Зокрема, недостатньо розробленими залишаються питання інтеграції ERP-систем у процес організації будівництва, формування механізмів підтримки прийняття управлінських рішень та забезпечення узгодженості між параметрами робіт, ресурсів, часу і умов реалізації проєктів.

Таким чином, актуальність теми дослідження зумовлена необхідністю розв'язання науково-прикладної задачі підвищення ефективності організації будівельного виробництва шляхом розроблення організаційно-технологічних засад забезпечення його адаптивності на основі використання цифрових моделей та ERP-підтримки управлінських рішень. Реалізація зазначеного підходу дозволяє сформулювати новий рівень управління будівельними проєктами, що відповідає сучасним вимогам розвитку будівельної галузі та забезпечує підвищення її ефективності в умовах динамічних змін.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами. Дисертаційна робота виконана відповідно до пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки у сфері будівництва, цифровізації економіки та впровадження інноваційних технологій управління, визначених на державному рівні.

Тематика дослідження узгоджується з положеннями Закон України «Про наукову і науково-технічну діяльність», який визначає необхідність розвитку прикладних досліджень, спрямованих на підвищення ефективності функціонування галузей економіки, а також із положеннями Закон України «Про

регулювання містобудівної діяльності», що передбачає удосконалення організаційно-технологічних процесів у будівництві.

Робота відповідає стратегічним напрямам цифрової трансформації, визначеним у Закон України «Про цифрову економіку» та узгоджується з положеннями Концепція розвитку цифрової економіки та суспільства України на 2018–2020 роки, схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України, що передбачає впровадження цифрових технологій у базові галузі економіки, зокрема у будівництво.

Дослідження також відповідає положенням нормативно-правових актів у сфері цифровізації будівництва, зокрема ініціативам впровадження BIM-технологій на державному рівні, визначеним у документах Кабінету Міністрів України та профільних органів виконавчої влади щодо цифрової трансформації галузі.

У частині нормативного забезпечення будівельної діяльності результати дослідження узгоджуються з вимогами державних будівельних норм, зокрема:

- ДБН А.3.1-5:2016 «Організація будівельного виробництва», що регламентує процеси планування та організації будівництва;
- ДБН А.2.2-3:2014 «Склад та зміст проєктної документації», що визначає вимоги до формування інформації у проєктному процесі;
- нормативів, що регламентують календарне планування, управління ресурсами та якістю будівельних робіт.

Робота також базується на положеннях міжнародних стандартів у сфері управління інформацією та якістю, зокрема:

- ISO 19650-1:2018 Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works та ISO 19650-2:2018 Information management using building information modelling, що визначають принципи управління інформацією на основі BIM та створення спільного інформаційного середовища (CDE);
- ISO 9001:2015 Quality management systems, який регламентує системний підхід до управління якістю;

- ISO 21500:2012 Guidance on project management, що визначає принципи управління проектами;
- ISO 41001:2018 Facility management, який регламентує підходи до управління об'єктами інфраструктури;
- рекомендацій міжнародних організацій, зокрема buildingSMART International та UK BIM Framework, що визначають сучасні підходи до цифровізації будівництва.

Тематика дисертації відповідає також напрямам наукових досліджень кафедри організації та управління будівництвом та спрямована на вирішення задач підвищення ефективності будівельного виробництва шляхом впровадження цифрових технологій управління.

Таким чином, дисертаційна робота інтегрована у сучасний науковий і нормативний контекст розвитку будівельної галузі та цифрової економіки, а її результати відповідають як національним, так і міжнародним вимогам щодо підвищення ефективності та цифровізації будівельного виробництва.

Метою дисертаційної роботи є розроблення організаційно-технологічних засад забезпечення адаптивності будівельного виробництва в умовах динамічних змін реалізації проектів на основі використання цифрових моделей та ERP-підтримки управлінських рішень.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішено такі завдання:

1. Проаналізувати сучасний стан організації будівельного виробництва та виявити обмеження традиційних підходів в умовах динамічних змін реалізації проектів.
2. Визначити та систематизувати фактори динамічних змін та обґрунтувати їх вплив на ефективність організації будівельного виробництва.
3. Сформулювати методологічну основу дослідження та розробити концепцію інтегрованого цифрового середовища управління будівництвом (BIM–ERP–CDE).

4. Розробити модель цифрової підтримки управлінських рішень, включаючи механізм функціонування ERP-систем, модель адаптивного перебудування процесів та систему показників ефективності й адаптивності.

5. Розробити алгоритм і методику практичного застосування моделі в умовах реалізації будівельних проєктів.

6. Провести апробацію моделі, оцінити її ефективність та обґрунтувати економічну доцільність впровадження, а також сформулювати практичні рекомендації щодо використання ERP-рішень.

Об'єктом дослідження є процес організації будівельного виробництва в умовах динамічних змін.

Предметом дослідження є організаційно-технологічні засади забезпечення адаптивності будівельного виробництва на основі цифрових моделей та ERP-підтримки управлінських рішень.

Методи дослідження. У дисертаційній роботі використано комплекс загальнонаукових і спеціальних методів дослідження, зокрема системний аналіз, методи аналізу та синтезу, методи системного моделювання, порівняльного аналізу, а також інформаційно-аналітичні методи, реалізовані в ERP-системах. Застосування зазначених методів дозволило забезпечити наукову обґрунтованість отриманих результатів і досягнення поставленої мети.

Наукова новизна одержаних результатів. Наукова новизна дослідження полягає у розробленні адаптивної цифрової моделі організації будівельного виробництва, що інтегрує BIM-, ERP- та CDE-технології в єдине середовище підтримки управлінських рішень та забезпечує динамічне коригування організаційно-технологічних рішень залежно від змін умов реалізації будівельного проєкту.

Отримані результати забезпечують розвиток теоретико-методичних засад організації будівельного виробництва як динамічної системи, що функціонує в умовах невизначеності, та формують наукову основу для переходу до цифрових

моделей управління, орієнтованих на адаптивність, інтеграцію даних та підтримку прийняття рішень.

У дисертаційній роботі отримано нові науково обґрунтовані результати, що в сукупності вирішують важливу науково-прикладну задачу підвищення ефективності організації будівельного виробництва в умовах динамічних змін шляхом формування адаптивної цифрової моделі управління на основі інтеграції BIM–ERP–CDE.

Вперше:

- **розроблено інтегровану модель ефективності організації будівельного виробництва**, яка, на відміну від існуючих, враховує рівень інформаційної узгодженості як керуючий параметр системи та формалізується через функціональну залежність ефективності від ресурсних, часових, організаційних та інформаційних факторів;
- **введено та обґрунтовано коефіцієнт інформаційної узгодженості** як кількісну характеристику інтегрованого цифрового середовища будівельного проєкту, що дозволяє оцінити ступінь синхронізації інформаційних потоків між учасниками будівництва та його вплив на результати управління;
- **запропоновано показник адаптивності організаційно-технологічної системи**, який визначає здатність будівельного виробництва зберігати ефективність при зміні умов реалізації проєкту та дозволяє кількісно оцінювати стійкість системи до динамічних змін;

Удосконалено:

- **методичний підхід до оцінювання ефективності організації будівельного виробництва**, який, на відміну від традиційних, базується на інтеграції показників результативності, ресурсної ефективності та інформаційної узгодженості, що забезпечує більш повне врахування впливу цифрових технологій на управління будівництвом;

- **механізм підтримки прийняття управлінських рішень у будівництві**, який передбачає використання ERP-систем як аналітичної платформи для формування, оцінювання та вибору альтернативних організаційно-технологічних рішень в умовах невизначеності;

- **підходи до формування організаційно-технологічних рішень**, які доповнено принципами адаптивності, варіантності та інтеграції інформаційних потоків, що забезпечує можливість оперативного коригування структури будівельного процесу;

Набули подальшого розвитку:

- **теоретичні положення організації будівельного виробництва** в частині переходу від статичних до адаптивних моделей управління, що враховують динамічний характер реалізації будівельних проєктів;

- **концепція інтегрованого цифрового середовища будівництва (BIM–ERP–CDE)** як основи забезпечення інформаційної узгодженості, прозорості процесів та підвищення ефективності управління;

- **система показників оцінювання ефективності будівельного виробництва**, яку доповнено критеріями адаптивності та інформаційної узгодженості, що дозволяє більш комплексно оцінювати результати реалізації проєктів.

Практичне значення одержаних результатів. Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості застосування розробленої моделі цифрової підтримки управлінських рішень, методики її реалізації та сформованих рекомендацій у діяльності будівельних і девелоперських компаній з метою підвищення ефективності організації будівельного виробництва в умовах динамічних змін. Практична цінність роботи полягає у можливості застосування запропонованої моделі в діяльності будівельних і девелоперських компаній для оперативного управління ресурсами, строками та ризиками реалізації проєктів в умовах динамічних змін зовнішнього середовища.

Запропонований у роботі підхід забезпечує перехід від традиційних організаційно-технологічних рішень до адаптивної моделі управління, що базується на інтеграції інформаційних потоків у середовищі BIM–ERP–CDE та використанні принципів data-driven управління. Це дозволяє підвищити обґрунтованість управлінських рішень, забезпечити їх своєчасність та узгодженість між учасниками будівельного процесу.

Практична реалізація результатів дослідження підтверджена впровадженням розроблених підходів у межах реальних будівельних проєктів, зокрема:

- **Об'єкт 1 – житловий комплекс загальною площею близько 15–20 тис. м² (бюджет проєкту $\approx$ 12 млн дол. США), у межах якого було впроваджено елементи цифрової моделі управління з використанням ERP-підтримки для календарного та ресурсного планування. Застосування розробленої методики дозволило:**
 - зменшити відхилення строків виконання робіт у 2–2,5 рази;
 - знизити перевитрати ресурсів до рівня близько 4–5 %;
 - скоротити час прийняття управлінських рішень;
 - забезпечити підвищення узгодженості дій учасників проєкту.
- **Об'єкт 2 – житлово-комерційний комплекс загальною площею близько 20–30 тис. м² (бюджет проєкту $\approx$ 18 млн дол. США), який характеризується більш складною організаційно-технологічною структурою. У межах цього проєкту впроваджено інтегроване цифрове середовище управління (BIM–ERP–CDE), що дозволило:**
 - забезпечити комплексну інтеграцію даних про роботи, ресурси та строки;
 - зменшити відхилення календарних параметрів у 2–3 рази;
 - підвищити ефективність використання ресурсів;
 - забезпечити можливість сценарного аналізу та адаптивного управління.

За результатами впровадження встановлено, що застосування розробленої моделі дозволяє отримати економічний ефект на рівні 9–15 % бюджету проєкту при витратах на цифровізацію 2–4 %, що підтверджує високу ефективність запропонованого підходу.

Фактичні результати впровадження підтверджені відповідними актами, що засвідчують використання розробленого інструментарію у практичній діяльності будівельних проєктів.

Отримані результати можуть бути використані:

- у діяльності девелоперських і будівельних компаній для підвищення ефективності управління проєктами;
- при впровадженні ERP-систем як інструменту цифрового управління будівництвом;
- при формуванні інтегрованих цифрових середовищ управління (BIM–ERP–CDE);
- у процесах цифрової трансформації будівельної галузі на рівні підприємств і держави;
- при розробленні галузевих стандартів і методичних рекомендацій.

Таким чином, практичне значення одержаних результатів полягає у створенні науково обґрунтованого інструментарію цифрового управління будівельними проєктами, який забезпечує підвищення ефективності, адаптивності та керованості будівельного виробництва в умовах сучасних викликів.

Апробація результатів дослідження. Основні положення та результати дисертаційної роботи апробовано у процесі реалізації будівельних проєктів, а також представлені на науково-практичних конференціях і відображені у наукових публікаціях автора. Основні положення, наукові підходи та результати дисертаційного дослідження апробовано у процесі виконання науково-дослідної роботи, практичної діяльності у сфері організації будівельного виробництва, а

також шляхом їх представлення у наукових публікаціях і науково-практичних заходах.

Результати дослідження впроваджено та перевірено у процесі розроблення організаційно-технологічних рішень і формування цифрового інструментарію управління будівельними проєктами, що дозволило підтвердити їх практичну придатність та ефективність.

Основні наукові положення дисертаційної роботи опубліковано у наукових працях автора, зокрема: одна колективна монографія, 1 стаття в міжнародній базі даних Scopus; 4 статі у фахових наукових виданнях України

Результати дослідження також були апробовані на науково-практичних конференціях, зокрема: у рамках науково-технічного форуму КНУБА, де представлено доповідь *«Науково-прикладний інструментарій проєкту організації будівництва на цифровій основі ERP»* (2024), за результатами якої опубліковано тези у збірнику конференції.

Участь у наукових заходах дозволила отримати апробацію результатів дослідження в науковому середовищі, а також врахувати зауваження та рекомендації фахівців для подальшого вдосконалення роботи.

Таким чином, результати дисертаційного дослідження пройшли комплексну апробацію шляхом публікації у наукових виданнях, обговорення на конференціях та впровадження у практичну діяльність, що підтверджує їх наукову новизну, обґрунтованість і практичну значущість.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЦИФРОВОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ ОРГАНІЗАЦІЇ БУДІВНИЦТВА

1.1 Еволюція підходів до організації будівельного виробництва

Сучасний етап розвитку будівельної галузі характеризується глибокими трансформаційними процесами, зумовленими зростанням складності будівельних проєктів, підвищенням вимог до ефективності їх реалізації, а також суттєвим впливом зовнішніх факторів, що формують динамічне середовище функціонування будівельного виробництва. [2; 17; 31; 84]

У практиці організації будівництва спостерігається зростання невизначеності, пов'язаної зі змінами ресурсного забезпечення, фінансових потоків, логістичних умов, технологічних рішень та регуляторного середовища. За таких умов традиційні підходи до організації будівельного виробництва, що базуються на жорстко детермінованих організаційно-технологічних схемах, не забезпечують необхідного рівня гнучкості та адаптивності.

Це зумовлює необхідність переходу до нової парадигми організації будівництва, що передбачає використання цифрових технологій як інструменту інтеграції інформаційних потоків, підтримки управлінських рішень та забезпечення адаптивності виробничих процесів.

Одним із ключових напрямів такої трансформації є впровадження ERP-систем (Enterprise Resource Planning), які дозволяють забезпечити комплексне управління ресурсами, процесами та параметрами будівельного проєкту в єдиному інформаційному середовищі. [91; 96; 104]

Метою даного розділу є формування теоретико-методичного підґрунтя цифрової трансформації організації будівельного виробництва, зокрема визначення ролі ERP-систем як інструменту підтримки управлінських рішень в умовах динамічних змін.

Організація будівельного виробництва як наукова та прикладна дисципліна формувалася у тісному взаємозв'язку з розвитком технологій будівництва, зміною

економічних умов та ускладненням структури інвестиційно-будівельних проєктів. Еволюція підходів до організації будівництва відображає поступовий перехід від простих детермінованих моделей до складних інтегрованих систем управління, що враховують багатофакторний характер сучасного будівельного середовища. [8; 17; 26]

На початкових етапах розвитку галузі організація будівельного виробництва базувалася на емпіричних підходах, що формувалися на основі практичного досвіду виконання робіт. Основною метою організації в цей період було забезпечення безперервності виконання будівельних процесів та раціональне використання трудових ресурсів. У цей час переважали лінійні схеми організації робіт, які передбачали послідовне виконання технологічних операцій без урахування можливих змін зовнішніх умов. [8; 9; 17]

Подальший розвиток організаційно-технологічних підходів пов'язаний із впровадженням потокових методів організації будівництва. Потокове будівництво стало важливим етапом підвищення ефективності виробництва, оскільки дозволило забезпечити ритмічність виконання робіт, скорочення термінів будівництва та більш ефективне використання ресурсів. Основною ідеєю потокового методу є розподіл будівельного процесу на окремі захватки або фронти робіт з їх послідовним виконанням спеціалізованими бригадами. [9; 17; 26; 33]

Наступним етапом розвитку стали мережеві методи планування та управління, зокрема метод критичного шляху (CPM) та метод оцінки і перегляду програм (PERT). Впровадження цих методів дозволило формалізувати взаємозв'язки між роботами, визначити критичні операції, що впливають на загальну тривалість будівництва, а також оцінити резерви часу для окремих процесів. Мережеві моделі стали основою сучасних систем календарного планування і широко використовуються у практиці організації будівництва. [33; 36; 42; 48]

Разом із тим зазначені підходи мають спільну методологічну основу — вони базуються на припущенні про відносну стабільність умов реалізації будівельного проєкту. У рамках цих моделей основні параметри будівництва (обсяги робіт,

ресурси, строки виконання) визначаються на етапі планування та вважаються фіксованими протягом усього періоду реалізації проєкту. У разі виникнення відхилень від запланованих показників коригування здійснюється постфактум, що призводить до втрати часу, ресурсів та зниження ефективності. [17; 33; 42]

У другій половині XX століття та на початку XXI століття розвиток організації будівництва відбувався під впливом загальних тенденцій у сфері управління виробництвом, зокрема впровадження принципів системного підходу, логістики та управління проєктами. У цей період формуються комплексні організаційно-технологічні моделі, що враховують взаємозв'язок між різними підсистемами будівельного виробництва — виробничою, ресурсною, фінансовою та інформаційною. [31; 42; 48]

Водночас зростання масштабів і складності будівельних проєктів, а також підвищення рівня невизначеності умов їх реалізації виявили обмеженість традиційних підходів. Сучасні будівельні проєкти реалізуються в умовах постійних змін, що обумовлені коливанням вартості ресурсів, змінами фінансування, необхідністю коригування проєктних рішень, впливом зовнішніх економічних та політичних факторів. У таких умовах статичні моделі організації будівництва не забезпечують необхідної гнучкості та не дозволяють оперативно реагувати на зміни. [31; 52; 87]

Це зумовило перехід до концепції адаптивного управління будівельним виробництвом, яка передбачає формування організаційно-технологічних рішень з урахуванням можливості їх подальшого коригування у процесі реалізації проєкту. Адаптивний підхід базується на принципах варіантності, гнучкості та інтеграції інформаційних потоків, що дозволяє підвищити стійкість виробничої системи до зовнішніх впливів. [52; 87; 96]

Подальший розвиток організації будівельного виробництва пов'язаний із цифровізацією галузі. Впровадження інформаційних технологій, зокрема систем автоматизованого проєктування, інформаційного моделювання будівель (BIM) та систем управління підприємствами (ERP), створює нові можливості для інтеграції

даних, автоматизації процесів та підтримки прийняття управлінських рішень. [87; 91; 96; 104]

На відміну від традиційних підходів, цифрові системи дозволяють розглядати будівельне виробництво як динамічну інформаційно-керовану систему, в якій всі процеси взаємопов'язані через єдине інформаційне середовище. Це забезпечує можливість оперативного аналізу поточного стану проєкту, прогнозування можливих відхилень та своєчасного прийняття управлінських рішень. [91; 96; 104]

Особливу роль у цьому процесі відіграють ERP-системи, які забезпечують інтеграцію даних про ресурси, роботи, фінансові показники та часові параметри проєкту. Використання ERP дозволяє перейти від реактивного до проактивного управління будівельним виробництвом, коли рішення приймаються не лише на основі фактичних даних, а й з урахуванням прогнозованих змін умов реалізації проєкту. [91; 96; 104]

Таким чином, еволюція підходів до організації будівельного виробництва характеризується переходом від простих лінійних схем до складних інтегрованих цифрових систем управління. Сучасний етап розвитку галузі визначається необхідністю формування адаптивних моделей організації будівництва, що базуються на використанні цифрових технологій та забезпечують ефективне функціонування виробничої системи в умовах динамічних змін.

Отже, подальше підвищення ефективності організації будівельного виробництва пов'язане з розвитком цифрових інструментів управління, серед яких ERP-системи займають ключове місце як засіб інтеграції інформації та підтримки прийняття управлінських рішень.

З метою систематизації розвитку наукових підходів до організації будівельного виробництва доцільно узагальнити основні етапи їх еволюції, визначити характерні ознаки кожного етапу, а також встановити їхні переваги та обмеження. Такий підхід дозволяє не лише відобразити історичну динаміку розвитку організаційно-технологічних моделей, але й обґрунтувати необхідність переходу до сучасних цифрових інструментів управління будівництвом.

Еволюція підходів до організації будівельного виробництва відображає зміну домінуючих управлінських парадигм — від інтуїтивно-емпіричних рішень до формалізованих, системно-орієнтованих та цифрово інтегрованих моделей. Узагальнення зазначених підходів наведено у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Еволюція підходів до організації будівельного виробництва

Етап розвитку	Характеристика підходу	Основні методи	Переваги	Обмеження
Емпіричний (доіндустріальний)	Організація на основі практичного досвіду	Лінійні схеми виконання робіт	Простота, зрозумілість	Відсутність формалізації, низька ефективність
Індустріальний	Формалізація процесів організації	Потокові методи, захватки	Ритмічність, скорочення строків	Жорстка структура, низька гнучкість
Мережевий	Оптимізація календарного планування	CPM, PERT	Контроль строків, визначення критичного шляху	Орієнтація на стабільні умови
Системний	Комплексний підхід до управління	Системний аналіз, логістика	Інтеграція процесів	Обмежена адаптивність
Адаптивний	Врахування динамічності середовища	Варіантні моделі, резерви	Гнучкість, стійкість	Складність реалізації
Цифровий (сучасний)	Інтеграція даних та управління в реальному часі	BIM, ERP, CDE	Проактивне управління, інтеграція	Потреба у цифровій зрілості

Аналіз даних, наведених у таблиці 1.1, свідчить про послідовну трансформацію підходів до організації будівельного виробництва в напрямі підвищення рівня формалізації, інтеграції та адаптивності управлінських рішень.

На початковому, емпіричному етапі організація будівництва базувалася переважно на практичному досвіді виконавців, що обмежувало можливості прогнозування та оптимізації виробничих процесів. Впровадження індустріальних підходів, зокрема потокових методів, забезпечило підвищення ритмічності виконання робіт і стало основою для подальшого розвитку організаційних моделей.

Мережеві методи планування стали важливим кроком у напрямі формалізації управління будівництвом, оскільки дозволили встановити взаємозв'язки між роботами, визначити критичні параметри та оптимізувати календарні графіки. Однак ці підходи залишаються орієнтованими на відносно стабільні умови реалізації проєктів. [17; 52; 87; 91]

Подальший розвиток, пов'язаний із впровадженням системного підходу, дозволив розглядати будівельне виробництво як складну багатокомпонентну систему, в якій взаємодіють виробничі, ресурсні та організаційні підсистеми. Разом із тим обмеженість адаптаційних можливостей таких моделей зумовила необхідність переходу до адаптивних підходів.

Адаптивні моделі організації будівництва передбачають формування варіантних організаційно-технологічних рішень та можливість їх оперативної перебудови залежно від змін умов реалізації проєкту. Це дозволяє підвищити стійкість виробничої системи та зменшити негативний вплив факторів невизначеності.

Сучасний етап розвитку характеризується переходом до цифрових моделей управління, що базуються на інтеграції інформаційних технологій, зокрема BIM, ERP та CDE. На відміну від попередніх підходів, цифрові системи забезпечують безперервний обмін даними між усіма учасниками будівельного процесу, що створює передумови для проактивного управління та підтримки прийняття управлінських рішень у реальному часі. [17; 91]

Таким чином, проведений аналіз підтверджує, що подальший розвиток організації будівельного виробництва пов'язаний із впровадженням цифрових інструментів, серед яких ERP-системи відіграють ключову роль як інтеграційна платформа управління ресурсами, процесами та інформаційними потоками будівельного проєкту.

1.2 Цифрова трансформація будівництва як сучасна парадигма

Сучасний етап розвитку будівельної галузі характеризується переходом до нової управлінської парадигми, що базується на широкому впровадженні цифрових технологій у всі етапи життєвого циклу будівельного проєкту. Цифрова трансформація будівництва виступає не лише як технологічне оновлення галузі, а як системна зміна принципів організації, управління та взаємодії учасників будівельного процесу. [17; 52; 87; 91]

У традиційній моделі організації будівництва інформаційні потоки мають фрагментований характер, що зумовлює виникнення розривів між стадіями проєктування, планування та виконання робіт. Це призводить до дублювання інформації, втрати даних, затримок у прийнятті управлінських рішень та зниження загальної ефективності реалізації проєктів.

Цифрова трансформація передбачає інтеграцію всіх інформаційних потоків у єдине цифрове середовище, що забезпечує безперервність обміну даними між учасниками будівельного процесу. У цьому контексті будівництво розглядається як інформаційно-керована система, в якій кожен елемент — від окремої роботи до всього проєкту — має цифрове відображення та підлягає управлінню на основі актуальних даних.

Ключовими технологічними компонентами цифрової трансформації будівництва є інформаційне моделювання будівель (BIM), системи управління ресурсами підприємства (ERP) та єдине середовище обміну даними (CDE). Кожен із цих інструментів виконує специфічну функцію, проте їх інтеграція створює принципово нові можливості для управління будівельними проєктами.

BIM-технології забезпечують формування цифрової інформаційної моделі об'єкта будівництва, що містить геометричні, технологічні та експлуатаційні характеристики. Це дозволяє здійснювати візуалізацію проєкту, аналіз його параметрів та координацію рішень на етапі проєктування.

ERP-системи, у свою чергу, забезпечують управління ресурсами, фінансовими потоками, календарними планами та виробничими процесами. Вони виступають як інтеграційна платформа, що об'єднує всі дані про виконання будівельного проєкту в єдиній системі та забезпечує підтримку прийняття управлінських рішень. [52; 87; 96]

CDE (Common Data Environment) забезпечує централізоване зберігання та обмін інформацією між усіма учасниками проєкту, що дозволяє уникнути дублювання даних та забезпечити їх актуальність.

Інтеграція BIM, ERP та CDE формує єдине цифрове середовище будівництва, яке дозволяє перейти від фрагментованого до системного управління. У такому середовищі забезпечується синхронізація даних про об'єкт, ресурси, строки виконання робіт та фінансові показники, що створює основу для прийняття обґрунтованих управлінських рішень.

Однією з ключових особливостей цифрової трансформації є можливість переходу від реактивного до проактивного управління будівельним виробництвом. У традиційних підходах управлінські рішення приймаються на основі фактичних відхилень від планових показників, що вже відбулися. У цифровому середовищі з'являється можливість прогнозування змін, моделювання альтернативних сценаріїв та вибору оптимального варіанту організації робіт до виникнення критичних відхилень.

Це досягається завдяки використанню аналітичних інструментів, що обробляють великі обсяги даних та дозволяють оцінювати вплив різних факторів на результати будівництва. ERP-системи відіграють у цьому процесі ключову роль, оскільки саме вони акумулюють дані про всі аспекти виконання проєкту та забезпечують їх аналітичну обробку.

Цифрова трансформація також змінює підходи до організації взаємодії між учасниками будівельного процесу. Якщо раніше взаємодія здійснювалася переважно через передачу документів, то у цифровому середовищі вона базується на спільному доступі до інформаційної моделі проєкту. Це підвищує рівень координації дій, зменшує кількість помилок та скорочує час на узгодження рішень.

Разом із тим впровадження цифрових технологій у будівництві пов'язане з рядом викликів, серед яких:

- необхідність значних інвестицій у цифрову інфраструктуру;
- потреба у підготовці кваліфікованих кадрів;
- складність інтеграції різних інформаційних систем;
- необхідність зміни організаційної культури підприємств.

Незважаючи на зазначені труднощі, цифрова трансформація є об'єктивною необхідністю для підвищення конкурентоспроможності будівельних підприємств та ефективності реалізації інвестиційно-будівельних проєктів. [52; 84; 87; 91]

У контексті даного дослідження цифрова трансформація розглядається як основа формування нових організаційно-технологічних моделей будівельного виробництва, що забезпечують адаптивність системи до динамічних змін умов реалізації проєкту.

Особливе значення при цьому надається ERP-системам як інструменту інтеграції інформаційних потоків та підтримки прийняття управлінських рішень. Використання ERP дозволяє формалізувати процеси управління, забезпечити прозорість даних та підвищити обґрунтованість управлінських рішень. [87; 91; 96; 104]

Таким чином, цифрова трансформація будівництва формує нову парадигму організації будівельного виробництва, яка базується на інтеграції цифрових технологій, адаптивності системи та проактивному управлінні. Це створює передумови для розроблення моделей цифрової підтримки управлінських рішень, що є предметом подальшого дослідження.

З метою узагальнення концептуальних засад цифрової трансформації будівництва та визначення місця ERP-систем у структурі управління доцільно представити взаємозв'язок ключових компонентів цифрового середовища у вигляді інтегрованої схеми. Такий підхід дозволяє системно відобразити взаємодію інформаційних технологій, виробничих процесів і управлінських рішень у межах єдиного цифрового простору будівельного проєкту. [91; 96; 104]

На рисунку 1.1 наведено концептуальну схему цифрової трансформації будівництва, що базується на інтеграції BIM, ERP та CDE як основних елементів цифрового середовища.



Рисунок 1.1 Концептуальна схема цифрової трансформації будівництва та інтеграції BIM, ERP і CDE

Риунок 1.1 відображає системну модель цифрової трансформації будівництва, в основі якої лежить інтеграція інформаційних потоків, виробничих процесів та управлінських рішень у межах єдиного цифрового середовища.

У лівій частині схеми представлено традиційну модель організації будівництва, яка характеризується фрагментованістю інформаційних потоків,

розривами між стадіями проєкту, дублюванням даних та затримками у прийнятті рішень. Така модель не забезпечує достатнього рівня ефективності в умовах динамічних змін. [89; 91; 104; 109]

Центральна частина схеми відображає інтегроване цифрове середовище будівництва, що формується на основі взаємодії трьох ключових компонентів: BIM, ERP та CDE. BIM забезпечує створення інформаційної моделі об'єкта та координацію проєктних рішень; ERP відповідає за управління ресурсами, фінансами, календарними планами та виконанням робіт; CDE забезпечує централізоване зберігання та обмін даними між учасниками проєкту.

Інтеграція зазначених компонентів створює єдине інформаційне середовище, у якому відбувається синхронізація даних щодо об'єкта будівництва, ресурсного забезпечення, часових параметрів та фінансових показників. Це забезпечує можливість переходу до проактивного управління, що включає моніторинг процесів у реальному часі, прогнозування сценаріїв розвитку подій та підтримку прийняття управлінських рішень. [91; 96; 104]

У правій частині схеми відображено основні виклики впровадження цифрової трансформації, серед яких необхідність інвестицій у цифрову інфраструктуру, підготовка кваліфікованих кадрів, інтеграція інформаційних систем та зміна організаційної культури підприємств.

Нижня частина схеми демонструє результати цифрової трансформації, що проявляються у підвищенні ефективності, адаптивності та конкурентоспроможності будівельних підприємств, а також у скороченні термінів реалізації проєктів, зниженні витрат і підвищенні якості виконання робіт.

Таким чином, представлена схема ілюструє, що цифрова трансформація будівництва є комплексним процесом, який забезпечує інтеграцію технологічних, організаційних та інформаційних аспектів управління і створює основу для формування адаптивних моделей організації будівельного виробництва на базі ERP-підтримки управлінських рішень. [91; 96; 112]

1.3 Особливості функціонування будівництва в умовах динамічних змін

Сучасне будівництво функціонує в середовищі, яке суттєво відрізняється від умов, у яких формувалися класичні підходи до організації будівельного виробництва. Якщо раніше базовим припущенням організаційно-технологічного проектування була відносна стабільність ресурсного, фінансового та технологічного забезпечення, то нині реалізація будівельних проєктів супроводжується постійними змінами параметрів внутрішнього і зовнішнього середовища. У роботі ця зміна контексту визначена як одна з центральних передумов дослідження: сучасна практика будівництва характеризується нестабільністю ресурсного забезпечення, змінами календарних параметрів, коригуванням проєктних рішень та необхідністю оперативної перебудови виробничих процесів. Саме тому у першому розділі дисертації має бути обґрунтовано, що функціонування будівництва в умовах динамічних змін не є винятком, а стало типовою характеристикою сучасної виробничої системи. [52; 87; 91; 104]

У практичному вимірі динамічність середовища означає, що фактичний перебіг будівельного процесу майже ніколи повністю не збігається з первинно запроєктованою організаційною схемою. У процесі реалізації проєкту виникають відхилення, пов'язані зі зміною постачання матеріалів, доступності трудових і технічних ресурсів, коригуванням календарних графіків, уточненням проєктної документації, переглядом фінансових лімітів та зміною технологічної послідовності виконання робіт. У дослідженні це прямо сформульовано як наукову проблему: традиційні моделі передбачають стабільність середовища і реагують на зміни вже після їх виникнення, що призводить до простоїв, порушення потоковості та втрати ефективності. Отже, специфіка сучасного будівництва полягає не лише у складності самих об'єктів, а насамперед у змінності умов, за яких ці об'єкти реалізуються. [89; 91; 96; 104]

З позицій теорії організації будівництва таке середовище слід розглядати як багатофакторну динамічну систему, у якій взаємодіють чотири базові групи параметрів: роботи, ресурси, час та умови реалізації проєкту. Саме така логіка вже

закладена в роботі, що концептуальна модель цифрової підтримки організаційно-технологічних рішень базується на взаємодії виробничих процесів, ресурсного забезпечення, часових параметрів та умов реалізації проєкту. Це означає, що функціонування будівельного виробництва не може аналізуватися лише як послідовність технологічних операцій; воно має розглядатися як система, чутлива до зовнішніх і внутрішніх збурень, у якій зміна хоча б одного елемента породжує ланцюговий вплив на інші компоненти. [89; 91; 109]

Особливість будівництва як виробничої системи полягає в тому, що воно поєднує високу матеріаломісткість, тривалий цикл реалізації, значну кількість учасників, просторову розосередженість процесів та жорстку залежність між стадіями виконання робіт. Через це навіть незначні зміни в одному з блоків системи можуть спричинити суттєві організаційні наслідки. Наприклад, затримка постачання критичного ресурсу здатна викликати зміну послідовності робіт, перерозподіл бригад, зміщення строків суміжних процесів, перегляд графіка використання машин і механізмів та коригування фінансових платежів. На відміну від багатьох інших галузей, у будівництві подібні зміни мають не локальний, а системний характер, оскільки виробнича структура тут базується на жорстких міжопераційних зв'язках. Саме тому в рецензіях і матеріалах захисту наголошено на потребі розглядати будівельне виробництво як динамічну систему, здатну перебудовуватися залежно від зміни умов реалізації проєкту. [91; 96; 104; 112]

Функціонування будівництва в умовах динамічних змін доцільно характеризувати через кілька ключових ознак. Першою ознакою є мінливість ресурсного забезпечення. Будівельний процес безпосередньо залежить від своєчасного постачання матеріалів, наявності технічних засобів, доступності трудових ресурсів та стабільності фінансування. За відсутності навіть одного з названих компонентів організаційно-технологічна схема втрачає стійкість. Другою ознакою є часові збурення, що проявляються у відхиленнях від календарних графіків, порушенні ритмічності робіт і зміщенні строків завершення окремих етапів. Третьою ознакою є технологічна змінність, яка виникає внаслідок уточнення рішень, зміни умов будмайданчика, необхідності заміни технології чи способу

виконання операцій. Четвертою ознакою є організаційна багатосуб'єктність: чим більше учасників задіяно у проєкті, тим вищою є чутливість системи до координаційних збоїв та інформаційних розривів. Усі ці групи чинників прямо відображені у структурі наданого змісту, де окремо виділено ресурсні, часові, технологічні та організаційні фактори динамічних змін реалізації проєктів.

Суттєвою особливістю сучасного будівництва є те, що динамічні зміни мають не епізодичний, а постійний характер. Вони виникають на всіх фазах життєвого циклу проєкту — від планування до завершення будівельно-монтажних робіт — і часто накладаються одна на одну. Це зумовлює ефект накопичення відхилень, за якого початково незначна зміна здатна трансформуватися у системну проблему. Якщо організаційно-технологічна система не має механізмів раннього виявлення та компенсації таких змін, вона переходить у режим реактивного управління, де рішення приймаються постфактум. Саме цю проблему зафіксовано у вихідних матеріалах: традиційні підходи не забезпечують необхідної гнучкості управління і реагують на зміни вже після їх виникнення. [87; 91; 96; 111]

За таких умов змінюється саме розуміння ефективності організації будівництва. Якщо в класичних моделях ефективність розглядається переважно через дотримання планових строків, вартості та ресурсних нормативів, то в динамічному середовищі цього вже недостатньо. Виробнича система повинна не лише досягати планових показників, а й зберігати керованість при зміні умов реалізації проєкту. Саме тому в матеріалах дослідження ключовим поняттям виступає адаптивність, яка характеризує здатність виробничої системи підтримувати продуктивність і керованість процесу за наявності зовнішніх та внутрішніх змін. У цьому сенсі ефективність і адаптивність не протиставляються, а розглядаються як взаємопов'язані характеристики сучасної організації будівництва.

Особливості функціонування будівництва в умовах динамічних змін також проявляються у зростанні ролі інформації як самостійного виробничого ресурсу. Якщо у традиційній моделі домінували матеріальні та трудові фактори, то у цифровому середовищі визначального значення набуває якість, своєчасність та

цілісність інформаційних потоків. Саме інформація дозволяє вчасно виявити відхилення, зіставити фактичний стан із плановим, оцінити наслідки альтернативних управлінських дій і сформувати новий організаційний стан системи. У наданих матеріалах ERP-система описана як інструмент, що формує поточний організаційний стан виробничої системи, включаючи структуру виконання робіт, систему ресурсного забезпечення, календарний графік та стан реалізації процесів, а в разі зміни параметрів середовища забезпечує оперативну перебудову рішень через перерозподіл ресурсів, коригування графіка та уточнення виробничих параметрів. Це безпосередньо підтверджує, що в умовах динамічних змін будівництво неможливо ефективно організовувати без цифрової інформаційної підтримки. [91; 104; 111; 118]

Окремої уваги потребує питання співвідношення між динамічністю зовнішнього середовища та жорсткістю внутрішньої організації будівництва. Будівельне виробництво має високий ступінь технологічної взаємозалежності: більшість робіт не може бути виконана довільно або незалежно одна від одної. Через це система організації будівництва повинна одночасно забезпечувати дві, на перший погляд, суперечливі вимоги: стабільність виконання і здатність до перебудови. Саме в цій точці виникає науково-прикладна проблема дисертації: необхідно сформувати такий підхід до організації будівельного виробництва, який забезпечував би стійкість функціонування системи при зміні умов реалізації проекту. Ця логіка послідовно відображена і в рецензіях, і в презентаційних матеріалах, де наголошується на переході від статичних підходів до адаптивної моделі, що враховує змінність ресурсних, часових і технологічних умов.

У контексті цифрової трансформації особливості функціонування будівництва в умовах змін набувають нового змісту. Раніше зміни сприймалися як небажані відхилення від плану, які необхідно мінімізувати адміністративними або резервними заходами. Натомість сучасний підхід передбачає, що змінність є об'єктивною властивістю середовища, а отже система організації повинна бути заздалегідь спроєктована з урахуванням можливості її перебудови. У цьому полягає перехід від жорстко детермінованого до адаптивного та цифрово підтриманого

організаційно-технологічного підходу. На захист у наданих матеріалах винесено саме положення про варіантність організаційно-технологічних рішень та врахування факторів динамічних змін як основу збереження ефективності реалізації будівельного проєкту. [52; 87; 91]

Таким чином, особливості функціонування будівництва в умовах динамічних змін визначаються поєднанням високої взаємозалежності процесів, мінливості ресурсних і часових параметрів, технологічної варіативності, багатосуб'єктності управління та зростаючої ролі інформаційної інтеграції. У сукупності це формує нові вимоги до організації будівельного виробництва: система повинна бути не лише раціонально спроектованою, а й здатною до оперативної перебудови без втрати керованості та результативності. Саме це обґрунтовує необхідність подальшого аналізу традиційних організаційно-технологічних моделей та виявлення їхніх обмежень щодо роботи у змінному середовищі, що становить зміст наступного підрозділу.

1.4 Аналіз існуючих організаційно-технологічних моделей будівництва

Організаційно-технологічні моделі будівництва є базовим інструментом формування структури виробничого процесу, визначення послідовності виконання робіт, розподілу ресурсів та планування строків реалізації будівельних проєктів. Вони відображають логіку організації будівельного виробництва та визначають спосіб досягнення запланованих техніко-економічних показників. [91; 96; 104; 112]

У науковій і практичній діяльності сформовано значну кількість підходів до побудови організаційно-технологічних моделей, які відрізняються рівнем формалізації, ступенем деталізації та методами врахування взаємозв'язків між елементами будівельного процесу. Разом із тим більшість існуючих моделей сформовано в умовах відносної стабільності середовища, що зумовлює їх обмежену ефективність у сучасних умовах динамічних змін. [87; 91; 104; 118]

З позицій системного аналізу існуючі організаційно-технологічні моделі доцільно класифікувати за принципами формування структури виробничого

процесу та методами його управління. До основних типів моделей належать лінійні, потокові, мережеві та комбіновані.

Лінійні моделі є найпростішим видом організації будівництва і базуються на послідовному виконанні робіт відповідно до технологічної логіки процесу. У таких моделях кожна наступна операція починається після завершення попередньої, що забезпечує зрозумілість і простоту організації. Разом із тим їх основним недоліком є низька ефективність використання ресурсів та значна тривалість будівництва, що обумовлено відсутністю паралельності виконання робіт. [89; 91; 96; 109]

Потокові моделі організації будівництва передбачають поділ об'єкта на окремі захватки або фронти робіт, що дозволяє виконувати різні технологічні процеси паралельно спеціалізованими бригадами. Це забезпечує ритмічність виробництва, скорочення строків реалізації проєкту та більш ефективне використання ресурсів. Водночас потокові моделі вимагають високого рівня узгодженості між процесами і є чутливими до порушення ритму виконання робіт. У разі виникнення відхилень від запланованих параметрів порушується вся структура потоку, що призводить до втрати ефективності. [91; 96; 104; 111]

Мережеві моделі організації будівництва базуються на використанні графових структур, що відображають взаємозв'язки між роботами. Найбільш поширеними є метод критичного шляху (CPM) та метод PERT, які дозволяють визначити послідовність виконання робіт, встановити критичні операції та оцінити резерви часу. Мережеві моделі забезпечують високий рівень формалізації та дозволяють оптимізувати календарні графіки, однак вони також орієнтовані на відносно стабільні умови реалізації проєкту. У разі виникнення змін їх коригування потребує значних трудових витрат і часто здійснюється із запізненням.

Комбіновані моделі поєднують елементи лінійних, поточкових і мережевих підходів, що дозволяє враховувати особливості конкретного будівельного об'єкта. Вони є більш гнучкими порівняно з базовими моделями, однак їх ефективність значною мірою залежить від якості вихідних даних та рівня деталізації проєкту.

Незважаючи на відмінності, усі зазначені моделі мають спільну методологічну основу, яка базується на фіксації параметрів будівельного процесу

на етапі планування. Це означає, що обсяги робіт, ресурси, строки виконання та технологічна послідовність визначаються заздалегідь і вважаються незмінними протягом реалізації проєкту. У таких умовах управління має переважно реактивний характер: коригування здійснюється після виникнення відхилень, що знижує ефективність прийнятих рішень. [52; 87; 91; 96]

Аналіз сучасної практики будівництва свідчить, що подібний підхід не відповідає реальним умовам реалізації проєктів. Як було встановлено у попередньому підрозділі, будівельне виробництво функціонує в середовищі постійних змін, що впливають на всі елементи організаційно-технологічної системи. У таких умовах статичні моделі не забезпечують необхідної гнучкості та не дозволяють оперативно реагувати на зміну параметрів.

Основними обмеженнями існуючих організаційно-технологічних моделей є:

- жорсткість структури, що не передбачає можливості оперативної перебудови процесів;
- орієнтація на детерміновані параметри, які не враховують вплив факторів невизначеності;
- відсутність інтегрованого інформаційного середовища, що ускладнює координацію дій учасників;
- реактивний характер управління, при якому рішення приймаються після виникнення відхилень;
- обмежені можливості прогнозування, що не дозволяє оцінити наслідки альтернативних сценаріїв.

Зазначені обмеження набувають особливої критичності в умовах зростання складності будівельних проєктів та підвищення вимог до їх ефективності. У таких умовах виникає необхідність формування нових підходів до організації будівництва, що забезпечують адаптацію системи до змін.

Важливим напрямом розвитку організаційно-технологічних моделей є їх інтеграція з цифровими технологіями. Використання інформаційних систем

дозволяє перейти від статичних до динамічних моделей, які здатні враховувати зміни параметрів у реальному часі. У цьому контексті ERP-системи виступають як інструмент інтеграції даних про ресурси, роботи, фінансові показники та часові параметри проєкту. [52; 87]

Інтеграція організаційно-технологічних моделей із ERP дозволяє:

- забезпечити актуалізацію даних у реальному часі;
- підвищити обґрунтованість управлінських рішень;
- здійснювати моделювання альтернативних сценаріїв;
- забезпечити адаптивність виробничої системи.

Таким чином, сучасний етап розвитку організації будівельного виробництва характеризується переходом від статичних моделей до інтегрованих цифрових систем управління, що забезпечують адаптивність і гнучкість виробничих процесів.

Отже, проведений аналіз показує, що існуючі організаційно-технологічні моделі не в повній мірі відповідають вимогам сучасного будівництва, що функціонує в умовах динамічних змін. Це обумовлює необхідність розроблення нових підходів до організації виробництва, які базуються на використанні цифрових технологій та забезпечують підтримку управлінських рішень у реальному часі.

Проведене дослідження є теоретичною основою для формування адаптивної цифрової моделі організації будівництва, що розглядається у подальших розділах дисертації. [91; 96]

З метою системного порівняння існуючих організаційно-технологічних моделей будівництва доцільно узагальнити їх основні характеристики, переваги та обмеження, зокрема в контексті функціонування в умовах динамічних змін.

Таблиця 1.2

Порівняльна характеристика організаційно-технологічних моделей будівництва

Тип моделі	Характеристика	Переваги	Недоліки	Обмеження в умовах змін
Лінійна	Послідовне виконання робіт	Простота	Тривалі строки	Повна негнучкість
Потокова	Паралельне виконання	Ритмічність	Чутливість до збоїв	Руйнування потоку при змінах
Мережева	Графова структура	Контроль строків	Складність перебудови	Повільна адаптація
Комбінована	Поєднання підходів	Гнучкість	Залежність від даних	Обмежена адаптивність
Цифрова (ERP)	Інтегрована система	Адаптивність, аналітика	Складність впровадження	Високі вимоги до системи

Проведений порівняльний аналіз показує, що традиційні організаційно-технологічні моделі не забезпечують належного рівня адаптивності в умовах динамічних змін. Це обумовлює необхідність переходу до цифрових моделей управління, що базуються на інтеграції інформаційних потоків та підтримці прийняття управлінських рішень у реальному часі. [91; 96; 104; 111]

1.5 Поняття адаптивності будівельного виробництва як наукової категорії

У сучасних умовах функціонування будівельної галузі, що характеризуються високим рівнем динамічності та невизначеності, традиційні підходи до організації будівельного виробництва втрачають свою ефективність. Як було встановлено у попередніх підрозділах, ключовою проблемою є невідповідність між змінним характером середовища реалізації будівельних проєктів та статичною природою існуючих організаційно-технологічних моделей. Це зумовлює необхідність

введення нових наукових категорій, що дозволяють адекватно описати поведінку виробничої системи в умовах змін. [87; 89; 91; 104]

Однією з таких категорій є адаптивність будівельного виробництва, яка відображає здатність організаційно-технологічної системи змінювати свою структуру, параметри та режим функціонування у відповідь на вплив зовнішніх і внутрішніх факторів без втрати ефективності.

У загальнонауковому розумінні адаптивність розглядається як властивість системи пристосовуватися до змін умов функціонування. У технічних, економічних та управлінських системах ця категорія набуває конкретного змісту, що пов'язаний із можливістю збереження або підвищення результативності системи при зміні параметрів середовища. [87; 89; 91; 104]

У контексті організації будівельного виробництва адаптивність має специфічні особливості, що обумовлені характером будівельної діяльності. На відміну від багатьох інших виробничих систем, будівництво характеризується високим рівнем міжопераційної залежності, значною тривалістю циклу реалізації, територіальною розосередженістю процесів та залученням великої кількості учасників. Це означає, що зміна одного з параметрів системи може спричинити ланцюгову реакцію, яка впливає на всі елементи виробничого процесу. [89; 91; 109]

У таких умовах адаптивність не може розглядатися як локальна властивість окремих процесів, а має трактуватися як системна характеристика організаційно-технологічної моделі будівництва. [52; 87; 91; 96]

З урахуванням викладеного адаптивність будівельного виробництва доцільно визначити як здатність організаційно-технологічної системи забезпечувати досягнення запланованих або допустимих показників ефективності шляхом зміни структури виконання робіт, параметрів ресурсного забезпечення та календарних характеристик у відповідь на зміну умов реалізації будівельного проєкту.

Запропоноване визначення дозволяє виділити кілька ключових аспектів адаптивності. [91; 96; 104]

По-перше, адаптивність передбачає наявність альтернативних організаційно-технологічних рішень. Це означає, що система повинна бути спроектована не як

єдиний жорстко визначений сценарій, а як множина можливих варіантів виконання робіт, між якими може здійснюватися вибір залежно від умов.

По-друге, адаптивність пов'язана зі здатністю до оперативної перебудови. Це означає, що система повинна мати механізми швидкого переходу від одного варіанту організації до іншого без суттєвих втрат часу та ресурсів. [91; 104; 109; 111]

По-третє, адаптивність передбачає збереження ефективності функціонування. Важливою є не сама можливість зміни структури процесів, а здатність системи при цьому забезпечувати досягнення цільових показників або мінімізувати відхилення від них.

По-четверте, адаптивність є безпосередньо пов'язаною з інформаційним забезпеченням. Для прийняття обґрунтованих рішень щодо перебудови виробничого процесу необхідна наявність актуальної інформації про стан системи, ресурси, строки виконання робіт та зовнішні умови. [89; 91; 96; 104]

З огляду на це адаптивність будівельного виробництва доцільно розглядати у взаємозв'язку з рівнем цифрової зрілості системи управління. В умовах відсутності інтегрованого інформаційного середовища реалізація адаптивного підходу є суттєво ускладненою, оскільки управлінські рішення приймаються на основі неповних або застарілих даних.

У цьому контексті особливого значення набувають ERP-системи як інструмент забезпечення адаптивності. Вони дозволяють інтегрувати інформацію про ресурси, роботи, фінансові показники та часові параметри в єдиній системі, що створює передумови для оперативного аналізу ситуації та прийняття обґрунтованих управлінських рішень. [89; 104]

Використання ERP-систем дозволяє реалізувати ключові функції адаптивного управління, зокрема:

- моніторинг стану будівельного процесу в реальному часі;
- виявлення відхилень від планових показників;
- аналіз причин виникнення змін;

- формування альтернативних сценаріїв організації робіт;
- вибір оптимального рішення з урахуванням заданих критеріїв.

Таким чином, ERP-системи виступають як технологічна основа забезпечення адаптивності будівельного виробництва.

Для більш повного розкриття сутності адаптивності доцільно розглянути її структуру. Адаптивність як системна характеристика включає кілька взаємопов'язаних компонентів:

- структурну адаптивність, що характеризує здатність змінювати послідовність і взаємозв'язки між роботами;
- ресурсну адаптивність, що відображає можливість перерозподілу трудових, матеріальних і технічних ресурсів;
- часову адаптивність, що пов'язана зі здатністю коригувати календарні графіки виконання робіт;
- організаційну адаптивність, що визначає здатність змінювати структуру управління та взаємодію учасників проєкту.

Сукупність зазначених компонентів формує інтегральну характеристику адаптивності виробничої системи. [91; 104; 109; 111]

Важливим аспектом є можливість кількісного оцінювання адаптивності. У рамках даного дослідження адаптивність розглядається як показник, що відображає здатність системи зберігати ефективність при зміні умов реалізації проєкту. Це створює передумови для формування критеріїв оцінювання та використання адаптивності як інструменту порівняння альтернативних організаційно-технологічних рішень.

Таким чином, адаптивність будівельного виробництва виступає ключовою науковою категорією, що відображає здатність організаційно-технологічної системи ефективно функціонувати в умовах динамічних змін. Її забезпечення потребує переходу від статичних моделей організації будівництва до інтегрованих цифрових систем управління, що базуються на використанні ERP-технологій.

Отже, введення поняття адаптивності дозволяє сформувати теоретичну основу для розроблення моделей цифрової підтримки управлінських рішень, які забезпечують ефективне функціонування будівельного виробництва в умовах змін, що становить предмет подальших досліджень.

Для більш глибокого розкриття сутності адаптивності будівельного виробництва як системної характеристики організаційно-технологічної моделі доцільно представити її структуру у вигляді узагальненої концептуальної схеми. Такий підхід дозволяє відобразити взаємозв'язок між основними складовими адаптивності та визначити роль цифрових інструментів, зокрема ERP-систем, у забезпеченні гнучкості управління будівельним процесом.

На рисунку 1.2 наведено структурно-функціональну модель адаптивності будівельного виробництва, яка відображає ключові компоненти адаптації організаційно-технологічної системи до змін умов реалізації проєкту.



Рисунок 1.2 Структурно-функціональна модель адаптивності будівельного виробництва на основі ERP-підтримки управління

Модель відображає адаптивність будівельного виробництва як інтегровану системну характеристику, що формується в результаті взаємодії структурних, ресурсних, часових та організаційних компонентів.

Центральним елементом моделі є адаптивна система управління, реалізована на базі ERP-технологій, яка забезпечує інформаційну інтеграцію та підтримку прийняття управлінських рішень. У межах цієї системи здійснюється моніторинг стану будівельного процесу, аналіз змін, моделювання альтернативних сценаріїв та вибір оптимальних організаційно-технологічних рішень. [104; 109]

Структурна адаптивність характеризує здатність системи змінювати послідовність і взаємозв'язки між роботами, що дозволяє формувати альтернативні варіанти виконання виробничих процесів. Ресурсна адаптивність відображає можливість перерозподілу матеріальних, трудових і технічних ресурсів залежно від змін умов реалізації проєкту. Часова адаптивність пов'язана зі здатністю коригувати календарні графіки виконання робіт і забезпечувати узгодженість процесів у часі. Організаційна адаптивність визначає здатність змінювати структуру управління, взаємодію учасників проєкту та механізми координації їх діяльності.

Взаємодія зазначених компонентів забезпечує досягнення ключової мети адаптивного управління — збереження ефективності функціонування будівельного виробництва в умовах змін. Це проявляється у зниженні впливу негативних факторів, мінімізації відхилень від планових показників та підвищенні стійкості виробничої системи. [91; 96; 104]

Таким чином, представлена модель демонструє, що адаптивність будівельного виробництва є результатом інтеграції організаційно-технологічних рішень та цифрових інструментів управління, серед яких ERP-системи відіграють ключову роль як механізм забезпечення гнучкості та обґрунтованості управлінських рішень.

1.6 Передумови формування адаптивної цифрової моделі організації будівництва

Результати проведеного у попередніх підрозділах аналізу свідчать про наявність системної невідповідності між сучасними умовами функціонування будівельного виробництва та існуючими підходами до його організації. Як було встановлено, будівництво реалізується в умовах постійних змін параметрів середовища, що охоплюють ресурсні, часові, технологічні та організаційні аспекти. Водночас більшість традиційних організаційно-технологічних моделей орієнтовані на стабільність умов реалізації проєкту та не передбачають можливості оперативної перебудови виробничих процесів. [8; 17; 31; 52]

У таких умовах виникає об'єктивна потреба у формуванні нових підходів до організації будівельного виробництва, які забезпечують адаптацію системи до змін та підтримку прийняття управлінських рішень у реальному часі. Ця потреба є передумовою переходу до адаптивної цифрової моделі організації будівництва, що базується на інтеграції організаційно-технологічних рішень і сучасних інформаційних технологій. [91; 96; 104; 112]

Передумови формування адаптивної цифрової моделі доцільно розглядати як сукупність факторів, що визначають необхідність і можливість переходу до нового типу організації будівельного виробництва.

Першою групою передумов є зміна характеру середовища функціонування будівництва. Як було показано у підрозділі 1.3, сучасні будівельні проєкти реалізуються в умовах високої динамічності, що проявляється у нестабільності ресурсного забезпечення, змінності фінансування, коригуванні проєктних рішень та впливі зовнішніх факторів. У таких умовах ефективність організації будівництва визначається не лише якістю початкового планування, а й здатністю системи адаптуватися до змін. [89; 91; 104; 109; 111]

Другою передумовою є обмеженість традиційних організаційно-технологічних моделей, що була встановлена у підрозділі 1.4. Існуючі підходи не забезпечують необхідної гнучкості, мають реактивний характер управління та не дозволяють ефективно враховувати вплив факторів невизначеності. Це обумовлює

необхідність переходу до моделей нового типу, які базуються на принципах адаптивності та інтеграції інформаційних потоків. [89; 91; 111]

Третьою передумовою є зростання складності будівельних проєктів. Сучасні об'єкти характеризуються багатокомпонентною структурою, великою кількістю учасників, високими вимогами до якості та строків реалізації. Це ускладнює процес управління та підвищує вимоги до координації дій усіх учасників проєкту.

Четвертою передумовою є необхідність підвищення ефективності управлінських рішень. У традиційних умовах рішення часто приймаються на основі неповної або застарілої інформації, що призводить до помилок та зниження ефективності реалізації проєктів. Це зумовлює потребу у використанні інструментів, що забезпечують оперативний доступ до актуальних даних та підтримку прийняття обґрунтованих рішень. [52; 87; 91]

П'ятою передумовою є розвиток цифрових технологій, які створюють технічну основу для формування адаптивних моделей. Впровадження BIM, ERP, CDE та інших інформаційних систем дозволяє інтегрувати дані про об'єкт будівництва, ресурси, строки та фінансові показники в єдиному цифровому середовищі.

Особливу роль у цьому процесі відіграють ERP-системи, які забезпечують управління ресурсами, календарними планами, фінансовими потоками та виконанням робіт. Їх використання дозволяє перейти від фрагментованого до інтегрованого управління будівельним виробництвом. [8; 17; 31; 52]

Шостою передумовою є зміна ролі інформації у системі управління будівництвом. Якщо раніше інформація виконувала допоміжну функцію, то в умовах цифровізації вона стає ключовим ресурсом, що визначає якість управлінських рішень. Це обумовлює необхідність формування єдиного інформаційного середовища, що забезпечує актуальність і достовірність даних.

Сьомою передумовою є потреба у забезпеченні адаптивності виробничої системи, яка була визначена у підрозділі 1.5 як ключова характеристика сучасної організації будівництва. Адаптивність передбачає можливість варіантного

формування організаційно-технологічних рішень, їх оперативної перебудови та збереження ефективності функціонування системи. [31; 52]

Узагальнення наведених передумов дозволяє сформулювати основні принципи формування адаптивної цифрової моделі організації будівництва.

До таких принципів належать:

- принцип інтеграції, що передбачає об'єднання інформаційних потоків у єдиному цифровому середовищі;
- принцип адаптивності, що забезпечує можливість перебудови організаційно-технологічних рішень;
- принцип варіантності, який передбачає формування альтернативних сценаріїв виконання робіт;
- принцип оперативності, що забезпечує своєчасне прийняття управлінських рішень;
- принцип обґрунтованості, що базується на використанні актуальних даних та аналітичних інструментів.

Реалізація зазначених принципів можлива лише за умови використання сучасних інформаційних технологій, серед яких ERP-системи відіграють ключову роль як інструмент інтеграції даних та підтримки прийняття управлінських рішень.

Адаптивна цифрова модель організації будівництва, що формується на основі зазначених передумов, повинна забезпечувати: [8; 17; 52]

- формування організаційно-технологічних рішень з урахуванням можливості їх зміни;
- інтеграцію даних про ресурси, роботи, строки та фінансові показники;
- підтримку прийняття управлінських рішень у реальному часі;
- підвищення ефективності та стійкості виробничої системи.

Таким чином, передумови формування адаптивної цифрової моделі організації будівництва визначаються поєднанням змін у середовищі

функціонування галузі, обмеженістю традиційних підходів та розвитком цифрових технологій. Їх урахування дозволяє сформулювати новий підхід до організації будівельного виробництва, що базується на принципах адаптивності, інтеграції та цифрової підтримки управління. [52; 87; 91]

Отже, у результаті проведеного аналізу обґрунтовано необхідність розроблення адаптивної цифрової моделі організації будівництва, яка забезпечує ефективне функціонування виробничої системи в умовах динамічних змін. Розроблення такої моделі та визначення механізмів її реалізації становить зміст наступного розділу дисертації.

Висновки до розділу 1

У результаті проведеного теоретичного дослідження сформовано такі основні висновки:

1. Проаналізовано еволюцію підходів до організації будівельного виробництва, що дозволило встановити закономірний перехід від емпіричних і детермінованих моделей до інтегрованих цифрових систем управління. Визначено, що традиційні підходи базуються на припущенні стабільності умов реалізації проєкту, що не відповідає сучасним вимогам.

2. Обґрунтовано, що цифрова трансформація будівництва є новою парадигмою організації виробництва, яка передбачає інтеграцію інформаційних потоків, процесів та учасників проєкту в єдиному цифровому середовищі. Встановлено, що ключовими компонентами такої трансформації є BIM, ERP та CDE.

3. Визначено особливості функціонування будівельного виробництва в умовах динамічних змін, що проявляються у нестабільності ресурсного забезпечення, змінності календарних параметрів, технологічній варіативності та багатосуб'єктності управління. Доведено, що зазначені фактори мають системний характер і впливають на всі елементи організаційно-технологічної системи.

4. Проведено аналіз існуючих організаційно-технологічних моделей будівництва, у результаті якого встановлено їх основні обмеження: жорсткість структури, орієнтація на детерміновані параметри, реактивний характер управління та відсутність інтегрованого інформаційного середовища. Обґрунтовано, що ці моделі не забезпечують належного рівня ефективності в умовах динамічних змін.

5. Введено та обґрунтовано поняття адаптивності будівельного виробництва як наукової категорії, що визначається як здатність організаційно-технологічної системи змінювати свою структуру, параметри та режим функціонування у відповідь на зміну умов реалізації проєкту без втрати ефективності.

6. Визначено структуру адаптивності, яка включає структурну, ресурсну, часову та організаційну складові, взаємодія яких формує інтегральну характеристику гнучкості виробничої системи.

7. Обґрунтовано, що забезпечення адаптивності будівельного виробництва неможливе без використання сучасних інформаційних технологій, серед яких ERP-системи відіграють ключову роль як інструмент інтеграції даних, моніторингу стану процесів та підтримки прийняття управлінських рішень.

8. Визначено основні передумови формування адаптивної цифрової моделі організації будівництва, до яких віднесено: зміну характеру середовища функціонування галузі, обмеженість традиційних моделей, зростання складності проєктів, необхідність підвищення ефективності управлінських рішень та розвиток цифрових технологій.

9. Сформульовано принципи побудови адаптивної цифрової моделі організації будівництва, зокрема принципи інтеграції, адаптивності, варіантності, оперативності та обґрунтованості управлінських рішень.

10. Установлено, що подальший розвиток організації будівельного виробництва пов'язаний із розробленням адаптивних цифрових моделей, які забезпечують ефективне функціонування виробничої системи в умовах динамічних змін та реалізуються на основі ERP-підтримки управлінських рішень.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ФОРМУВАННЯ НАУКОВОЇ ГІПОТЕЗИ

Проведений у першому розділі аналіз теоретичних основ організації будівельного виробництва, еволюції підходів до його управління та особливостей функціонування в умовах динамічних змін дозволив встановити наявність системної науково-прикладної проблеми. Сутність цієї проблеми полягає у невідповідності між традиційними організаційно-технологічними моделями, що базуються на детермінованих підходах, та сучасними умовами реалізації будівельних проєктів, які характеризуються високим рівнем невизначеності, динамічності та складності.

У результаті дослідження встановлено, що існуючі підходи до організації будівництва не забезпечують належного рівня адаптивності виробничих систем, що призводить до зниження ефективності реалізації проєктів, збільшення термінів будівництва, перевитрат ресурсів та втрати керованості процесами. Водночас розвиток цифрових технологій, зокрема ERP-систем, створює передумови для формування нових підходів до управління будівельним виробництвом, які базуються на інтеграції інформаційних потоків та підтримці прийняття управлінських рішень у реальному часі. [8; 17; 18; 26]

У цьому контексті виникає необхідність переходу від описового та аналітичного рівня дослідження до формування науково обґрунтованої моделі організації будівельного виробництва, яка забезпечує адаптивність системи в умовах динамічних змін. Такий перехід неможливий без чіткого визначення методологічних засад дослідження, що включають вибір наукових підходів, методів аналізу, принципів моделювання та логіки формування наукової гіпотези.

Методологія дослідження в даній роботі розглядається як система наукових принципів, підходів і методів, що забезпечують послідовне вирішення поставленої наукової проблеми — підвищення ефективності організації будівельного

виробництва шляхом впровадження адаптивної цифрової моделі управління на основі ERP-підтримки. [8; 26]

Формування методологічної основи дослідження базується на поєднанні системного, процесного та функціонального підходів. Системний підхід дозволяє розглядати будівельне виробництво як складну багаторівневу систему, що включає взаємопов'язані елементи: роботи, ресурси, часові параметри та умови реалізації проекту. Процесний підхід забезпечує аналіз послідовності та взаємодії виробничих процесів, а функціональний підхід дозволяє визначити роль окремих компонентів у забезпеченні ефективності системи.

Важливим елементом методології є використання принципів адаптивного управління, які передбачають можливість зміни параметрів системи у відповідь на вплив факторів зовнішнього середовища. Це дозволяє сформувати підхід до організації будівництва як до динамічної системи, що функціонує в умовах постійних змін.

Крім того, у дослідженні застосовуються методи аналізу та синтезу, що дозволяють узагальнити існуючі підходи до організації будівництва та сформувати нову концептуальну модель; методи системного моделювання, що забезпечують формалізацію взаємозв'язків між елементами виробничої системи; а також методи порівняльного аналізу, які використовуються для оцінювання ефективності різних організаційно-технологічних рішень. [18; 26]

Особливе місце в методології дослідження займає використання інформаційно-аналітичних інструментів, що реалізуються в ERP-системах. Вони дозволяють здійснювати моніторинг стану будівельного процесу, аналізувати вплив факторів змін, моделювати альтернативні сценарії розвитку подій та обґрунтовувати управлінські рішення.

Ключовим результатом даного розділу є формування наукової гіпотези дослідження, яка визначає напрям подальшої роботи та слугує основою для розроблення адаптивної цифрової моделі організації будівельного виробництва.

Наукова гіпотеза в даній роботі розглядається як обґрунтоване припущення щодо можливості підвищення ефективності організації будівництва шляхом

використання адаптивної моделі управління, що базується на інтеграції інформаційних потоків та застосуванні ERP-технологій. [8; 17; 18; 26]

Таким чином, у даному розділі дослідження здійснюється:

- формування методологічної основи дослідження;
- аналіз факторів, що впливають на прийняття управлінських рішень;
- визначення критеріїв ефективності організаційно-технологічних систем;
- обґрунтування підходів до побудови моделі;
- формування наукової гіпотези.

Реалізація зазначених завдань дозволяє перейти від теоретичного аналізу до розроблення практично орієнтованої моделі цифрової підтримки управлінських рішень у будівництві.

2.1 Структура організаційно-технологічних рішень у будівництві

Організаційно-технологічні рішення (ОТР) є базовим елементом системи управління будівельним виробництвом, оскільки визначають структуру, послідовність і умови виконання будівельних процесів, а також забезпечують досягнення заданих техніко-економічних показників реалізації проєкту. У сучасній науковій школі організації будівництва, зокрема в дослідженнях вітчизняних науковців, значна увага приділяється системному розгляду ОТР як інтегрованої сукупності взаємопов'язаних параметрів, що формують цілісну організаційно-технологічну модель будівельного виробництва. [8; 17; 18; 26]

У межах наукового доробку здобувача дисертаційного дослідження організаційно-технологічні рішення розглядаються не як сукупність окремих заходів, а як системно організована структура, що охоплює взаємодію виробничих процесів, ресурсного забезпечення, часових параметрів та організаційних умов реалізації проєкту. Такий підхід дозволяє розглядати будівельне виробництво як

складну динамічну систему, у якій кожен елемент впливає на загальний результат функціонування. [18; 26]

З позицій системного підходу структура організаційно-технологічних рішень може бути представлена як багаторівнева система, що включає такі основні компоненти:

- структуру виконання робіт;
- систему ресурсного забезпечення;
- календарно-часові параметри;
- організаційні умови реалізації проєкту.

Зазначені компоненти формують інтегровану модель організації будівельного виробництва, у межах якої забезпечується координація всіх процесів і досягнення запланованих результатів. [17; 26; 31]

Першим і базовим елементом ОТР є структура виконання робіт, яка визначає склад, послідовність і взаємозв'язки між окремими технологічними процесами. Вона формується на основі проєктних рішень і технологічних вимог та відображає логіку реалізації будівельного проєкту. У традиційних підходах структура робіт є жорстко фіксованою, що обмежує можливість її зміни у процесі виконання. [8; 17; 26]

Другим елементом є система ресурсного забезпечення, яка включає трудові, матеріальні та технічні ресурси, необхідні для виконання робіт. Раціональне планування та використання ресурсів є ключовим фактором ефективності будівельного виробництва. Водночас у сучасних умовах ресурсне забезпечення характеризується високим рівнем нестабільності, що потребує гнучких механізмів його управління. [17; 31; 52]

Третім елементом є календарно-часові параметри, що визначають строки виконання робіт, тривалість окремих процесів та їх узгодженість у часі. Календарне планування є важливим інструментом організації будівництва, однак у традиційних моделях воно базується на фіксованих значеннях тривалості робіт, що не враховує можливість їх зміни в процесі реалізації проєкту. [33; 42; 48]

Четвертим елементом є організаційні умови реалізації проєкту, які включають структуру управління, взаємодію учасників, логістичні схеми, умови виконання робіт та інші фактори, що впливають на організацію виробничого процесу. Цей компонент є одним із найбільш складних для формалізації, однак саме він значною мірою визначає ефективність функціонування всієї системи. [17; 26; 52]

У межах наукового підходу, що розвивається в роботах керівника, зазначені компоненти розглядаються у взаємозв'язку, що дозволяє сформувати інтегровану модель організаційно-технологічних рішень. Така модель враховує взаємний вплив елементів системи та дозволяє оцінювати наслідки змін окремих параметрів для загальної ефективності будівництва. [18; 26]

Разом із тим аналіз сучасної практики свідчить, що існуючі підходи до формування ОТР мають низку суттєвих обмежень. Насамперед це пов'язано з тим, що більшість моделей орієнтовані на детерміновані умови та не враховують вплив факторів динамічних змін. У таких умовах структура ОТР формується як статична система, що не передбачає можливості оперативної перебудови. [52; 84; 87]

У результаті виникає ситуація, коли при зміні умов реалізації проєкту (наприклад, затримці постачання ресурсів або зміні технологічних рішень) система організації будівництва втрачає свою ефективність. Це проявляється у порушенні календарних графіків, нераціональному використанні ресурсів та зниженні продуктивності. [52; 84; 87; 91]

Зазначене обумовлює необхідність переходу до нового підходу до формування організаційно-технологічних рішень, що базується на принципах адаптивності та варіантності. У межах такого підходу структура ОТР розглядається не як єдиний жорстко визначений сценарій, а як система можливих варіантів організації будівельного процесу, між якими може здійснюватися вибір залежно від умов реалізації проєкту. [52; 87; 91; 96]

Реалізація такого підходу неможлива без використання сучасних інформаційних технологій. Зокрема, ERP-системи дозволяють інтегрувати дані про роботи, ресурси, строки та організаційні умови в єдиному інформаційному середовищі. Це створює передумови для формування динамічної структури

організаційно-технологічних рішень, що може змінюватися у процесі реалізації проєкту. [91; 96; 104]

У цифровому середовищі структура ОТР набуває нового змісту. Вона перестає бути статичною схемою і трансформується у динамічну модель, що відображає поточний стан виробничої системи та дозволяє оперативно вносити зміни. Це забезпечує можливість переходу до адаптивного управління будівельним виробництвом. [91; 96; 104; 109]

Таким чином, структура організаційно-технологічних рішень у сучасному будівництві повинна розглядатися як інтегрована система взаємопов'язаних компонентів, що функціонує в умовах динамічних змін та забезпечує досягнення цільових показників ефективності.

Отже, проведений аналіз дозволяє зробити висновок, що подальший розвиток підходів до формування ОТР пов'язаний із їх цифровою трансформацією та інтеграцією з ERP-системами, що забезпечують підтримку прийняття управлінських рішень у реальному часі. Це створює методологічну основу для подальшого дослідження факторів, що впливають на прийняття таких рішень, що розглядається у наступному підрозділі.

З метою узагальнення структури організаційно-технологічних рішень у будівництві та відображення взаємозв'язків між їх основними складовими доцільно представити відповідну систему у вигляді інтегрованої схеми. Такий підхід дозволяє перейти від описового представлення елементів до їх системного осмислення як взаємопов'язаних компонентів єдиної організаційно-технологічної моделі. [91; 109]

У межах даного дослідження організаційно-технологічні рішення розглядаються як багаторівнева система, що охоплює структуру виконання робіт, ресурсне забезпечення, календарно-часові параметри та організаційні умови реалізації проєкту. Взаємодія зазначених компонентів визначає ефективність функціонування будівельного виробництва та рівень його адаптивності до змін умов реалізації проєкту.

З урахуванням викладеного, на рисунку 2.1 представлено системну структуру організаційно-технологічних рішень у будівництві.



Риунок 2.1 Системна структура організаційно-технологічних рішень у будівництві

Розроблена системна структура відображає організаційно-технологічні рішення як інтегровану систему взаємопов'язаних компонентів, що забезпечують формування та реалізацію будівельного процесу.

Центральним елементом моделі є організаційно-технологічні рішення, які виступають як узагальнююча категорія, що інтегрує всі параметри організації будівельного виробництва. Навколо центрального елемента сформовано чотири ключові компоненти, що визначають структуру системи.

Перший компонент — структура виконання робіт — характеризує послідовність, взаємозв'язки та варіантність реалізації технологічних процесів. Він визначає логіку організації будівництва та є основою формування календарних і ресурсних параметрів. [91; 96; 104; 109]

Другий компонент — система ресурсного забезпечення — охоплює трудові, матеріальні та технічні ресурси, а також механізми їх планування та розподілу.

Ефективність використання ресурсів безпосередньо впливає на результативність будівельного виробництва.

Третій компонент — календарно-часові параметри — визначає строки виконання робіт, тривалість процесів та їх узгодженість у часі. Він забезпечує синхронізацію виробничих процесів та контроль за дотриманням графіків.

Четвертий компонент — організаційні умови реалізації проєкту — включає структуру управління, взаємодію учасників, логістичні умови та інші фактори, що впливають на організацію виконання робіт.

Взаємозв'язок між зазначеними компонентами має взаємозалежний характер: зміна будь-якого з них призводить до трансформації всієї системи організаційно-технологічних рішень. Це підтверджує необхідність їх комплексного розгляду в межах єдиної моделі. [91; 109]

Схема також відображає, що ефективність будівельного виробництва досягається не окремо за рахунок оптимізації кожного компонента, а в результаті їх узгодженої взаємодії. Саме ця взаємозалежність є визначальною особливістю організаційно-технологічних рішень як системної категорії.

Таким чином, представлена модель дозволяє розглядати організаційно-технологічні рішення як цілісну систему, що функціонує в умовах динамічних змін та потребує інтегрованого підходу до управління. Це створює основу для подальшого аналізу факторів, що впливають на прийняття управлінських рішень, а також для формування адаптивної цифрової моделі організації будівництва.

2.2 Класифікація факторів динамічних змін реалізації будівельних проєктів

Сучасні умови реалізації будівельних проєктів характеризуються високим рівнем динамічності, що обумовлено постійною зміною параметрів зовнішнього та внутрішнього середовища. Як було встановлено у попередніх підрозділах, ефективність організації будівельного виробництва значною мірою залежить від здатності системи враховувати ці зміни та адаптуватися до них. [52; 84; 87; 91]

У зв'язку з цим виникає необхідність системного аналізу факторів динамічних змін, що впливають на процес реалізації будівельних проєктів. Такий аналіз дозволяє визначити джерела відхилень від планових показників, оцінити їх вплив на організаційно-технологічні рішення та сформулювати основу для побудови адаптивної моделі управління. [17; 31; 52]

У межах даного дослідження фактори динамічних змін розглядаються як сукупність впливів, що призводять до відхилення фактичних параметрів будівельного процесу від запланованих значень. З позицій системного підходу ці фактори доцільно класифікувати за характером їх впливу на основні компоненти організаційно-технологічної системи. [52; 87; 96]

Відповідно до структури організаційно-технологічних рішень, обґрунтованої у підрозділі 2.1, фактори динамічних змін доцільно поділити на чотири основні групи: ресурсні, часові, технологічні та організаційні. [17; 26; 31]

Ресурсні фактори пов'язані зі змінами у забезпеченні будівельного процесу трудовими, матеріальними та технічними ресурсами. До цієї групи належать:

- затримки постачання матеріалів;
- зміна вартості ресурсів;
- нестача або надлишок трудових ресурсів;
- відмови або обмеження у використанні технічних засобів;
- порушення логістичних схем постачання.

Ресурсні фактори безпосередньо впливають на можливість виконання запланованих робіт і часто є причиною змін у календарних графіках та структурі виробничих процесів. [33; 42; 52]

Часові фактори характеризують відхилення у параметрах тривалості та строків виконання робіт. До них належать:

- порушення календарних графіків;
- зміна тривалості окремих процесів;
- затримки у прийнятті управлінських рішень;

- зсув строків початку або завершення робіт.

Часові фактори мають системний характер, оскільки впливають на узгодженість виконання процесів і можуть призводити до порушення всієї організаційно-технологічної структури. [33; 42; 48]

Технологічні фактори пов'язані зі змінами у способах виконання робіт та технологічних рішеннях. До цієї групи належать:

- коригування проєктних рішень;
- зміна технологій виконання робіт;
- необхідність повторного виконання окремих процесів;
- вплив умов будівельного майданчика на технологію.

Технологічні фактори є особливо важливими, оскільки вони впливають не лише на окремі процеси, а й на структуру всієї системи організації будівництва. [42; 48; 52]

Організаційні фактори визначаються умовами управління проєктом та взаємодією його учасників. До них належать: [17; 26; 52]

- зміни у складі учасників проєкту;
- порушення координації між підрядниками;
- зміна структури управління;
- недостатній рівень інформаційної взаємодії;
- управлінські помилки.

Організаційні фактори часто є причиною виникнення інших видів змін, оскільки впливають на ефективність прийняття управлінських рішень.

Крім зазначеної класифікації, фактори динамічних змін доцільно розглядати також за джерелом їх виникнення. За цією ознакою їх можна поділити на внутрішні та зовнішні.

До внутрішніх факторів належать ті, що виникають у межах будівельного проєкту та пов'язані з організацією виробництва, управлінням ресурсами та виконанням робіт.

До зовнішніх факторів відносяться зміни, що виникають поза межами проєкту, зокрема економічні, політичні, нормативні та інші впливи.

Важливою характеристикою факторів динамічних змін є їх взаємозв'язок. У більшості випадків зміни не виникають ізольовано, а мають комплексний характер. Наприклад, затримка постачання матеріалів (ресурсний фактор) призводить до зміни календарного графіка (часовий фактор), що, у свою чергу, може викликати необхідність зміни технології виконання робіт (технологічний фактор) та перерозподілу функцій між учасниками проєкту (організаційний фактор). [52; 84; 87]

Таким чином, фактори динамічних змін формують складну систему взаємопов'язаних впливів, що визначають поведінку організаційно-технологічної системи будівництва.

З урахуванням викладеного можна зробити висновок, що ефективне управління будівельним виробництвом у сучасних умовах можливе лише за умови врахування комплексного характеру факторів динамічних змін та їх інтеграції у процес прийняття управлінських рішень.

Реалізація такого підходу потребує використання сучасних інформаційних інструментів, які дозволяють здійснювати моніторинг стану системи, аналізувати вплив факторів та формувати альтернативні сценарії організації робіт. У цьому контексті ERP-системи виступають як ефективний інструмент інтеграції даних і підтримки прийняття управлінських рішень. [52; 87]

Отже, проведена класифікація факторів динамічних змін створює теоретичну основу для подальшого визначення критеріїв ефективності організаційно-технологічних систем та формування наукової гіпотези дослідження.

З метою систематизації факторів динамічних змін та визначення їх впливу на організаційно-технологічні рішення доцільно узагальнити їх у вигляді класифікаційної структури. Такий підхід дозволяє встановити взаємозв'язки між

факторами та оцінити їх вплив на ефективність функціонування будівельного виробництва. Класифікацію факторів динамічних змін наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Класифікація факторів динамічних змін у будівництві

Група факторів	Склад факторів	Характер впливу	Наслідки для ОТР
Ресурсні	Затримка постачання матеріалів, зміна вартості ресурсів, нестача трудових ресурсів, обмеження техніки	Порушення забезпечення процесів	Зміна структури робіт, перерозподіл ресурсів
Часові	Відхилення графіків, зміна тривалості робіт, затримки рішень	Порушення ритмічності процесів	Зсув строків, порушення послідовності
Технологічні	Зміна проєктних рішень, технологій, умов виконання	Перебудова технологічного процесу	Зміна структури робіт, додаткові операції
Організаційні	Зміна учасників, порушення координації, управлінські помилки	Порушення управління	Дисбаланс системи, зниження ефективності
Зовнішні	Економічні, політичні, нормативні зміни	Неконтрольований вплив	Комплексні зміни всіх параметрів
Внутрішні	Помилки планування, ресурсні дисбаланси	Внутрішні відхилення	Локальні або системні перебудови

Аналіз даних, наведених у таблиці 2.1, свідчить про те, що фактори динамічних змін мають комплексний і взаємопов'язаний характер впливу на організаційно-технологічні рішення. [52; 84]

Встановлено, що найбільш критичними для функціонування будівельного виробництва є ресурсні та часові фактори, оскільки вони безпосередньо впливають на можливість виконання робіт і дотримання календарних графіків. Технологічні фактори визначають необхідність перебудови виробничого процесу, тоді як організаційні фактори формують умови управління та координації дій учасників проєкту. [52; 84; 87]

Особливістю факторів динамічних змін є їх взаємозалежність: зміна одного параметра призводить до ланцюгової трансформації інших компонентів системи. Це підтверджує необхідність їх комплексного врахування при формуванні організаційно-технологічних рішень. [52; 87; 91]

Отже, проведена класифікація дозволяє розглядати фактори динамічних змін як інтегровану систему впливів, що визначає поведінку будівельного виробництва та формує вимоги до адаптивності управління.

2.3 Вплив факторів динамічних змін на ефективність організації будівництва та прийняття управлінських рішень

Ефективність організації будівельного виробництва в сучасних умовах визначається не лише якістю початкового планування, але й здатністю системи управління оперативно реагувати на зміну параметрів реалізації проєкту. Як було встановлено у підрозділі 2.2, фактори динамічних змін мають комплексний характер і впливають на всі складові організаційно-технологічної системи. У зв'язку з цим особливого значення набуває дослідження механізмів їх впливу на ефективність будівництва та процес прийняття управлінських рішень. [17; 31; 52; 87]

У традиційній моделі організації будівництва управлінські рішення формуються на основі планових показників, що визначаються на початкових етапах

проєкту. При цьому передбачається відносна стабільність умов реалізації, а відхилення від плану розглядаються як виняткові ситуації. Однак у сучасних умовах така модель виявляється неефективною, оскільки більшість змін мають системний характер і виникають протягом усього життєвого циклу проєкту. [17; 33; 42; 61]

Вплив факторів динамічних змін на ефективність організації будівництва проявляється через зміну ключових параметрів організаційно-технологічної системи — структури виконання робіт, ресурсного забезпечення, календарних характеристик та організаційних умов. [52; 84; 87; 91]

Ресурсні фактори безпосередньо впливають на можливість реалізації запланованих робіт. Наприклад, затримка постачання матеріалів або нестача трудових ресурсів призводить до простоїв, порушення послідовності виконання процесів та необхідності перерозподілу ресурсів. Це, у свою чергу, знижує ефективність використання виробничого потенціалу та збільшує загальну тривалість будівництва. [52; 87; 91; 96]

Часові фактори формують динаміку виконання будівельного процесу. Відхилення від календарних графіків призводять до порушення ритмічності робіт, втрати узгодженості між процесами та накопичення відхилень. Особливістю часових змін є їх здатність поширюватися на всю систему: затримка однієї операції може спричинити зміну строків виконання інших процесів, що формує ефект ланцюгової реакції. [52; 84; 87]

Технологічні фактори визначають необхідність зміни способів виконання робіт, що безпосередньо впливає на структуру організаційно-технологічних рішень. Зміна технології може вимагати додаткових ресурсів, коригування графіків та перегляду взаємозв'язків між процесами. Це підвищує складність управління та вимагає оперативного прийняття рішень. [52; 84; 91]

Організаційні фактори впливають на координацію дій учасників проєкту та ефективність управління. Порушення інформаційної взаємодії, зміна структури управління або недостатній рівень координації можуть призвести до неузгодженості дій, що знижує ефективність функціонування системи в цілому.

Сукупний вплив зазначених факторів проявляється у зміні ефективності організації будівельного виробництва, яка може оцінюватися за такими показниками, як:

- дотримання строків реалізації проєкту;
- ефективність використання ресурсів;
- рівень витрат;
- якість виконання робіт;
- стійкість виробничої системи до змін.

У традиційних підходах управлінські рішення приймаються після фіксації відхилень від планових показників. Такий підхід має реактивний характер і не дозволяє запобігати негативним наслідкам змін. У результаті управління здійснюється в умовах обмеженого часу та неповної інформації, що знижує обґрунтованість прийнятих рішень. [52; 84; 91]

У сучасних умовах виникає необхідність переходу до проактивного управління, яке передбачає врахування можливих змін ще на етапі планування та забезпечує оперативну адаптацію системи в процесі реалізації проєкту. Це вимагає принципово нового підходу до прийняття управлінських рішень, що базується на аналізі актуальних даних, моделюванні сценаріїв та оцінці їх наслідків. [17; 52; 87]

Важливою особливістю процесу прийняття управлінських рішень у будівництві є його багатокритеріальний характер. Рішення повинні враховувати одночасно кілька параметрів — строки, ресурси, вартість, технологічні обмеження та організаційні умови. Умови динамічних змін ускладнюють цей процес, оскільки значення зазначених параметрів можуть змінюватися у процесі реалізації проєкту.

У цьому контексті ключового значення набуває використання інформаційних систем, що забезпечують підтримку прийняття управлінських рішень. Зокрема, ERP-системи дозволяють інтегрувати дані про всі компоненти організаційно-технологічної системи, здійснювати їх аналіз та формувати альтернативні варіанти організації будівельного процесу.

Використання ERP-систем забезпечує:

- оперативний доступ до актуальної інформації;
- виявлення відхилень від планових показників;
- аналіз причин виникнення змін;
- моделювання альтернативних сценаріїв;
- вибір оптимального рішення з урахуванням заданих критеріїв.

Таким чином, ERP-системи створюють основу для переходу від інтуїтивного до аналітично обґрунтованого прийняття управлінських рішень.

Узагальнюючи викладене, можна зробити висновок, що фактори динамічних змін мають визначальний вплив на ефективність організації будівельного виробництва та процес прийняття управлінських рішень. Їх врахування потребує переходу до адаптивних моделей управління, що забезпечують гнучкість системи та її здатність до оперативної перебудови. [61; 91; 96; 104]

Отже, дослідження впливу факторів динамічних змін підтверджує необхідність розроблення адаптивної цифрової моделі організації будівництва, яка забезпечує підтримку прийняття управлінських рішень у реальному часі. Це створює передумови для формування наукової гіпотези дослідження, що розглядається у наступному підрозділі. [52; 87; 91]

З метою поглиблення системного аналізу факторів динамічних змін та відображення їх взаємозв'язку з організаційно-технологічними рішеннями доцільно представити узагальнену класифікацію у вигляді концептуальної схеми. Такий підхід дозволяє не лише структурувати фактори за їх функціональними ознаками, але й візуалізувати механізм їх впливу на процес організації будівельного виробництва. [91; 96; 104; 111]

У межах даного дослідження фактори динамічних змін розглядаються як інтегрована система впливів, що формуються як у внутрішньому середовищі будівельного проєкту, так і під впливом зовнішніх умов. Вони безпосередньо

визначають характер прийняття організаційно-технологічних рішень та рівень ефективності функціонування виробничої системи. [96; 104; 111]

З урахуванням викладеного, на рис. 2.2 представлено класифікацію факторів динамічних змін у будівництві з урахуванням їх системного впливу на організаційно-технологічні рішення.



Рисунок 2.2 Класифікація факторів динамічних змін у будівництві та їх вплив на організаційно-технологічні рішення

Розроблена схема відображає класифікацію факторів динамічних змін як багаторівневу систему взаємопов'язаних впливів, що формують умови реалізації будівельного проєкту.

У центральній частині схеми розміщено ERP-систему як інтеграційне ядро управління, що забезпечує обробку інформації, аналіз стану будівельного процесу та підтримку прийняття управлінських рішень. Саме через ERP-систему

здійснюється інтеграція даних про всі фактори, що впливають на організацію будівництва. [91; 96; 104; 112]

Навколо центрального елемента структуровано основні групи факторів динамічних змін. Ресурсні фактори відображають змінність забезпечення матеріальними, трудовими та технічними ресурсами. Часові фактори характеризують відхилення у календарних параметрах виконання робіт. Технологічні фактори визначають зміну способів реалізації виробничих процесів, а організаційні — умови управління та координації учасників проєкту.

Додатково виділено внутрішні та зовнішні фактори, що відображають джерело виникнення змін. Внутрішні фактори формуються в межах будівельного процесу та пов'язані з помилками планування або ресурсними дисбалансами, тоді як зовнішні фактори обумовлені впливом економічного, нормативного та політичного середовища. [91; 96; 111; 112]

Схема також демонструє, що вплив факторів має спрямований характер і реалізується через зміну організаційно-технологічних рішень. Це проявляється у необхідності перебудови структури виконання робіт, перерозподілу ресурсів, коригування календарних графіків та зміни організаційних умов реалізації проєкту.

У нижній частині схеми відображено результат взаємодії факторів — виникнення динамічних змін, що характеризують фактичний стан будівельного процесу. Це підтверджує, що динамічні зміни є не випадковими явищами, а закономірним результатом комплексного впливу різних груп факторів.

Таким чином, представлена схема дозволяє розглядати фактори динамічних змін як інтегровану систему впливів, що визначає поведінку організаційно-технологічної системи будівництва. Це створює основу для подальшого дослідження механізмів їх впливу на прийняття управлінських рішень та обґрунтування необхідності використання адаптивної цифрової моделі управління.

2.4 Проблеми та обмеження традиційних підходів до організації будівництва

Сучасна практика організації будівельного виробництва базується переважно на традиційних організаційно-технологічних підходах, що сформувалися в умовах відносної стабільності середовища реалізації проєктів. Ці підходи передбачають формування структури виконання робіт, планування ресурсів та календарних параметрів на початкових етапах проєкту з подальшим контролем їх виконання.

Разом із тим, як було встановлено у попередніх підрозділах, сучасні умови реалізації будівельних проєктів характеризуються високим рівнем динамічності та невизначеності. Це призводить до того, що традиційні підходи не забезпечують належної ефективності управління і потребують критичного переосмислення.

Однією з основних проблем традиційних підходів є їх детермінований характер. Організаційно-технологічні рішення формуються як фіксовані сценарії виконання робіт, що базуються на припущенні незмінності умов реалізації проєкту. У результаті система управління не передбачає можливості оперативної перебудови у разі виникнення змін. [8; 17; 26; 61]

Другою суттєвою проблемою є реактивний характер управління. У традиційних моделях управлінські рішення приймаються після виникнення відхилень від планових показників. Це означає, що система реагує на наслідки змін, а не запобігає їм. Такий підхід призводить до втрати часу, зниження ефективності та накопичення негативних наслідків. [17; 31; 61]

Третьою проблемою є відсутність інтегрованого інформаційного середовища. У більшості випадків інформація про стан будівельного процесу є фрагментованою та розосередженою між різними учасниками проєкту. Це ускладнює процес прийняття управлінських рішень, оскільки вони базуються на неповних або несвоєчасних даних. [52; 84; 87]

Четвертою проблемою є обмеженість можливостей варіантного аналізу. Традиційні підходи не передбачають формування альтернативних сценаріїв організації будівельного процесу та оцінювання їх ефективності. У результаті

управлінські рішення приймаються без достатнього обґрунтування та аналізу можливих наслідків. [33; 42; 48; 52]

П'ятою проблемою є низький рівень адаптивності організаційно-технологічних систем. Як було обґрунтовано у підрозділі 1.5, адаптивність є ключовою характеристикою сучасного будівельного виробництва. Водночас традиційні моделі не забезпечують можливості зміни структури виконання робіт, перерозподілу ресурсів та коригування календарних параметрів у реальному часі.

Шостою проблемою є розрив між плануванням і виконанням робіт. У традиційних системах планування здійснюється на початкових етапах проєкту, тоді як фактичне виконання робіт відбувається в умовах, що можуть суттєво відрізнятися від запланованих. Відсутність механізмів оперативного коригування призводить до зниження ефективності реалізації проєкту. [33; 52]

Сьомою проблемою є обмежена підтримка прийняття управлінських рішень. У більшості випадків рішення приймаються на основі досвіду та інтуїції керівників, без використання аналітичних інструментів і цифрових моделей. Це підвищує ризик помилок та знижує обґрунтованість управління. [52; 84; 87; 91]

Зазначені проблеми мають системний характер і взаємопов'язані між собою. Їх сукупний вплив призводить до зниження ефективності організації будівельного виробництва, що проявляється у перевищенні строків реалізації проєктів, зростанні витрат та зниженні якості виконання робіт.

Аналіз обмежень традиційних підходів дозволяє зробити висновок про необхідність переходу до нової парадигми організації будівництва, що базується на принципах адаптивності, інтеграції інформаційних потоків та використанні цифрових технологій. [87; 91]

У цьому контексті особливого значення набуває впровадження ERP-систем як інструменту забезпечення інтегрованого управління будівельним виробництвом. Вони дозволяють об'єднати інформацію про всі компоненти системи, забезпечити її актуальність та створити основу для прийняття обґрунтованих управлінських рішень. [17; 52; 61]

Таким чином, проведений аналіз показує, що традиційні підходи до організації будівництва не відповідають сучасним умовам функціонування галузі та не забезпечують необхідного рівня ефективності управління. Це обґрунтовує необхідність розроблення адаптивної цифрової моделі організації будівельного виробництва, яка враховує фактори динамічних змін та забезпечує підтримку прийняття управлінських рішень у реальному часі.

З метою систематизації основних проблем традиційних підходів до організації будівельного виробництва доцільно узагальнити їх у вигляді порівняльної характеристики. Основні обмеження традиційних підходів наведено у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

Проблеми традиційних підходів до організації будівництва

№	Характеристика підходу	Сутність проблеми	Наслідки для будівництва
1	Детермінованість	Фіксовані параметри планування	Нездатність реагувати на зміни
2	Реактивність	Реакція після виникнення проблем	Втрата часу, накопичення відхилень
3	Фрагментованість даних	Відсутність єдиного інформаційного середовища	Неефективні рішення
4	Відсутність варіантності	Не формуються альтернативні сценарії	Обмежена оптимізація
5	Низька адаптивність	Неможливість перебудови процесів	Падіння ефективності
6	Розрив план–факт	Планування відірване від реальності	Порушення графіків
7	Інтуїтивне управління	Відсутність аналітики	Високий ризик помилок

Аналіз наведених у таблиці 2.2 даних свідчить про системний характер проблем традиційних підходів до організації будівництва. Встановлено, що зазначені обмеження взаємопов'язані та формують сукупний негативний ефект, який проявляється у зниженні ефективності реалізації будівельних проєктів. [91; 96; 104]

Особливо критичними є детермінованість і реактивність управління, які обмежують можливість своєчасного реагування на зміни. Водночас відсутність інтегрованого інформаційного середовища та інструментів варіантного аналізу унеможливорює прийняття обґрунтованих управлінських рішень. [87; 91; 96]

Таким чином, традиційні підходи не забезпечують необхідного рівня адаптивності організаційно-технологічних систем, що обґрунтовує доцільність переходу до цифрових моделей управління, які базуються на інтеграції даних та підтримці прийняття рішень у реальному часі. [17; 52; 87]

2.5 Інформаційне забезпечення прийняття управлінських рішень у будівництві на основі ERP-систем

Сучасний етап розвитку будівельної галузі характеризується зростанням обсягів інформації, що супроводжує реалізацію будівельних проєктів, а також ускладненням процесів її обробки та використання. У цих умовах ефективність організації будівельного виробництва значною мірою визначається рівнем інформаційного забезпечення процесу прийняття управлінських рішень. [91; 96; 104; 111]

Як було встановлено у попередньому підрозділі, однією з ключових проблем традиційних підходів є фрагментованість інформації та відсутність інтегрованого інформаційного середовища. Це призводить до прийняття рішень на основі неповних або несвоєчасних даних, що знижує їх обґрунтованість та ефективність.

У зв'язку з цим виникає необхідність формування єдиної інформаційної системи, яка забезпечує інтеграцію даних про всі аспекти будівельного процесу. Одним із найбільш ефективних інструментів вирішення цього завдання є ERP-

системи (Enterprise Resource Planning), що забезпечують комплексне управління ресурсами, процесами та інформаційними потоками. [91; 111]

У контексті організації будівельного виробництва ERP-система розглядається не лише як інструмент обліку, але як інформаційно-аналітична платформа підтримки прийняття управлінських рішень, яка інтегрує дані про структуру виконання робіт, ресурсне забезпечення, календарні параметри та фінансові показники. [87; 91; 104; 112]

Основною функцією ERP-системи є забезпечення єдиного інформаційного простору, у якому здійснюється збір, обробка, зберігання та аналіз даних про стан будівельного процесу. Це дозволяє отримувати актуальну інформацію про хід виконання робіт та оперативно реагувати на зміни. [91; 96; 104]

Важливою особливістю ERP-систем є їх здатність інтегрувати різні функціональні підсистеми управління, зокрема:

- планування та облік ресурсів;
- календарне планування робіт;
- управління фінансовими потоками;
- контроль виконання проєктних завдань;
- аналіз ефективності діяльності.

Інтеграція зазначених функцій дозволяє розглядати будівельний проєкт як єдину систему, що функціонує на основі узгоджених даних. [91; 96; 104; 112]

У межах даного дослідження особливу увагу приділено ролі ERP-систем у підтримці прийняття управлінських рішень в умовах динамічних змін. На відміну від традиційних підходів, де рішення приймаються на основі статичних планових показників, ERP-системи дозволяють враховувати поточний стан системи та прогнозувати наслідки можливих змін. [91; 96; 111; 112]

Функціональні можливості ERP-систем у цьому контексті включають:

- моніторинг стану будівельного процесу в реальному часі, що забезпечує своєчасне виявлення відхилень;

- аналіз факторів динамічних змін, що дозволяє визначити причини виникнення відхилень;
- моделювання альтернативних сценаріїв, що створює можливість вибору оптимального варіанту організації робіт;
- підтримку прийняття управлінських рішень, що базується на використанні аналітичних інструментів.

Таким чином, ERP-системи створюють основу для переходу від реактивного до проактивного управління будівельним виробництвом. [111; 112]

Разом із тим, аналіз практики впровадження ERP у будівництві показує, що їх потенціал використовується не в повній мірі. У більшості випадків ERP-системи застосовуються переважно для обліку ресурсів та фінансового контролю, тоді як їх можливості щодо підтримки прийняття організаційно-технологічних рішень залишаються недостатньо реалізованими.

Це обумовлено відсутністю методологічного підходу до інтеграції ERP-систем у процес формування організаційно-технологічних моделей. У результаті ERP виступає як допоміжний інструмент, а не як ключовий елемент системи управління. [89; 91; 109; 111]

У межах даного дослідження пропонується розглядати ERP-систему як центральний елемент адаптивної цифрової моделі організації будівництва, що забезпечує:

- інтеграцію даних про всі компоненти організаційно-технологічної системи;
- формування альтернативних варіантів організації будівельного процесу;
- оцінювання ефективності різних сценаріїв;
- підтримку прийняття управлінських рішень у реальному часі.

Такий підхід дозволяє трансформувати ERP-систему з інструменту обліку у інструмент управління, що забезпечує адаптивність виробничої системи.

Особливе значення має інтеграція ERP із іншими цифровими технологіями, зокрема BIM та CDE, що дозволяє забезпечити повний цикл управління будівельним проєктом — від проєктування до реалізації. [91; 96; 104; 111]

Таким чином, інформаційне забезпечення управління будівництвом на основі ERP-систем є ключовим елементом формування адаптивної цифрової моделі організації будівельного виробництва.

Отже, використання ERP-систем створює передумови для підвищення ефективності управлінських рішень, забезпечує інтеграцію інформаційних потоків та дозволяє реалізувати принципи адаптивного управління в умовах динамічних змін. Це є важливою складовою перевірки наукової гіпотези дослідження та основою для розроблення відповідної моделі, що розглядається у наступному підрозділі. [91; 96; 111]

З метою системного відображення ролі ERP-систем у процесі інформаційного забезпечення управління будівельним виробництвом доцільно представити відповідну модель у вигляді інтегрованої схеми. Такий підхід дозволяє візуалізувати місце ERP-системи в структурі управління, визначити її функціональні зв'язки з основними компонентами організаційно-технологічних рішень та обґрунтувати її значення як інструменту підтримки прийняття управлінських рішень. [104; 111]

У межах даного дослідження ERP-система розглядається як центральний елемент цифрового середовища, що забезпечує інтеграцію даних про ресурси, процеси, часові параметри та організаційні умови реалізації будівельного проєкту.

З урахуванням викладеного, на рисунку 2.3 представлено модель інформаційного забезпечення управління будівництвом на основі ERP-системи.

Зображена на рисунку 2.3 схема відображає ERP-систему як інтеграційне ядро управління будівельним виробництвом, що забезпечує об'єднання інформаційних потоків та підтримку прийняття управлінських рішень.

У структурі моделі ERP-система займає центральне місце та взаємодіє з основними компонентами організаційно-технологічних рішень. З одного боку, до неї надходять дані про структуру виконання робіт, ресурсне забезпечення,

календарні параметри та організаційні умови реалізації проекту. З іншого боку, ERP-система забезпечує обробку цієї інформації та формування управлінських рішень.



Рисунок 2.3 Модель інформаційного забезпечення управління будівельним виробництвом на основі ERP-системи

Функціональна роль ERP-системи полягає у забезпеченні таких процесів:

- збору та інтеграції даних із різних джерел;
- аналізу поточного стану будівельного процесу;
- виявлення відхилень від планових показників;
- моделювання альтернативних сценаріїв організації робіт;
- формування обґрунтованих управлінських рішень.

Особливістю представленої моделі є її орієнтація на підтримку адаптивного управління. Це означає, що ERP-система не лише фіксує поточний стан системи,

але й забезпечує можливість її оперативної перебудови у відповідь на вплив факторів динамічних змін.

У схемі також відображено зворотний зв'язок між управлінськими рішеннями та фактичним станом будівельного процесу, що забезпечує безперервність управління та підвищує його ефективність. [91; 104; 111]

Таким чином, ERP-система виступає як ключовий елемент цифрового середовища будівництва, що забезпечує інтеграцію інформації, підтримку прийняття управлінських рішень та реалізацію принципів адаптивного управління.

Отже, представлена модель підтверджує, що використання ERP-систем дозволяє підвищити ефективність організації будівельного виробництва за рахунок переходу до інтегрованого та проактивного управління, що є важливою складовою реалізації адаптивної цифрової моделі.

2.6 Критерії ефективності та адаптивності організаційно-технологічних систем

У сучасних умовах реалізації будівельних проєктів, що характеризуються високим рівнем динамічності та невизначеності, особливого значення набуває обґрунтування критеріїв оцінювання ефективності організаційно-технологічних систем. Як було встановлено у попередніх підрозділах, традиційні підходи до оцінювання базуються переважно на фіксованих показниках, таких як строки виконання робіт, вартість та якість. Однак у змінному середовищі цього недостатньо, оскільки система повинна не лише досягати запланованих показників, але й зберігати ефективність у процесі змін. [17; 52; 87]

У зв'язку з цим виникає необхідність розширення системи критеріїв оцінювання за рахунок включення показників адаптивності, які відображають здатність системи реагувати на вплив факторів динамічних змін. [17; 87]

У межах даного дослідження ефективність організаційно-технологічної системи розглядається як інтегральна характеристика, що визначається здатністю забезпечувати досягнення цільових параметрів будівельного проєкту при заданих

обмеженнях. Водночас адаптивність розглядається як здатність системи змінювати свою структуру та параметри без суттєвого зниження ефективності. [17; 31; 61]

З урахуванням викладеного доцільно виділити дві взаємопов'язані групи критеріїв: критерії ефективності та критерії адаптивності.

Критерії ефективності відображають результативність функціонування організаційно-технологічної системи та включають:

- часову ефективність, що характеризується дотриманням календарних строків виконання робіт;
- ресурсну ефективність, яка визначає рівень раціонального використання трудових, матеріальних та технічних ресурсів;
- економічну ефективність, що відображає співвідношення фактичних витрат до запланованих;
- якісну ефективність, що характеризує відповідність результатів виконання робіт встановленим вимогам;
- організаційну ефективність, що визначає рівень узгодженості та координації між учасниками проєкту.

Зазначені критерії традиційно використовуються для оцінювання результатів реалізації будівельних проєктів, однак вони не враховують вплив змін середовища на функціонування системи. [91; 96; 104]

Критерії адаптивності відображають здатність організаційно-технологічної системи функціонувати в умовах динамічних змін та включають:

- гнучкість системи, що визначає можливість зміни структури виконання робіт;
- оперативність реагування, яка характеризує швидкість прийняття та реалізації управлінських рішень;
- стійкість до змін, що відображає здатність системи зберігати ефективність при зміні умов;

- варіантність рішень, що визначає наявність альтернативних сценаріїв організації будівельного процесу;

- інформаційну забезпеченість, що характеризує повноту та актуальність даних, необхідних для прийняття рішень.

Включення зазначених критеріїв дозволяє перейти від оцінювання результатів до оцінювання здатності системи функціонувати в умовах невизначеності. [91; 104]

З метою комплексного оцінювання доцільно використовувати інтегральний підхід, який передбачає врахування як показників ефективності, так і показників адаптивності.

У загальному вигляді інтегральний показник може бути представлений як функція:

$$E = f(T, R, C, Q, O, A) \quad (2.1)$$

де:

- T— часові параметри;
- R— ресурсні показники;
- C— економічні витрати;
- Q— якість виконання робіт;
- O— організаційні характеристики;
- A— адаптивність системи.

Такий підхід дозволяє оцінювати ефективність не лише за результатами, але й за здатністю системи до адаптації. [91; 96; 111]

Забезпечення досягнення зазначених критеріїв можливе лише за умови використання сучасних інформаційних інструментів. ERP-системи відіграють ключову роль у цьому процесі, оскільки дозволяють:

- забезпечити інтеграцію даних про всі компоненти системи;

- здійснювати моніторинг показників у реальному часі;
- оцінювати вплив змін на ефективність;
- підтримувати прийняття управлінських рішень.

Таким чином, ERP-системи виступають як інструмент забезпечення як ефективності, так і адаптивності організаційно-технологічних систем.

Отже, у результаті проведеного дослідження обґрунтовано систему критеріїв оцінювання організаційно-технологічних систем, яка включає показники ефективності та адаптивності. Запропонований підхід дозволяє здійснювати комплексне оцінювання функціонування будівельного виробництва в умовах динамічних змін. [52; 87; 91]

Встановлено, що традиційні критерії ефективності повинні бути доповнені показниками адаптивності, що відображають здатність системи реагувати на зміну умов реалізації проєкту. Це створює методологічну основу для оцінювання ефективності адаптивної цифрової моделі організації будівництва, що розробляється у подальших розділах дисертації. [91; 104; 111]

Результати проведеного у попередніх підрозділах дослідження дозволяють встановити наявність системної науково-прикладної проблеми, що полягає у невідповідності між сучасними умовами функціонування будівельного виробництва та існуючими підходами до його організації.

Як було встановлено, будівельні проєкти реалізуються в умовах високої динамічності, що проявляється у змінності ресурсного забезпечення, відхиленнях календарних параметрів, необхідності коригування технологічних рішень та складності організаційної взаємодії учасників. У той же час традиційні організаційно-технологічні моделі базуються на детермінованих підходах і не передбачають можливості оперативної адаптації до змін. [89; 91; 109; 111]

У результаті виникає ключова суперечність: між потребою забезпечення гнучкості та адаптивності будівельного виробництва та відсутністю ефективних інструментів формування та реалізації адаптивних організаційно-технологічних рішень.

Ця суперечність обумовлює необхідність розроблення нового підходу до організації будівельного виробництва, який забезпечує можливість врахування факторів динамічних змін у процесі прийняття управлінських рішень.

Аналіз наукових досліджень і практики будівництва показує, що одним із перспективних напрямів вирішення зазначеної проблеми є використання цифрових технологій, зокрема ERP-систем, які забезпечують інтеграцію інформаційних потоків та створюють основу для формування адаптивних моделей управління.

Разом із тим існуючі підходи до використання ERP у будівництві переважно орієнтовані на облік і контроль ресурсів, а не на підтримку прийняття адаптивних організаційно-технологічних рішень. Це свідчить про недостатній рівень наукового опрацювання питання інтеграції ERP-технологій у процес формування організаційно-технологічних моделей. [89; 109; 111]

У зв'язку з цим у межах даного дослідження висувається припущення, що підвищення ефективності організації будівельного виробництва можливе за рахунок переходу від статичних моделей до адаптивних цифрових моделей, що базуються на інтеграції факторів динамічних змін у процес прийняття управлінських рішень. [109; 111]

Виходячи з цього, формулюється наукова гіпотеза дослідження, яка має такий зміст: Ефективність організації будівельного виробництва в умовах динамічних змін може бути суттєво підвищена за умови формування та використання адаптивної цифрової моделі організаційно-технологічних рішень, що базується на:

- інтеграції факторів динамічних змін у процес управління;
- використанні ERP-систем як інструменту підтримки прийняття управлінських рішень;
- забезпеченні варіантності організаційно-технологічних рішень;
- можливості оперативної перебудови структури виробничого процесу.

Сформульована гіпотеза передбачає, що використання адаптивної цифрової моделі дозволяє перейти від реактивного до проактивного управління будівельним виробництвом, що забезпечує:

- зменшення негативного впливу факторів динамічних змін;
- підвищення ефективності використання ресурсів;
- скорочення термінів реалізації проєктів;
- підвищення стійкості виробничої системи.

Для перевірки висунутої гіпотези необхідно вирішити такі основні завдання:

- розробити модель адаптивної цифрової підтримки організаційно-технологічних рішень;
- визначити механізми інтеграції факторів динамічних змін у процес управління;
- обґрунтувати використання ERP-систем як інструменту підтримки прийняття рішень;
- провести оцінювання ефективності запропонованого підходу.

Таким чином, сформульована наукова гіпотеза визначає напрям подальшого дослідження та слугує основою для розроблення адаптивної цифрової моделі організації будівництва, що розглядається у наступних розділах дисертації.

На основі проведеного аналізу теоретичних положень, факторів динамічних змін та умов прийняття управлінських рішень сформовано концептуальне уявлення про методологію побудови адаптивної цифрової моделі організації будівельного виробництва. [91; 96; 104]

Запропонований підхід базується на інтеграції загальнонаукових і спеціальних методів дослідження, що дозволяє забезпечити системний аналіз факторів впливу, формування варіантних управлінських рішень та їх реалізацію у цифровому середовищі. При цьому центральне місце займає використання ERP-систем як інструменту інтеграції даних та підтримки прийняття рішень.

Узагальнення зазначених положень дозволило сформулювати наукову гіпотезу дослідження, яка графічно інтерпретована на рисунку 2.4.

Методична основа дослідження (рисунок 2.4.) спирається на наукову гіпотезу роботи щодо побудови адаптивної цифрової моделі організації будівельного виробництва.

У верхній частині схеми представлено загальнонаукові та спеціальні методи дослідження, які формують інструментарій аналізу та моделювання. До загальнонаукових методів віднесено системний аналіз, структурне моделювання, аналіз ризиків та кореляційний аналіз, що забезпечують теоретичне обґрунтування дослідження. Спеціальні методи включають оцінювання факторів динамічних змін, сценарний аналіз, варіантне управління та інтеграцію ERP-систем, що дозволяє враховувати специфіку будівельного виробництва. [96; 104]

Центральним елементом схеми є процес формування наукової методології та інструментарію дослідження, який забезпечує перехід від аналізу факторів до побудови прикладного наукового рішення.



Рисунок 2.4 Методологічна схема формування адаптивної цифрової моделі організації будівельного виробництва (графічна інтерпретація наукової гіпотези)

У нижній частині схеми відображено процес формування наукового продукту, що включає:

- методику інтеграції ERP-систем в адаптивні моделі управління;
- модель цифрової підтримки організаційно-технологічних рішень;
- систему критеріїв оцінювання ефективності адаптивної моделі.

Завершальним елементом є науковий продукт дослідження, який виступає результатом реалізації запропонованої методології та підтверджує висунуту наукову гіпотезу.

Таким чином, представлена схема ілюструє, що підвищення ефективності організації будівельного виробництва можливе за рахунок використання адаптивної цифрової моделі, яка базується на інтеграції методологічного апарату дослідження, аналізі факторів динамічних змін та застосуванні ERP-технологій як інструменту підтримки прийняття управлінських рішень.

Висновки до розділу 2

У результаті проведеного дослідження у розділі 2 отримано такі основні наукові результати:

1. Визначено структуру організаційно-технологічних рішень у будівництві, яка представлена як інтегрована система взаємопов'язаних компонентів: структури виконання робіт, ресурсного забезпечення, календарно-часових параметрів та організаційних умов реалізації проєкту. Доведено, що ефективність функціонування системи визначається рівнем узгодженості зазначених елементів.

2. Здійснено класифікацію факторів динамічних змін, які впливають на реалізацію будівельних проєктів, та обґрунтовано їх поділ на ресурсні, часові, технологічні та організаційні, а також внутрішні та зовнішні. Встановлено їх

взаємозалежний характер та здатність формувати комплексний вплив на організаційно-технологічну систему.

3. Досліджено вплив факторів динамічних змін на ефективність організації будівництва, в результаті чого встановлено, що вони безпосередньо визначають параметри функціонування системи та ускладнюють процес прийняття управлінських рішень. Обґрунтовано необхідність переходу від реактивного до проактивного управління.

4. Виявлено основні проблеми традиційних підходів до організації будівництва, зокрема їх детермінований характер, реактивність, фрагментованість інформації, відсутність варіантного аналізу, низьку адаптивність та обмежену підтримку прийняття управлінських рішень. Доведено, що зазначені обмеження знижують ефективність реалізації будівельних проєктів.

5. Обґрунтовано доцільність використання ERP-систем як інструменту інформаційного забезпечення управління, які забезпечують інтеграцію інформаційних потоків, моніторинг стану будівельного процесу, аналіз факторів змін та підтримку прийняття управлінських рішень у реальному часі. Визначено їх роль як центрального елемента цифрового середовища управління будівництвом.

6. Сформовано систему критеріїв оцінювання ефективності організаційно-технологічних систем, яка включає як традиційні показники (часові, ресурсні, економічні, якісні), так і критерії адаптивності (гнучкість, оперативність, стійкість, варіантність, інформаційна забезпеченість). Доведено необхідність їх комплексного використання в умовах динамічних змін.

7. Сформовано методологічну основу дослідження та обґрунтовано наукову гіпотезу, відповідно до якої підвищення ефективності організації будівельного виробництва можливе за рахунок використання адаптивної цифрової моделі управління, що базується на інтеграції факторів динамічних змін та застосуванні ERP-систем.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБЛЕННЯ МОДЕЛІ ЦИФРОВОЇ ПІДТРИМКИ УПРАВЛІНСЬКИХ РІШЕНЬ НА ОСНОВІ ERP

У попередніх розділах дисертаційного дослідження було встановлено, що сучасні умови реалізації будівельних проєктів характеризуються високим рівнем динамічності, невизначеності та складності взаємодії учасників. Проведений аналіз показав, що традиційні підходи до організації будівельного виробництва не забезпечують належного рівня ефективності управління, що обумовлено їх детермінованістю, реактивним характером та відсутністю інтегрованого інформаційного середовища. [52; 87; 91]

У розділі 2 було обґрунтовано, що одним із ключових напрямів підвищення ефективності організації будівництва є використання адаптивних цифрових моделей, які забезпечують інтеграцію факторів динамічних змін у процес прийняття управлінських рішень. Також доведено, що ERP-системи можуть виступати як центральний елемент такого підходу, забезпечуючи інтеграцію інформаційних потоків та підтримку управління у реальному часі.

Виходячи з цього, у даному розділі розробляється модель цифрової підтримки управлінських рішень на основі ERP, яка спрямована на підвищення ефективності організації будівельного виробництва за рахунок забезпечення адаптивності системи до умов динамічних змін.

Розроблення моделі базується на таких методологічних положеннях:

- системному підході до організації будівельного виробництва;
- інтеграції інформаційних потоків у межах єдиного цифрового середовища;
- врахуванні факторів динамічних змін у процесі управління;
- використанні ERP-систем як інструменту підтримки прийняття рішень;
- забезпеченні варіантності та адаптивності організаційно-технологічних рішень.

Особливістю запропонованої моделі є її орієнтація на інтеграцію трьох ключових компонентів цифрового середовища будівництва — BIM, ERP та CDE, що дозволяє забезпечити узгодженість інформації, синхронізацію процесів та підвищення ефективності управління.

У межах розділу розробляється:

- система принципів формування цифрової моделі організації будівництва;
- концепція інтегрованого цифрового середовища BIM–ERP–CDE;
- модель взаємодії робіт, ресурсів, часу та умов реалізації проєкту;
- механізм підтримки управлінських рішень в ERP-системах;
- модель адаптивного перебудування організаційно-технологічних процесів;
- система показників ефективності та адаптивності;
- алгоритм реалізації моделі цифрової підтримки управління.

Запропонована модель є науковим результатом дисертаційного дослідження та спрямована на практичне застосування в умовах цифрової трансформації будівельної галузі. Її використання дозволяє забезпечити перехід від традиційних підходів до організації будівництва до адаптивного управління, що базується на інтеграції даних, аналізі факторів змін та підтримці прийняття рішень у реальному часі. [52; 91]

Таким чином, розділ 3 присвячений розробленню та обґрунтуванню моделі цифрової підтримки управлінських рішень, яка виступає інструментом реалізації наукової гіпотези дослідження та створює основу для її подальшої перевірки.

3.1 Принципи формування цифрової моделі організації будівництва

Формування цифрової моделі організації будівництва є ключовим етапом переходу від традиційних підходів управління до адаптивних цифрових систем, що забезпечують ефективне функціонування будівельного виробництва в умовах динамічних змін. Як було встановлено у попередніх розділах, сучасні будівельні

проекти реалізуються в умовах невизначеності, що вимагає врахування множини факторів впливу та забезпечення гнучкості організаційно-технологічних рішень.

У зв'язку з цим формування цифрової моделі повинно базуватися на системі принципів, що визначають логіку її побудови, функціонування та застосування у процесі управління будівельним виробництвом. [52; 87; 91]

У межах даного дослідження під цифровою моделлю організації будівництва розуміється інтегрована інформаційно-аналітична система, яка відображає взаємодію робіт, ресурсів, часу та організаційних умов реалізації проекту та забезпечує підтримку прийняття управлінських рішень на основі актуальних даних.

Формування такої моделі ґрунтується на наступних принципах. [17; 31; 61]

1. Принцип системності

Цифрова модель повинна розглядатися як цілісна система, що включає взаємопов'язані елементи організаційно-технологічної структури. Це означає, що всі компоненти — роботи, ресурси, календарні параметри та організаційні умови — повинні бути інтегровані в єдину модель із урахуванням їх взаємозв'язків.

Реалізація цього принципу дозволяє уникнути фрагментованості управління та забезпечує комплексне бачення будівельного процесу. [17; 31]

2. Принцип інтеграції даних

Однією з ключових умов ефективності цифрової моделі є забезпечення інтеграції інформаційних потоків у межах єдиного цифрового середовища. Це передбачає об'єднання даних із різних джерел, зокрема BIM-моделей, ERP-систем та CDE-платформ.

Інтеграція даних забезпечує їх узгодженість, актуальність та доступність для всіх учасників проекту, що є необхідною умовою прийняття обґрунтованих управлінських рішень. [89; 91; 104; 111]

3. Принцип адаптивності

Цифрова модель повинна забезпечувати можливість зміни своєї структури та параметрів у відповідь на вплив факторів динамічних змін. Це передбачає здатність системи до перебудови організаційно-технологічних рішень без суттєвого зниження ефективності. [91; 104; 111]

Реалізація цього принципу дозволяє забезпечити стійкість будівельного виробництва в умовах невизначеності.

4. Принцип варіантності

Модель повинна передбачати можливість формування та оцінювання альтернативних варіантів організації будівельного процесу. Це дозволяє здійснювати вибір оптимального рішення з урахуванням заданих критеріїв ефективності. [52; 87; 91]

Варіантність є основою проактивного управління та забезпечує підвищення обґрунтованості прийняття рішень.

5. Принцип актуальності інформації

Ефективність цифрової моделі визначається якістю інформації, на основі якої приймаються управлінські рішення. Тому модель повинна забезпечувати використання актуальних даних про стан будівельного процесу.

Це передбачає організацію безперервного збору та оновлення інформації, що реалізується за допомогою ERP-систем та цифрових платформ. [52; 91; 96]

6. Принцип інтеграції управлінських функцій

Цифрова модель повинна об'єднувати функції планування, організації, контролю та аналізу в єдиному інформаційному середовищі. Це дозволяє забезпечити узгодженість управлінських дій та підвищити ефективність управління. [91; 104; 111]

Реалізація цього принципу забезпечує перехід від розрізненого управління до інтегрованої системи управління будівельним виробництвом.

7. Принцип підтримки прийняття рішень

Однією з основних функцій цифрової моделі є забезпечення підтримки прийняття управлінських рішень. Це передбачає використання аналітичних інструментів, що дозволяють оцінювати стан системи, прогнозувати наслідки змін та формувати рекомендації щодо оптимізації організаційно-технологічних рішень. [91; 96; 104]

8. Принцип масштабованості

Цифрова модель повинна бути здатною до застосування на різних рівнях управління — від окремого будівельного об'єкта до портфеля проєктів. Це забезпечує можливість її використання в різних умовах та для різних типів проєктів. [91; 96; 112]

9. Принцип сумісності з цифровими технологіями

Модель повинна бути сумісною з сучасними цифровими технологіями, зокрема BIM, ERP та CDE. Це забезпечує можливість її інтеграції в існуюче цифрове середовище та підвищує ефективність її використання. [89; 91; 104; 111]

Запропонована система принципів формування цифрової моделі організації будівництва відображає необхідність переходу до інтегрованого, адаптивного та інформаційно забезпеченого управління будівельним виробництвом.

На відміну від традиційних підходів, що базуються на статичних моделях, запропонована модель орієнтована на врахування динамічних змін та забезпечення гнучкості управлінських рішень. [91; 104]

Таким чином, сформульовані принципи є методологічною основою розроблення цифрової моделі організації будівництва та визначають логіку її подальшої побудови.

Запропонований підхід дозволяє забезпечити інтеграцію даних, адаптивність системи та підтримку прийняття управлінських рішень, що відповідає сучасним вимогам цифрової трансформації будівельної галузі.

Отже, визначені принципи створюють основу для розроблення концепції інтегрованого цифрового середовища, що розглядається у наступному підрозділі.

Сформульовані принципи формування цифрової моделі організації будівництва відображають необхідність переходу від фрагментованих та детермінованих підходів до інтегрованого управління, що базується на використанні сучасних інформаційних технологій та врахуванні факторів динамічних змін. На відміну від традиційних моделей, запропонований підхід орієнтований на забезпечення адаптивності організаційно-технологічних рішень,

що дозволяє підвищити ефективність функціонування будівельного виробництва в умовах невизначеності. [52; 87]

Важливою особливістю розробленого підходу є те, що принципи формування цифрової моделі розглядаються як взаємопов'язана методологічна система, яка визначає логіку побудови, функціонування та розвитку моделі. Це забезпечує цілісність підходу до організації будівництва та створює основу для інтеграції різних компонентів цифрового середовища. [89; 91; 104; 111]

У межах проведеного дослідження обґрунтовано, що ефективна цифрова модель повинна базуватися не лише на інтеграції даних, але й на використанні науково обґрунтованого інструментарію, який забезпечує формалізацію організаційно-технологічних процесів, аналіз впливу факторів динамічних змін та підтримку прийняття управлінських рішень. Запропонований інструментарій дозволяє здійснювати перехід від описових моделей до формалізованих систем, що можуть бути реалізовані у цифровому середовищі. [89; 91; 111]

Науковий результат підрозділу полягає у формуванні методологічної основи побудови цифрової моделі організації будівництва, яка відрізняється від існуючих підходів інтеграцією організаційно-технологічних, інформаційних та управлінських аспектів у єдину систему. Такий підхід забезпечує можливість комплексного аналізу стану будівельного процесу, формування варіантних рішень та їх адаптації до умов реалізації проекту. [17; 52; 91]

Особливе значення має визначення місця розробленої моделі у структурі сучасних цифрових технологій будівництва. Запропонований підхід доповнює існуючі системи інформаційного моделювання та управління, зокрема BIM, ERP та CDE, шляхом формування організаційно-управлінського рівня, який забезпечує інтеграцію даних, підтримку прийняття рішень та адаптивне управління будівельним виробництвом. [17; 91]

Таким чином, сформовані принципи та науковий інструментарій створюють основу для подальшої розробки концепції інтегрованого цифрового середовища будівництва, яке забезпечує взаємодію різних інформаційних систем та підтримку управлінських рішень. Саме ця концепція розглядається у наступному підрозділі,

де обґрунтовується інтеграція BIM, ERP та CDE як єдиного цифрового середовища організації будівництва.

У процесі формування цифрової моделі організації будівництва ключового значення набуває не лише визначення системи принципів, але й їх формалізація через відповідний науковий інструментарій. Це обумовлено необхідністю переходу від концептуального рівня дослідження до прикладного рівня реалізації моделі у цифровому середовищі.

Як показав проведений аналіз, ефективність цифрової моделі визначається узгодженістю між принципами її побудови, методами їх реалізації та очікуваними результатами функціонування системи. Відсутність такого узгодження призводить до розриву між теоретичними положеннями та практичним застосуванням цифрових технологій у будівництві.

У зв'язку з цим доцільно здійснити систематизацію принципів формування цифрової моделі організації будівництва з визначенням відповідного наукового інструментарію та результатів їх реалізації.

Узагальнену характеристику взаємозв'язку принципів, методів та результатів наведено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Принципи формування цифрової моделі організації будівництва та відповідний науковий інструментарій

№	Принцип	Зміст принципу	Науковий інструментарій	Результат реалізації
1	Системність	Розгляд моделі як цілісної структури взаємопов'язаних елементів	Системний аналіз, структурне моделювання	Інтегрована модель будівельного процесу
2	Інтеграція даних	Об'єднання інформаційних потоків у єдиному середовищі	BIM–ERP–CDE інтеграція	Узгодженість та актуальність даних
3	Адаптивність	Здатність моделі змінювати параметри при зміні умов	Метод адаптивного моделювання	Стійкість до динамічних змін

№	Принцип	Зміст принципу	Науковий інструментарій	Результат реалізації
4	Варіантність	Формування альтернативних сценаріїв	Сценарний аналіз, варіантне моделювання	Оптимізація рішень
5	Актуальність інформації	Використання даних у реальному часі	ERP-аналітика, моніторинг	Оперативність управління
6	Інтеграція управління	Об'єднання функцій планування, контролю, аналізу	Процесне моделювання	Узгоджене управління
7	Підтримка рішень	Формування обґрунтованих рішень	DSS, ERP-аналітика	Зниження ризиків
8	Масштабованість	Застосування на різних рівнях	Ієрархічні моделі	Гнучкість використання
9	Цифрова сумісність	Інтеграція з цифровими платформами	API, цифрові платформи	Єдине цифрове середовище

Аналіз даних, наведених у таблиці 3.1, дозволяє зробити висновок про те, що формування цифрової моделі організації будівництва базується на комплексній взаємодії принципів та відповідних наукових методів їх реалізації. Встановлено, що кожен із принципів не є ізольованим елементом, а функціонує у взаємозв'язку з іншими, формуючи цілісну методологічну систему. [52; 91]

Особливістю запропонованого підходу є те, що реалізація принципів здійснюється через конкретний інструментарій, який забезпечує їх практичне впровадження у цифровому середовищі. Так, принцип системності реалізується через методи структурного моделювання, принцип адаптивності — через методи адаптивного моделювання та перебудови процесів, а принцип варіантності — через сценарний аналіз та формування альтернативних рішень.

Важливим результатом проведеної систематизації є встановлення прямого зв'язку між застосуванням наукового інструментарію та досягненням конкретних результатів функціонування системи, зокрема підвищенням узгодженості даних, оперативності управління, гнучкості організаційно-технологічних рішень та ефективності використання ресурсів. [17; 91]

Таким чином, запропонована структура принципів та методів формування цифрової моделі організації будівництва дозволяє забезпечити перехід від традиційних підходів до інтегрованого цифрового управління, що базується на використанні сучасних інформаційних технологій та врахуванні факторів динамічних змін.

Отримані результати створюють методологічну основу для подальшої розробки концепції інтегрованого цифрового середовища будівництва, що передбачає поєднання BIM, ERP та CDE як єдиної системи підтримки управлінських рішень, що розглядається у наступному підрозділі.

3.2 Концепція інтегрованого цифрового середовища (BIM–ERP–CDE)

У сучасних умовах цифрової трансформації будівельної галузі ефективність організації будівельного виробництва дедалі більше визначається рівнем інтеграції інформаційних потоків та узгодженістю даних між учасниками проєкту. Як було встановлено у попередніх підрозділах, ключовими обмеженнями традиційних підходів є фрагментованість інформації, відсутність єдиного середовища управління та недостатня підтримка прийняття управлінських рішень. [87; 91; 104]

У зв'язку з цим виникає необхідність формування інтегрованого цифрового середовища, яке забезпечує об'єднання різних рівнів інформації та функцій управління в межах єдиної системи. У межах даного дослідження таке середовище розглядається як поєднання трьох ключових компонентів: інформаційного моделювання (BIM), управління ресурсами (ERP) та середовища спільних даних (CDE). [87; 104]

Запропонована концепція інтегрованого цифрового середовища базується на ідеї розподілу функцій між зазначеними компонентами з одночасним забезпеченням їх взаємодії в межах єдиної інформаційної системи.

Інформаційне моделювання (BIM) виступає як джерело геометричної, технологічної та проєктної інформації, що відображає об'єкт будівництва. BIM-модель містить дані про конструктивні елементи, обсяги робіт, технологічні залежності та параметри виконання процесів. Вона забезпечує формування базової

інформаційної моделі об'єкта, яка використовується на всіх етапах життєвого циклу проєкту. [89; 91; 104; 111]

ERP-система виконує функцію управління ресурсами, процесами та фінансовими потоками. У контексті даного дослідження ERP розглядається не лише як система обліку, а як інструмент підтримки прийняття управлінських рішень, що забезпечує аналіз даних, моделювання сценаріїв та вибір оптимальних організаційно-технологічних рішень. [104; 111]

Середовище спільних даних (CDE) забезпечує організацію інформаційної взаємодії між учасниками проєкту. Воно виступає як платформа для зберігання, обміну та актуалізації даних, що дозволяє забезпечити їх доступність та узгодженість. [89; 109]

У запропонованій концепції кожен із компонентів виконує свою функцію, однак їх ефективність досягається лише за умови інтеграції. Взаємодія між BIM, ERP та CDE забезпечує формування єдиного цифрового середовища, у якому здійснюється управління будівельним виробництвом.

Особливістю запропонованого підходу є те, що ERP-система займає центральне місце в інтегрованому середовищі як елемент, що забезпечує трансформацію даних у управлінські рішення. BIM та CDE виступають як джерела та канали передачі інформації, тоді як ERP забезпечує її обробку, аналіз та використання у процесі управління. [91; 96; 104; 112]

Взаємодія зазначених компонентів реалізується через обмін даними, що включає:

- передачу інформації про обсяги робіт і технологічні параметри з BIM у ERP;
- використання даних ERP для коригування планів і ресурсного забезпечення;
- забезпечення актуалізації інформації через CDE;
- зворотний зв'язок від фактичного виконання робіт до цифрової моделі.

Це дозволяє сформувати замкнений цикл управління, у якому інформація постійно оновлюється, аналізується та використовується для прийняття рішень.

Наукова новизна запропонованої концепції полягає у формуванні інтегрованого цифрового середовища не як сукупності окремих інформаційних систем, а як єдиної організаційно-управлінської платформи, що забезпечує підтримку прийняття управлінських рішень на основі інтеграції даних. [91; 112]

На відміну від існуючих підходів, де BIM, ERP та CDE використовуються ізольовано або частково інтегруються, у даному дослідженні запропоновано їх системну інтеграцію з чітким розподілом функцій та визначенням ролі кожного компонента у процесі управління. [111; 118]

Запропонована концепція дозволяє:

- забезпечити узгодженість інформації між усіма учасниками проєкту;
- підвищити оперативність прийняття управлінських рішень;
- забезпечити можливість адаптивного перебудування організаційно-технологічних процесів;
- підвищити ефективність використання ресурсів;
- знизити ризики реалізації будівельних проєктів.

Таким чином, інтеграція BIM, ERP та CDE створює основу для формування адаптивної цифрової моделі організації будівництва, що забезпечує перехід до нового рівня управління, орієнтованого на використання даних та підтримку прийняття рішень.

Отже, запропонована концепція інтегрованого цифрового середовища виступає ключовим елементом реалізації наукової гіпотези дослідження та створює основу для розроблення моделі взаємодії робіт, ресурсів, часу та умов реалізації проєкту, що розглядається у наступному підрозділі.

З метою наочного відображення концепції інтегрованого цифрового середовища будівництва доцільно представити взаємодію основних компонентів системи у вигляді структурної схеми. Така схема дозволяє визначити функціональне призначення кожного елемента, а також встановити інформаційні зв'язки між ними. [89; 91; 104; 111]

Особливістю представленої моделі є наявність двосторонніх інформаційних потоків між компонентами, що забезпечує зворотний зв'язок між плануванням і фактичним виконанням робіт. Це дозволяє формувати замкнений цикл управління, у якому дані постійно оновлюються та використовуються для коригування організаційно-технологічних рішень. [89; 91; 111]

Таким чином, інтеграція BIM, ERP та CDE створює єдине цифрове середовище, що забезпечує підвищення ефективності управління будівельним виробництвом, узгодженість інформації та адаптивність системи до змін умов реалізації проєкту.

3.3 Модель взаємодії робіт, ресурсів, часу та умов реалізації проєкту

Організація будівельного виробництва в сучасних умовах характеризується високим рівнем складності, що обумовлено значною кількістю взаємопов'язаних процесів, обмеженістю ресурсів, часовими обмеженнями та впливом факторів динамічних змін. Як було обґрунтовано у попередніх підрозділах, ефективність управління будівельним проєктом визначається не окремими параметрами, а рівнем узгодженості взаємодії основних компонентів організаційно-технологічної системи. [89; 91; 104; 111]

У зв'язку з цим виникає необхідність формування моделі, яка дозволяє формалізувати взаємозв'язки між роботами, ресурсами, часом та умовами реалізації проєкту, а також враховувати їх змінність у процесі реалізації будівельного виробництва. [89; 91; 111]

Будівельний проєкт розглядається як складна динамічна система, що функціонує у часі та під впливом внутрішніх і зовнішніх факторів. У межах цієї системи виділяються чотири ключові компоненти:

- роботи, що формують структуру будівельного процесу;
- ресурси, що забезпечують виконання робіт;
- час, який визначає тривалість і послідовність виконання процесів;

- умови реалізації, що впливають на можливість виконання робіт та використання ресурсів.

Кожен із зазначених компонентів має власні характеристики, проте їх функціонування відбувається у взаємозалежності, що визначає необхідність їх спільного розгляду. [89; 109]

У межах даного дослідження модель взаємодії розглядається як формалізоване представлення організаційно-технологічної системи, у якому встановлюються залежності між її основними компонентами.

Роботи визначають логіку реалізації проєкту, формуючи послідовність виконання процесів та їх взаємозв'язки. Кожна робота характеризується обсягом, складністю, технологічними вимогами та необхідними ресурсами.

Ресурси виступають як обмежуючий фактор, що визначає можливість виконання робіт. До них належать трудові, матеріальні та технічні ресурси, які мають кількісні та якісні характеристики. Наявність або відсутність ресурсів безпосередньо впливає на строки виконання робіт та можливість реалізації проєкту в цілому. [91; 96; 104; 112]

Час є інтегруючим параметром, що забезпечує узгодженість виконання робіт. Він визначає тривалість процесів, їх послідовність та синхронізацію. Порушення часових параметрів призводить до змін у всій системі.

Умови реалізації включають організаційні, технологічні, економічні та зовнішні фактори, які впливають на параметри виконання робіт та використання ресурсів. Вони можуть змінюватися у процесі реалізації проєкту, що створює додаткову невизначеність.

Взаємодія між зазначеними компонентами має складний і багаторівневий характер. Зокрема, роботи визначають потребу у ресурсах і часі, тоді як ресурси обмежують можливість виконання робіт. Час, у свою чергу, визначає послідовність виконання робіт і впливає на ефективність використання ресурсів. [111; 118]

Умови реалізації виступають як зовнішній вплив, що змінює параметри всіх компонентів системи. Наприклад, зміна умов постачання матеріалів може

призвести до затримки виконання робіт, що, у свою чергу, викликає необхідність перерозподілу ресурсів і коригування календарних графіків.

Таким чином, система характеризується наявністю зворотних зв'язків, що формують її динамічний характер.

Для забезпечення можливості практичного використання модель повинна бути формалізована. У межах дослідження це досягається шляхом встановлення функціональних залежностей між компонентами системи.

Тривалість виконання робіт визначається не лише їх обсягом, але й доступністю ресурсів та умовами реалізації. Аналогічно, потреба у ресурсах залежить від структури робіт і часових обмежень.

Формалізація дозволяє перейти від описового представлення системи до аналітичного, що створює можливість використання моделі у цифрових системах управління. [89; 91; 104; 111]

Ключовою особливістю запропонованої моделі є врахування факторів динамічних змін, які можуть виникати на будь-якому етапі реалізації проєкту. Такі зміни призводять до відхилення параметрів системи від запланованих значень.

У результаті виникає необхідність адаптації моделі, що включає:

- зміну структури виконання робіт;
- коригування ресурсного забезпечення;
- перегляд календарних параметрів;
- зміну організаційних рішень.

Таким чином, модель повинна бути не статичною, а динамічною, що забезпечує її адаптацію до умов реалізації проєкту. [89; 104; 111]

Практична реалізація моделі здійснюється в межах інтегрованого цифрового середовища, де ERP-система виконує функцію обробки та аналізу даних.

BIM забезпечує інформацію про структуру об'єкта та обсяги робіт, CDE — обмін даними між учасниками, а ERP — аналіз і підтримку прийняття рішень. Така інтеграція дозволяє реалізувати модель у вигляді цифрового інструменту.

Запропонована модель може бути використана на різних етапах реалізації будівельного проєкту. На етапі планування вона дозволяє формувати оптимальну структуру виконання робіт та ресурсного забезпечення. У процесі реалізації — аналізувати відхилення та формувати рішення щодо їх усунення. [52; 87; 91]

Також модель може бути використана для оцінювання альтернативних сценаріїв організації будівельного процесу, що дозволяє підвищити обґрунтованість управлінських рішень.

Таким чином, розроблена модель взаємодії робіт, ресурсів, часу та умов реалізації проєкту є основою для формування адаптивної системи управління будівельним виробництвом. Її використання дозволяє забезпечити узгодженість компонентів системи, підвищити ефективність використання ресурсів та забезпечити адаптацію до умов динамічних змін.

Наукова новизна моделі полягає у комплексному врахуванні взаємодії основних компонентів організаційно-технологічної системи та можливості її реалізації у цифровому середовищі на основі ERP-систем.

Запропонований підхід створює основу для розроблення механізму підтримки прийняття управлінських рішень, що розглядається у наступному підрозділі. [33; 42; 91]

З метою формалізації взаємозв'язків між основними компонентами організаційно-технологічної системи доцільно представити модель взаємодії робіт, ресурсів, часу та умов реалізації проєкту у вигляді структурної схеми. Такий підхід дозволяє наочно відобразити характер взаємодії між елементами системи, а також визначити напрямки інформаційних і управлінських потоків.

Візуалізацію запропонованої моделі наведено на рисунок 3.2.

Зображена на рисунку 3.2 схема відображає організаційно-технологічну систему будівництва як інтегровану структуру, що включає чотири основні компоненти: роботи, ресурси, часові параметри та умови реалізації проєкту.



Рисунок 3.2 Модель взаємодії робіт, ресурсів, часу та умов реалізації будівельного проєкту

У центрі моделі знаходиться процес виконання робіт, який визначає логіку реалізації будівельного проєкту. Роботи пов'язані з ресурсами, що забезпечують їх виконання, та часовими параметрами, які визначають їх тривалість і послідовність.

Ресурси взаємодіють із роботами, обмежуючи або розширюючи можливості їх виконання. Часові параметри забезпечують синхронізацію процесів та визначають ефективність використання ресурсів. Умови реалізації виступають як зовнішній вплив, що змінює параметри всіх компонентів системи. [33; 42; 91]

Особливістю моделі є наявність зворотних зв'язків між усіма елементами, що забезпечує її динамічний характер. Це означає, що зміна одного з компонентів призводить до відповідних змін інших елементів системи.

Таким чином, модель відображає не лише структуру організаційно-технологічної системи, але й механізм її функціонування в умовах динамічних змін, що є основою для подальшої розробки механізмів підтримки прийняття управлінських рішень.

На рисунку 3.2 представлена розроблена системна модель організаційно-технологічної взаємодії, яка, на відміну від існуючих, враховує не лише взаємозв'язки між роботами, ресурсами і часом, але й вплив умов реалізації та механізм зворотного зв'язку через ERP-систему. [91; 104; 111]

Математичний опис моделі взаємодії. У межах даного дослідження організаційно-технологічна система будівництва розглядається як динамічна система, стан якої визначається взаємодією робіт, ресурсів, часу та умов реалізації проєкту. [91; 96; 104]

Стан системи у момент часу t описується вектором:

$$S(t) = \{W(t), R(t), T(t), C(t)\} \quad (3.1)$$

де:

- $W(t)$ — множина робіт;
- $R(t)$ — множина ресурсів;
- $T(t)$ — часові параметри;
- $C(t)$ — умови реалізації проєкту.

Функція ефективності системи. Ефективність організаційно-технологічної системи визначається як:

$$E(t) = F(W(t), R(t), T(t), C(t)) \quad (3.2)$$

де функція F відображає інтегральний вплив усіх компонентів системи.

Динаміка системи. З урахуванням змін середовища, система описується як:

$$\frac{dS(t)}{dt} = \Phi(S(t), U(t), F_d(t)) \quad (3.3)$$

де:

- $U(t)$ — управлінські рішення;
- $F_d(t)$ — фактори динамічних змін;
- Φ — функція переходу станів системи.

Модель управління (через ERP). Управління системою здійснюється через функцію:

$$U(t) = \Psi(S(t), E(t), D(t)) \quad (3.4)$$

де:

- $D(t)$ — дані з ERP-системи;
- Ψ — функція підтримки прийняття рішень.

Зворотний зв'язок:

$$S(t + 1) = S(t) + \Delta S(t) \quad (3.5)$$

$$\Delta S(t) = \Omega(U(t), F_d(t)) \quad (3.6)$$

це описує:

- адаптацію
- перебудову системи
- реакцію на зміни

У межах розробленої моделі організаційно-технологічна система будівництва розглядається як динамічна система, стан якої у момент часу t описується сукупністю взаємопов'язаних компонентів: робіт, ресурсів, часу та умов реалізації проекту. [91; 96; 111]

Ефективність функціонування системи визначається як інтегральна функція зазначених компонентів, що дозволяє оцінювати результативність організації будівельного виробництва з урахуванням їх взаємодії.

Особливістю запропонованої моделі є врахування динаміки системи, що описується зміною її стану у часі під впливом управлінських рішень та факторів динамічних змін. Це дозволяє розглядати організаційно-технологічну систему як керовану динамічну систему з зворотним зв'язком.

Управління системою здійснюється на основі даних, отриманих із ERP-системи, що забезпечує формування управлінських рішень з урахуванням поточного стану системи та прогнозування її розвитку. [96; 111]

Таким чином, запропонована математична модель дозволяє формалізувати процес організації будівельного виробництва та забезпечити його адаптацію до умов динамічних змін.

3.4 Механізм підтримки управлінських рішень в ERP-системах

Умови реалізації сучасних будівельних проєктів характеризуються високим рівнем невизначеності, динамічністю зовнішнього середовища та значною кількістю взаємопов'язаних факторів, що впливають на перебіг організаційно-технологічних процесів. У таких умовах традиційні підходи до прийняття управлінських рішень, які базуються на статичних планах і досвіді виконавців, не забезпечують належного рівня ефективності управління. [17; 52; 91]

Як було встановлено у попередніх підрозділах, ключовою проблемою є відсутність інтегрованого механізму, який би забезпечував перехід від аналізу стану системи до формування обґрунтованих управлінських рішень з урахуванням факторів динамічних змін. У зв'язку з цим виникає необхідність розроблення механізму підтримки прийняття управлінських рішень, який інтегрує цифрову модель організації будівництва, інформаційні потоки та аналітичні інструменти.

У межах даного дослідження механізм підтримки прийняття управлінських рішень розглядається як інтегрована функціональна система, що забезпечує перетворення інформації про стан організаційно-технологічної системи у оптимальні управлінські дії на основі використання ERP-систем.

Концептуальна структура механізму. Запропонований механізм має циклічний характер і функціонує у вигляді замкненого контуру управління, що включає послідовні етапи обробки інформації, аналізу, прийняття рішень та контролю результатів. [52; 87; 91]

На першому етапі здійснюється формування інформаційної бази, яка включає дані про структуру робіт, ресурсне забезпечення, календарні параметри та умови реалізації проєкту. Джерелами інформації виступають BIM-моделі, ERP-системи та середовище спільних даних (CDE), що забезпечують повноту та актуальність даних.

Другий етап передбачає аналітичну обробку отриманої інформації, що включає оцінювання поточного стану системи, порівняння планових і фактичних показників, а також виявлення відхилень. Особливістю цього етапу є врахування факторів динамічних змін, які можуть впливати на параметри системи.

На третьому етапі здійснюється формування альтернативних варіантів управлінських рішень. На відміну від традиційних підходів, де рішення приймається на основі єдиного сценарію, запропонований механізм передбачає формування множини варіантів, кожен з яких відображає можливий шлях адаптації системи до змін.

Четвертий етап включає оцінювання сформованих варіантів на основі системи критеріїв ефективності та адаптивності. Це дозволяє визначити оптимальний варіант рішення, який забезпечує досягнення цільових параметрів проєкту з урахуванням обмежень.

П'ятий етап передбачає реалізацію обраного рішення та його інтеграцію у систему управління будівельним виробництвом. На цьому етапі здійснюється коригування параметрів організаційно-технологічної системи.

Завершальним етапом є контроль результатів та формування зворотного зв'язку, який дозволяє оцінити ефективність прийнятого рішення та внести необхідні корективи.

Таким чином, механізм функціонує як замкнений цикл управління, що забезпечує безперервну адаптацію системи до умов реалізації проєкту.

Формалізація механізму прийняття рішень. З математичної точки зору процес прийняття управлінських рішень може бути представлений як задача оптимізації, у якій необхідно вибрати таке рішення, що забезпечує максимальну ефективність функціонування системи. [52; 87; 91; 96]

Нехай $S(t)$ — стан системи у момент часу t , а $U(t)$ — управлінське рішення. Тоді процес управління може бути описаний як:

$$U(t) = \Psi(S(t), F_d(t), D(t)) \quad (3.7)$$

де:

- $F_d(t)$ — фактори динамічних змін;
- $D(t)$ — інформація, отримана з ERP-системи;
- Ψ — функція підтримки прийняття рішень.

Оптимальне рішення визначається як:

$$U^*(t) = \arg \max_{U \in \mathcal{U}} E(S(t), U) \quad (3.8)$$

де E — функція ефективності системи.

Такий підхід дозволяє формалізувати процес прийняття рішень та забезпечити його реалізацію у цифровому середовищі.

Роль ERP-систем у реалізації механізму. ERP-система виступає як ключовий елемент реалізації механізму підтримки прийняття рішень. Вона забезпечує інтеграцію даних, їх обробку та формування аналітичної інформації, необхідної для прийняття рішень.

Функціональні можливості ERP-систем дозволяють:

- здійснювати моніторинг стану системи в реальному часі;
- аналізувати відхилення та їх причини;
- формувати альтернативні сценарії розвитку подій;
- оцінювати ефективність варіантів рішень;
- забезпечувати реалізацію прийнятих рішень.

Таким чином, ERP-система виконує функцію інтелектуального ядра механізму управління.

Адаптивність механізму. Ключовою характеристикою запропонованого механізму є його адаптивність, що проявляється у здатності змінювати параметри системи у відповідь на вплив факторів динамічних змін. Це досягається за рахунок:

- постійного оновлення інформації;
- використання аналітичних моделей;

- формування альтернативних варіантів рішень;
- реалізації зворотного зв'язку.

Адаптивність забезпечує стійкість системи до змін та підвищує ефективність управління. [17; 31; 91]

Практична реалізація механізму. Запропонований механізм може бути реалізований у вигляді програмного модуля ERP-системи або інтегрованої цифрової платформи управління будівництвом. Його використання дозволяє:

- підвищити обґрунтованість управлінських рішень;
- скоротити час їх прийняття;
- забезпечити узгодженість дій учасників проєкту;
- підвищити ефективність використання ресурсів;
- знизити ризики реалізації проєкту.

Таким чином, розроблений механізм підтримки прийняття управлінських рішень є ключовим елементом адаптивної цифрової моделі організації будівництва. Його реалізація забезпечує інтеграцію інформаційних потоків, аналіз стану системи та формування оптимальних управлінських рішень. [91; 96; 104]

Наукова новизна механізму полягає у поєднанні цифрової моделі організації будівництва з ERP-системою як інструментом підтримки прийняття рішень, що дозволяє забезпечити адаптивне управління в умовах динамічних змін.

Запропонований механізм створює основу для розроблення моделі адаптивного перебудування організаційно-технологічних процесів, що розглядається у наступному підрозділі.

З метою формалізації механізму підтримки прийняття управлінських рішень доцільно представити його структуру у вигляді послідовності взаємопов'язаних етапів, кожен з яких виконує визначену функцію у процесі управління.

Узагальнену структуру механізму, його інформаційне забезпечення та результати функціонування наведено у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Структура механізму підтримки прийняття управлінських рішень у ERP-системі

№	Етап механізму	Зміст етапу	Інформаційне забезпечення	Інструменти ERP	Результат
1	Формування даних	Збір та інтеграція інформації про роботи, ресурси, час та умови	BIM, CDE, ERP	Інтеграція даних, бази даних	Актуальний стан системи
2	Аналіз стану	Оцінювання поточного стану, порівняння план/факт	ERP-аналітика	Dashboards, звіти	Виявлення відхилень
3	Ідентифікація проблем	Визначення причин відхилень	Дані ERP, історичні дані	Аналітичні модулі	Причини змін
4	Формування альтернатив	Генерація варіантів рішень	Дані системи	Сценарне моделювання	Набір варіантів
5	Оцінювання рішень	Аналіз варіантів за критеріями ефективності	KPI, критерії (2.6)	ERP-аналітика	Оцінені сценарії
6	Вибір рішення	Визначення оптимального варіанту	Інтегровані дані	DSS / ERP	Оптимальне рішення
7	Реалізація	Впровадження управлінських змін	ERP	Управління процесами	Оновлена система
8	Контроль	Моніторинг виконання	ERP, CDE	Моніторинг	Фактичний стан
9	Зворотний зв'язок	Коригування системи	ERP (реальні дані)	Аналітика	Адаптація системи

Аналіз даних, наведених у таблиці 3.2, свідчить про те, що механізм підтримки прийняття управлінських рішень має ієрархічну та циклічну структуру, яка забезпечує послідовний перехід від збору даних до адаптації організаційно-технологічної системи.

Встановлено, що кожен етап механізму базується на використанні відповідного інформаційного забезпечення та функціональних можливостей ERP-системи, що дозволяє забезпечити інтеграцію даних, їх аналіз та використання у процесі прийняття рішень.

Особливістю механізму є наявність зворотного зв'язку, який забезпечує безперервність управління та дозволяє адаптувати систему до умов динамічних змін. Це дозволяє розглядати запропонований механізм як інструмент реалізації адаптивного управління будівельним виробництвом.

Таким чином, представлена структура механізму підтверджує можливість його практичної реалізації у середовищі ERP та забезпечує підвищення ефективності управлінських рішень.

3.5 Модель адаптивного перебудування організаційно-технологічних процесів

У сучасних умовах реалізації будівельних проєктів, що характеризуються високим рівнем динамічності та невизначеності, ключовою вимогою до організаційно-технологічних систем є їх здатність забезпечувати ефективне функціонування при зміні зовнішніх та внутрішніх умов. Як було встановлено у попередніх підрозділах, фактори динамічних змін впливають на параметри виконання робіт, ресурсне забезпечення, часові характеристики та організаційні умови реалізації проєкту, що призводить до відхилень від запланованих показників.

У традиційних підходах перебудова організаційно-технологічних процесів здійснюється після виникнення відхилень та має реактивний характер. Такий підхід не забезпечує необхідного рівня ефективності, оскільки не враховує можливість прогнозування змін та їх системного впливу на функціонування будівельного виробництва.

У зв'язку з цим у межах даного дослідження розроблено модель адаптивного перебудування організаційно-технологічних процесів, яка дозволяє забезпечити

безперервну адаптацію системи до умов реалізації проєкту та підтримувати ефективність її функціонування у змінному середовищі.

Сутність запропонованої моделі полягає у розгляді організаційно-технологічної системи як керованої динамічної системи, стан якої змінюється у часі під впливом факторів динамічних змін та управлінських рішень. При цьому адаптивне перебудування розглядається як процес цілеспрямованої зміни параметрів та структури системи з метою досягнення заданих показників ефективності. [17; 52; 91]

У межах моделі стан організаційно-технологічної системи визначається сукупністю параметрів, що характеризують структуру виконання робіт, ресурсне забезпечення, часові обмеження та умови реалізації проєкту. Зміна будь-якого з цих параметрів призводить до необхідності коригування інших елементів системи, що обумовлює її взаємозалежний характер.

Особливістю запропонованої моделі є врахування того, що процес адаптації не є одноразовою дією, а реалізується як безперервний процес, що включає моніторинг стану системи, аналіз відхилень, формування варіантів перебудови та їх реалізацію. [17; 31; 61]

Формалізація процесу адаптивного перебудування базується на представленні зміни стану системи як функції управлінських впливів та факторів динамічних змін. У загальному вигляді це може бути описано як перехід системи з одного стану в інший, що забезпечує збереження або підвищення її ефективності.

Важливим елементом моделі є механізм визначення відхилень, який дозволяє встановити різницю між плановими та фактичними параметрами системи. Виявлення відхилень є основою для подальшого аналізу та формування управлінських рішень.

Аналіз причин відхилень здійснюється з урахуванням впливу факторів динамічних змін, які можуть мати як внутрішній, так і зовнішній характер. Внутрішні фактори пов'язані з організацією виконання робіт та використанням ресурсів, тоді як зовнішні — із впливом середовища реалізації проєкту.

На основі результатів аналізу формується множина можливих варіантів перебудови організаційно-технологічних процесів. До таких варіантів можуть належати зміна послідовності виконання робіт, перерозподіл ресурсів, коригування календарних графіків, а також зміна організаційних рішень.

Оцінювання варіантів перебудови здійснюється на основі системи критеріїв ефективності та адаптивності, що дозволяє визначити оптимальний варіант, який забезпечує досягнення цільових параметрів проєкту з урахуванням обмежень.

Реалізація обраного варіанту перебудови призводить до зміни параметрів системи, що відображається у її новому стані. При цьому процес адаптації не завершується, а переходить у наступний цикл, що забезпечує безперервність управління. [17; 91]

Ключову роль у реалізації моделі відіграє ERP-система, яка забезпечує інтеграцію даних, їх обробку та використання у процесі прийняття управлінських рішень. ERP-система дозволяє здійснювати моніторинг стану системи в режимі реального часу, аналізувати відхилення та формувати варіанти їх усунення.

Завдяки використанню ERP-системи забезпечується можливість реалізації адаптивного перебудування як керованого процесу, що базується на використанні актуальної інформації та аналітичних інструментів.

Практичне значення запропонованої моделі полягає у забезпеченні можливості оперативного реагування на зміни умов реалізації будівельного проєкту, підвищенні ефективності використання ресурсів, скороченні строків виконання робіт та зниженні ризиків.

Таким чином, розроблена модель адаптивного перебудування організаційно-технологічних процесів дозволяє забезпечити перехід від реактивного до адаптивного управління будівельним виробництвом та створює основу для підвищення ефективності організації будівництва в умовах динамічних змін.

Наукова новизна моделі полягає у формалізації процесу адаптивного перебудування як безперервного керованого процесу, що базується на інтеграції факторів динамічних змін, організаційно-технологічних параметрів та інформаційного забезпечення на основі ERP-систем.

Запропонований підхід створює методологічну основу для визначення показників ефективності та адаптивності організаційно-технологічних систем, що розглядаються у наступному підрозділі.

З метою формалізації процесу адаптивного перебудування організаційно-технологічних процесів доцільно представити його у вигляді послідовності взаємопов'язаних етапів, що забезпечують безперервну адаптацію системи до умов реалізації будівельного проекту.

Узагальнену структуру моделі адаптивного перебудування наведено у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3

Структура моделі адаптивного перебудування організаційно-технологічних процесів

№	Етап адаптивного перебудування	Зміст процесу	Вхідні параметри	Управлінський вплив	Результат
1	Моніторинг стану	Збір даних про виконання робіт, ресурси, час	W, R, T, C	—	Поточний стан системи
2	Виявлення відхилень	Порівняння планових і фактичних показників	План/факт дані	—	Ідентифікація відхилень
3	Аналіз причин	Визначення факторів впливу	F _d (фактори змін)	—	Причини відхилень
4	Формування варіантів	Генерація альтернатив в перебудови	Поточний стан	U (варіанти рішень)	Набір сценаріїв

№	Етап адаптивного перебудування	Зміст процесу	Вхідні параметри	Управлінський вплив	Результат
5	Оцінювання варіантів	Аналіз ефективності варіантів	Критерії ефективності	Аналітика ERP	Оцінені рішення
6	Вибір рішення	Визначення оптимального варіанту	Оцінені сценарії	U*	Оптимальне рішення
7	Реалізація перебудови	Коригування робіт, ресурсів, графіка	U*	Управління процесами	Новий стан системи
8	Контроль результатів	Моніторинг після змін	Фактичні дані	ERP-контроль	Оцінка ефективності
9	Зворотний зв'язок	Коригування параметрів системи	ΔS	Адаптація	Стабілізація системи

Аналіз структури, наведеної у таблиці 3.3, свідчить про те, що адаптивне перебудування організаційно-технологічних процесів є багатоступеневим процесом, який забезпечує перехід системи від поточного стану до нового, більш ефективного, з урахуванням впливу факторів динамічних змін. [52; 87; 91; 96]

Встановлено, що ключовими етапами процесу є формування альтернативних варіантів перебудови та їх оцінювання, що дозволяє забезпечити вибір оптимального управлінського рішення. Особливістю моделі є наявність зворотного зв'язку, який забезпечує безперервність процесу адаптації та підвищує стійкість системи до змін. [17; 31; 61]

Таким чином, запропонована модель адаптивного перебудування забезпечує реалізацію принципів адаптивного управління будівельним виробництвом та створює основу для підвищення ефективності організаційно-технологічних рішень.

3.6 Показники ефективності та адаптивності будівельного виробництва

Оцінювання ефективності організації будівельного виробництва є необхідною умовою обґрунтування управлінських рішень та визначення результативності функціонування організаційно-технологічних систем. У традиційних підходах така оцінка здійснюється на основі обмеженого набору показників, що характеризують строки виконання робіт, вартість та якість. Проте в умовах динамічних змін цього недостатньо, оскільки система повинна забезпечувати не лише досягнення запланованих результатів, але й здатність адаптуватися до змін середовища. [33; 42; 48]

У зв'язку з цим у межах даного дослідження запропоновано розширений підхід до оцінювання ефективності будівельного виробництва, який базується на поєднанні показників ефективності та адаптивності та враховує особливості функціонування організаційно-технологічних систем у цифровому середовищі.

Сутність оцінювання ефективності в умовах адаптивного управління. У запропонованій моделі ефективність розглядається як інтегральна характеристика, що відображає здатність системи досягати заданих цільових параметрів у визначених умовах. Водночас адаптивність визначається як здатність системи змінювати свою структуру та параметри без суттєвого зниження ефективності.

Таким чином, оцінювання повинно враховувати як результати функціонування системи, так і її здатність реагувати на зміни. [52; 87; 91; 96]

Система показників ефективності. До основних показників ефективності організації будівельного виробництва відносяться:

- часова ефективність, що характеризує рівень дотримання календарних строків виконання робіт та відхилення від графіка;
- ресурсна ефективність, яка визначає ступінь використання трудових, матеріальних і технічних ресурсів;
- економічна ефективність, що відображає співвідношення фактичних витрат до запланованих;

- якісна ефективність, що характеризує відповідність результатів виконання робіт встановленим стандартам;
- організаційна ефективність, яка визначає рівень узгодженості дій учасників проекту.

Зазначені показники дозволяють оцінити результати функціонування системи, однак не враховують її здатність до адаптації. [91; 96; 104]

Система показників адаптивності. З метою врахування впливу факторів динамічних змін до системи оцінювання включено показники адаптивності, які характеризують здатність системи функціонувати в умовах змін:

- гнучкість, що визначає можливість зміни структури виконання робіт;
- оперативність реагування, яка характеризує швидкість прийняття та реалізації управлінських рішень;
- стійкість системи, що відображає здатність зберігати ефективність при зміні умов;
- варіантність рішень, що визначає наявність альтернативних сценаріїв;
- інформаційна забезпеченість, яка характеризує рівень доступності та актуальності даних.

Включення цих показників дозволяє оцінювати не лише результат, але й процес функціонування системи. [96; 104]

Інтегральна оцінка ефективності. Для комплексного оцінювання пропонується використовувати інтегральний показник, який враховує всі групи параметрів:

$$E = f(T, R, C, Q, O, A) \quad (3.9)$$

де:

- T— часові параметри;
- R— ресурсні показники;

- С— економічні витрати;
- Q— якість виконання робіт;
- O— організаційні характеристики;
- A— адаптивність системи.

Такий підхід дозволяє оцінювати ефективність як функцію взаємодії всіх компонентів системи. [52; 87; 91]

Оцінювання ефективності в ERP-середовищі. Практична реалізація оцінювання здійснюється у межах ERP-систем, які забезпечують:

- збір та інтеграцію даних;
- автоматизований розрахунок показників;
- моніторинг ефективності в режимі реального часу;
- формування аналітичних звітів;
- підтримку прийняття управлінських рішень.

ERP-система дозволяє реалізувати оцінювання як безперервний процес, що інтегрований у систему управління будівельним виробництвом.

Зв'язок показників із адаптивною моделлю. Запропонована система показників безпосередньо пов'язана з моделлю адаптивного перебудування, оскільки дозволяє оцінювати ефективність змін, що вносяться у систему. Це забезпечує можливість: [91; 104; 111]

- вибору оптимальних варіантів перебудови;
- оцінювання результатів управлінських рішень;
- коригування параметрів системи;
- підвищення ефективності управління.

Таким чином, показники виступають як інструмент реалізації адаптивного управління.

Таким чином, у межах дослідження сформовано систему показників ефективності та адаптивності будівельного виробництва, яка дозволяє здійснювати комплексне оцінювання функціонування організаційно-технологічних систем у умовах динамічних змін.

Наукова новизна запропонованого підходу полягає у поєднанні показників ефективності та адаптивності в єдину систему оцінювання, що забезпечує можливість врахування впливу факторів динамічних змін та підтримку прийняття управлінських рішень у цифровому середовищі.

Запропонована система показників створює основу для розроблення алгоритму реалізації моделі цифрової підтримки управління, що розглядається у наступному підрозділі. [91; 104]

З метою узагальнення системи показників ефективності та адаптивності організаційно-технологічних систем доцільно представити їх у вигляді інтегрованої структури, що відображає взаємозв'язок між окремими групами показників та їх вплив на загальний рівень ефективності будівельного виробництва.

Зображена на рисунку 3.3 структура відображає багаторівневу систему оцінювання, у межах якої інтегральний показник ефективності формується на основі сукупності часткових показників, що характеризують різні аспекти функціонування організаційно-технологічної системи.

Особливістю запропонованого підходу є виділення блоку адаптивності як модифікуючого елементу, що впливає на значення основних показників ефективності. Це дозволяє враховувати здатність системи реагувати на зміни умов реалізації проєкту та забезпечувати стабільність її функціонування. [91; 96; 112]

Інтеграція показників у межах ERP-середовища забезпечує можливість їх оперативного розрахунку, аналізу та використання у процесі прийняття управлінських рішень, що підвищує ефективність управління будівельним виробництвом.

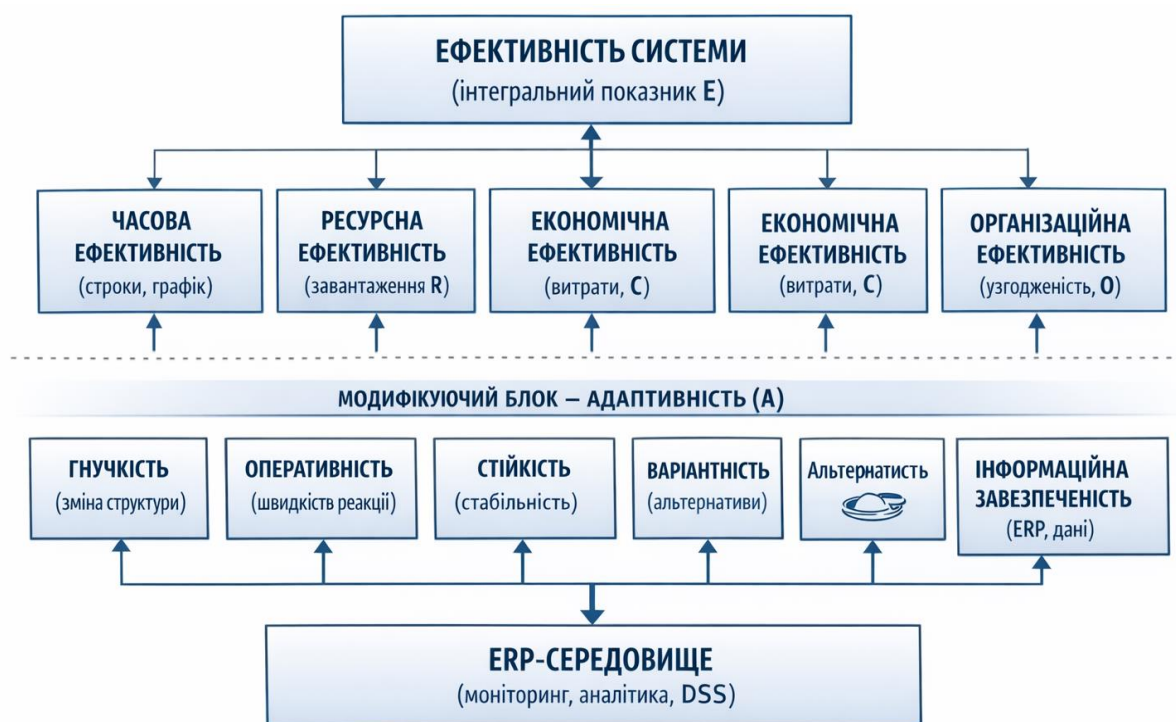


Рисунок 3.3 Система показників ефективності та адаптивності будівельного виробництва

У сучасних умовах цифрової трансформації будівельної галузі підвищення ефективності організації будівельного виробництва потребує не лише концептуального обґрунтування, але й формалізації ключових параметрів функціонування системи. Це дозволяє перейти від описових моделей до кількісного оцінювання результативності управлінських рішень. [52; 87; 91]

У межах даного дослідження ефективність організації будівельного виробництва розглядається як інтегральний показник, що залежить від сукупності ресурсних, часових, організаційних та інформаційних параметрів системи.

З урахуванням зазначеного запропоновано узагальнену функціональну залежність ефективності:

$$E = f(R, T, C, I) \quad (3.10)$$

де:

R— ресурси (трудові, матеріальні, технічні);

T— часові параметри виконання робіт;

C— умови реалізації проєкту (зовнішні та внутрішні фактори);

I — рівень інформаційної узгодженості між учасниками проєкту.

На відміну від традиційних організаційно-технологічних моделей, у яких ефективність визначається переважно через співвідношення ресурсів і часу, у запропонованому підході введено додатковий параметр — рівень інформаційної узгодженості I , який виступає інтегруючим фактором цифрового середовища управління.

З метою кількісного оцінювання інформаційної узгодженості запропоновано використовувати відповідний коефіцієнт:

$$I = \frac{I_{\text{valid}}}{I_{\text{total}}} \quad (3.11)$$

де:

I_{valid} — обсяг актуальної, узгодженої та достовірної інформації;

I_{total} — загальний обсяг інформаційних потоків у системі.

Запропонований показник дозволяє оцінити ступінь узгодженості даних у межах інтегрованого цифрового середовища (BIM–ERP–CDE). При цьому значення $I \rightarrow 1$ свідчить про високий рівень інформаційної інтеграції та синхронізації процесів, тоді як зниження цього показника вказує на наявність інформаційних розривів, що негативно впливають на ефективність управління.

З урахуванням введеного коефіцієнта інформаційної узгодженості запропоновано конкретизовану функцію ефективності організації будівельного виробництва:

$$E = \frac{Q}{T \cdot R} \cdot I \quad (3.12)$$

де:

Q — обсяг виконаних робіт (виробнича результативність);

T — тривалість виконання робіт;

R — сукупні витрати ресурсів;

I — коефіцієнт інформаційної узгодженості.

Запропонована залежність відображає, що ефективність будівельного виробництва визначається не лише співвідношенням результату до витрат часу і ресурсів, але й рівнем узгодженості інформаційних потоків. Це дозволяє врахувати

вплив цифрового середовища на процес прийняття управлінських рішень та результати їх реалізації.

У контексті дослідження важливим є також оцінювання здатності організаційно-технологічної системи адаптуватися до змін умов реалізації проєкту.

З цією метою введено показник адаптивності:

$$A = \frac{\Delta E}{\Delta C} \quad (3.13)$$

де:

A — адаптивність системи;

ΔE —зміна ефективності функціонування системи;

ΔC — зміна умов реалізації проєкту.

Даний показник характеризує чутливість системи до змін зовнішніх і внутрішніх факторів та дозволяє оцінити її здатність зберігати ефективність у динамічному середовищі. Високі значення показника адаптивності свідчать про стійкість організаційно-технологічної системи, тоді як низькі значення вказують на її вразливість до змін.

Узагальнюючи запропонований підхід, інтегрована модель ефективності організації будівельного виробництва може бути представлена у вигляді:

$$E = \frac{Q}{T \cdot R} \cdot \frac{I_{\text{valid}}}{I_{\text{total}}} \quad (3.14)$$

Запропонована формалізація дозволяє:

- кількісно оцінювати ефективність організації будівельного виробництва;
- враховувати вплив інформаційної узгодженості на результати управління;
- оцінювати адаптивність системи в умовах динамічних змін;
- забезпечити інтеграцію цифрових інструментів (BIM, ERP, CDE) у процес прийняття управлінських рішень.

Таким чином, розроблена система показників створює основу для переходу від традиційних підходів до організації будівництва до адаптивного управління, що базується на використанні інтегрованого цифрового середовища та забезпечує підвищення ефективності реалізації будівельних проєктів.

3.7 Алгоритм реалізації моделі цифрової підтримки управління

Розроблення цифрової моделі організації будівництва, механізму підтримки прийняття управлінських рішень та моделі адаптивного перебудування організаційно-технологічних процесів створює необхідні передумови для формалізації процесу їх практичної реалізації. У зв'язку з цим виникає необхідність побудови алгоритму, який забезпечує послідовне впровадження запропонованих підходів у систему управління будівельним виробництвом.

У межах даного дослідження алгоритм реалізації моделі цифрової підтримки управління розглядається як впорядкована послідовність дій, спрямованих на інтеграцію інформаційних потоків, формування аналітичної бази, прийняття управлінських рішень та адаптивне коригування організаційно-технологічних процесів. [52; 87; 91]

Методологічна основа алгоритму. Алгоритм базується на положеннях системного підходу, принципах цифрової інтеграції (BIM–ERP–CDE), а також на розроблених у попередніх підрозділах:

- моделі взаємодії робіт, ресурсів, часу та умов реалізації;
- механізмі підтримки прийняття управлінських рішень;
- моделі адаптивного перебудування організаційно-технологічних процесів;
- системі показників ефективності та адаптивності.

Це забезпечує цілісність алгоритму та його відповідність загальній концепції дослідження.

Загальна структура алгоритму. Алгоритм реалізації моделі має ітераційний характер і включає взаємопов'язані етапи, що формують замкнений цикл управління будівельним виробництвом. Його структура передбачає послідовний перехід від формування інформаційної бази до адаптивного управління системою.

Етап 1. Формування цифрової інформаційної бази. На початковому етапі здійснюється формування єдиного інформаційного середовища, яке включає:

- створення або використання BIM-моделі об'єкта;

- формування структури робіт;
- визначення ресурсного забезпечення;
- встановлення календарних параметрів;
- інтеграцію даних у ERP-систему;
- організацію обміну даними через CDE.

Результатом цього етапу є формалізована цифрова модель організаційно-технологічної системи.

Етап 2. Ідентифікація поточного стану системи. На основі даних ERP-системи здійснюється визначення поточного стану системи, що включає:

- оцінювання фактичного виконання робіт;
- аналіз використання ресурсів;
- визначення відхилень від календарного плану;
- врахування умов реалізації проєкту.

Цей етап забезпечує формування актуальної інформаційної основи для прийняття рішень.

Етап 3. Аналітична обробка та виявлення відхилень. На цьому етапі здійснюється:

- порівняння планових та фактичних показників;
- ідентифікація відхилень;
- визначення причин їх виникнення;
- оцінювання впливу відхилень на ефективність системи.

Особливістю етапу є врахування факторів динамічних змін, що впливають на функціонування системи.

Етап 4. Формування альтернативних управлінських рішень. На основі результатів аналізу формується множина можливих управлінських рішень, які передбачають:

- зміну структури виконання робіт;
- перерозподіл ресурсів;
- коригування календарних параметрів;
- зміну організаційних рішень.

Формування альтернатив здійснюється з урахуванням обмежень та цільових параметрів проекту.

Етап 5. Оцінювання та вибір оптимального рішення. Оцінювання альтернатив здійснюється на основі системи показників ефективності та адаптивності, що дозволяє визначити найбільш доцільний варіант.

Вибір рішення здійснюється з урахуванням:

- мінімізації відхилень;
- оптимізації ресурсного використання;
- забезпечення дотримання строків;
- підвищення адаптивності системи.

Результатом етапу є визначення оптимального управлінського впливу.

Етап 6. Реалізація управлінського рішення. На цьому етапі здійснюється впровадження обраного рішення у систему, що включає:

- коригування планів виконання робіт;
- оновлення ресурсного забезпечення;
- внесення змін до календарних графіків;
- адаптацію організаційної структури процесу.

ERP-система забезпечує реалізацію цих змін у цифровому середовищі.

Етап 7. Контроль та моніторинг результатів. Після реалізації рішення здійснюється контроль його ефективності, що включає:

- моніторинг виконання робіт;
- аналіз досягнення цільових показників;

- оцінювання ефективності змін;
- визначення нових відхилень.

Цей етап забезпечує перевірку результативності управлінських дій.

Етап 8. Зворотний зв'язок та адаптація. На завершальному етапі формується зворотний зв'язок, який дозволяє:

- скоригувати параметри системи;
- уточнити управлінські рішення;
- забезпечити безперервність процесу управління.

Таким чином, алгоритм переходить у новий цикл, що забезпечує адаптивний характер управління.

Особливості реалізації алгоритму. Запропонований алгоритм має такі ключові особливості:

- інтеграція BIM, ERP та CDE у єдину систему;
- використання цифрової моделі як основи управління;
- забезпечення адаптивності системи;
- використання аналітичних інструментів ERP;
- реалізація замкненого циклу управління.

Таким чином, розроблений алгоритм реалізації моделі цифрової підтримки управління забезпечує формалізацію процесу організації будівельного виробництва у цифровому середовищі та створює основу для його практичного застосування.

Наукова новизна алгоритму полягає у поєднанні моделей взаємодії, механізму підтримки прийняття рішень та адаптивного перебудування у єдину систему, що забезпечує безперервне управління будівельним виробництвом з урахуванням факторів динамічних змін. [17; 31; 91]

Запропонований алгоритм створює методологічну основу для практичної апробації розробленої моделі, що розглядається у наступному розділі.

З метою формалізації процесу реалізації моделі цифрової підтримки управління будівельним виробництвом доцільно представити його у вигляді алгоритму, що відображає послідовність взаємопов'язаних етапів обробки інформації, прийняття управлінських рішень та адаптивного коригування організаційно-технологічних процесів. [89; 91; 104; 111]

Запропонований алгоритм базується на інтеграції BIM, ERP та CDE як єдиного цифрового середовища, використанні розробленої моделі взаємодії робіт, ресурсів, часу та умов реалізації, а також механізму підтримки прийняття управлінських рішень і моделі адаптивного перебудування.

Схематичне представлення алгоритму реалізації моделі цифрової підтримки управління наведено на риунку 3.4.

Зображений на рис. 3.4 алгоритм відображає послідовність етапів реалізації цифрової моделі управління будівельним виробництвом, що забезпечує перехід від формування інформаційної бази до адаптивного управління організаційно-технологічними процесами. [104; 111]

Початковим етапом є формування цифрової інформаційної бази, яка включає інтеграцію даних BIM-моделі, ресурсного забезпечення, календарних параметрів та інформації ERP-системи. Це створює основу для подальшого аналізу та прийняття управлінських рішень.

Наступним етапом є ідентифікація поточного стану системи, що здійснюється на основі даних ERP та дозволяє визначити фактичні параметри виконання будівельного процесу. На цьому етапі формується інформаційна база для виявлення відхилень

Аналітична обробка передбачає порівняння планових та фактичних показників, виявлення відхилень та визначення факторів динамічних змін, що впливають на функціонування системи. Це дозволяє перейти від констатації проблем до їх глибокого аналізу. [91; 104; 111]

Формування альтернативних управлінських рішень забезпечує розроблення варіантів адаптації системи, які можуть включати зміну структури робіт,

перерозподіл ресурсів та коригування календарних графіків. Кожен варіант представляє окремий сценарій функціонування системи.

На етапі оцінювання здійснюється аналіз ефективності альтернативних рішень на основі системи показників ефективності та адаптивності, що дозволяє визначити оптимальний варіант управлінського впливу.

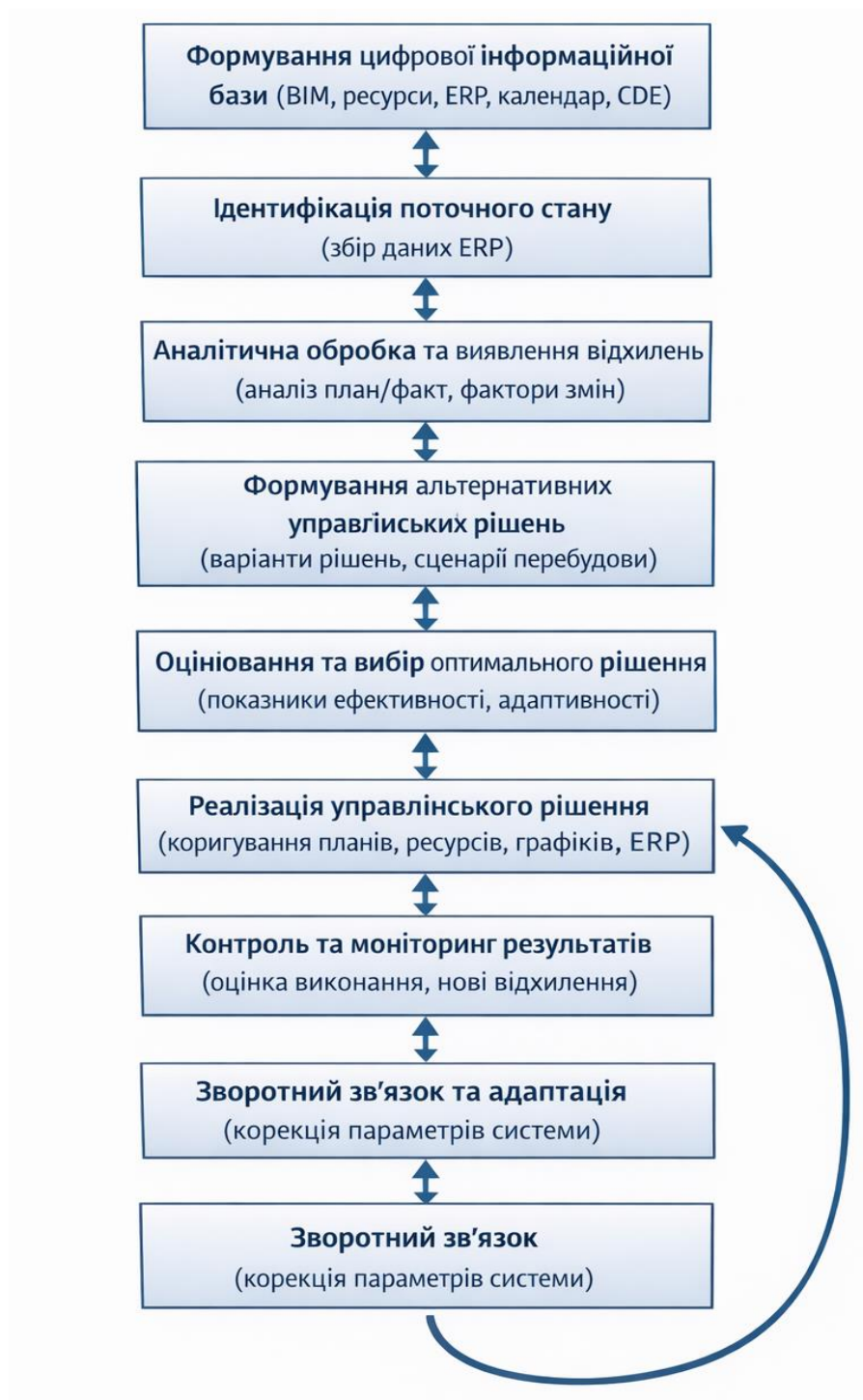


Рисунок 3.4 Алгоритм реалізації моделі цифрової підтримки управління будівельним виробництвом

Реалізація обраного рішення передбачає внесення змін до організаційно-технологічної системи, що відображається у коригуванні планів, ресурсного забезпечення та календарних параметрів у ERP-середовищі.

Контроль та моніторинг результатів забезпечують оцінювання ефективності прийнятого рішення, що дозволяє визначити ступінь досягнення цільових параметрів та виявити нові відхилення.

Завершальним етапом є формування зворотного зв'язку та адаптація системи, що забезпечує безперервність процесу управління та дозволяє реалізувати ітераційний характер алгоритму.

Таким чином, запропонований алгоритм реалізації моделі цифрової підтримки управління забезпечує інтеграцію інформаційних потоків, аналітичну обробку даних та адаптивне управління будівельним виробництвом. Його використання дозволяє підвищити обґрунтованість управлінських рішень, скоротити час їх прийняття та забезпечити стійкість організаційно-технологічної системи до впливу факторів динамічних змін.

Висновки до розділу 3

1. У результаті проведеного дослідження розроблено концептуальну модель цифрової підтримки управлінських рішень у будівництві, яка базується на системному підході, інтеграції інформаційних потоків та врахуванні факторів динамічних змін. Встановлено, що запропонований підхід забезпечує перехід від традиційного детермінованого управління до адаптивного цифрового управління будівельним виробництвом.

2. Сформовано систему принципів побудови цифрової моделі організації будівництва, що включає принципи системності, інтеграції даних, адаптивності, варіантності, актуальності інформації, інтеграції управлінських функцій, підтримки прийняття рішень, масштабованості та цифрової сумісності. Доведено, що їх комплексне застосування забезпечує цілісність і ефективність функціонування цифрової моделі.

3. Розроблено концепцію інтегрованого цифрового середовища будівництва, що базується на поєднанні BIM, ERP та CDE як взаємодоповнюючих компонентів єдиної системи управління. Обґрунтовано, що центральну роль у цій системі відіграє ERP як інструмент трансформації даних у управлінські рішення.

4. Побудовано модель взаємодії робіт, ресурсів, часу та умов реалізації проєкту, яка дозволяє формалізувати організаційно-технологічну систему як динамічну структуру з взаємозалежними компонентами. Встановлено, що ефективність функціонування системи визначається рівнем узгодженості цих компонентів та врахуванням факторів динамічних змін.

5. Розроблено механізм підтримки прийняття управлінських рішень в ERP-системах, який реалізує замкнений цикл управління, що включає формування даних, аналіз стану, генерацію альтернатив, оцінювання рішень, їх реалізацію та контроль результатів. Доведено, що використання ERP як аналітичного ядра дозволяє підвищити обґрунтованість та оперативність управлінських рішень.

6. Запропоновано модель адаптивного перебудування організаційно-технологічних процесів, яка дозволяє розглядати будівельне виробництво як керовану динамічну систему. Встановлено, що реалізація адаптивного підходу забезпечує безперервну перебудову системи у відповідь на вплив факторів динамічних змін та підвищує її стійкість.

7. Сформовано систему показників ефективності та адаптивності будівельного виробництва, яка поєднує часові, ресурсні, економічні, якісні та організаційні показники з показниками адаптивності. Доведено, що їх інтеграція дозволяє здійснювати комплексне оцінювання функціонування системи в умовах невизначеності.

8. Розроблено алгоритм реалізації моделі цифрової підтримки управління, який забезпечує послідовну інтеграцію інформаційних потоків, аналітичну обробку даних, формування та вибір управлінських рішень і їх адаптивну реалізацію. Встановлено, що алгоритм має ітераційний характер і забезпечує безперервність управління будівельним виробництвом.

9. Наукова новизна отриманих результатів полягає у формуванні цілісної адаптивної моделі управління будівельним виробництвом, що інтегрує організаційно-технологічні процеси, інформаційні системи та механізми підтримки прийняття рішень на основі ERP, що дозволяє підвищити ефективність функціонування системи в умовах динамічних змін.

10. Практичне значення розробленої моделі полягає у можливості її впровадження в цифровому середовищі управління будівництвом, що забезпечує підвищення ефективності використання ресурсів, скорочення строків реалізації проєктів та зниження ризиків.

РОЗДІЛ 4

ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ERP-ПІДТРИМКИ УПРАВЛІНСЬКИХ РІШЕНЬ

У попередніх розділах дисертаційного дослідження було розроблено теоретико-методичні основи цифрової трансформації організації будівництва, сформовано модель цифрової підтримки управлінських рішень, обґрунтовано механізм її реалізації в ERP-середовищі, а також визначено систему показників ефективності та адаптивності будівельного виробництва.

Однак наукова цінність запропонованих рішень визначається не лише їх теоретичною обґрунтованістю, але й можливістю практичного застосування у реальних умовах реалізації будівельних проєктів. У зв'язку з цим виникає необхідність проведення апробації розробленої моделі, перевірки її ефективності та оцінювання впливу цифрових технологій, зокрема ERP-систем, на організацію будівельного виробництва.

Метою даного розділу є практична реалізація розробленої моделі цифрової підтримки управлінських рішень, а також оцінка її ефективності у порівнянні з традиційними підходами до організації будівництва.

Для досягнення поставленої мети у розділі вирішуються наступні завдання:

- розроблення методики практичного застосування моделі цифрової підтримки управління;
- апробація моделі на прикладі реального будівельного проєкту;
- проведення порівняльного аналізу традиційного та цифрового підходів до управління;
- оцінка ефективності впровадження ERP-рішень у процесі організації будівництва;
- визначення економічної доцільності цифрової трансформації;

- формування рекомендацій щодо впровадження ERP-систем у будівельних проєктах.

У межах дослідження як об'єкт практичної апробації обрано реальний будівельний (інфраструктурний) проєкт, реалізація якого характеризується наявністю складних організаційно-технологічних процесів, значною кількістю учасників та впливом факторів динамічних змін. Це дозволяє максимально повно оцінити можливості застосування розробленої моделі в умовах, наближених до реальної практики.

Практична реалізація моделі здійснюється на основі інтеграції BIM, ERP та CDE як єдиного цифрового середовища, що забезпечує: [89; 91; 104; 111]

- формування інформаційної бази проєкту;
- моніторинг виконання робіт у режимі реального часу;
- аналіз відхилень та факторів впливу;
- формування та оцінювання управлінських рішень;
- адаптивне коригування організаційно-технологічних процесів.

Особливістю даного дослідження є те, що оцінка ефективності здійснюється не лише за традиційними показниками (строки, витрати, якість), але й з урахуванням показників адаптивності системи, що дозволяє більш повно відобразити вплив цифрових технологій на процес організації будівництва.

У межах розділу застосовується комплекс методів, зокрема:

- порівняльний аналіз;
- економічне оцінювання ефективності;
- моделювання альтернативних сценаріїв;
- аналіз даних ERP-систем;
- оцінювання показників ефективності та адаптивності.

Таким чином, розділ 4 спрямований на практичне підтвердження наукової гіпотези дослідження, яка полягає у тому, що використання цифрових моделей та ERP-підтримки управлінських рішень дозволяє підвищити ефективність організації будівельного виробництва за рахунок забезпечення адаптивності системи до умов динамічних змін.

Отримані результати дозволять не лише підтвердити доцільність застосування запропонованої моделі, але й сформулювати практичні рекомендації щодо її впровадження у будівельній галузі.

4.1 Методика практичного застосування моделі цифрової підтримки управління

Практична реалізація теоретичних положень, розроблених у попередніх розділах, є необхідною умовою підтвердження їх наукової та прикладної значущості. У зв'язку з цим у межах даного дослідження сформовано методику практичного застосування моделі цифрової підтримки управлінських рішень, яка забезпечує її інтеграцію у процес організації будівельного виробництва на рівні конкретного девелоперського проєкту.

Розроблена методика базується на положеннях системного підходу, згідно з яким будівельне виробництво розглядається як складна організаційно-технологічна система, функціонування якої визначається взаємодією робіт, ресурсів, часових параметрів та умов реалізації. Водночас, на відміну від традиційних підходів, у запропонованій методиці ця система розглядається як динамічна та керована, що дозволяє враховувати вплив факторів змін і забезпечувати адаптацію процесів у реальному часі. [89; 91; 104; 111]

Методика орієнтована на забезпечення переходу від фрагментарного управління окремими процесами до інтегрованого управління будівельним проєктом на основі єдиного цифрового середовища. Такий перехід досягається шляхом інтеграції інформаційних моделей об'єкта, систем управління ресурсами та платформ обміну даними, що у сукупності формують основу для прийняття обґрунтованих управлінських рішень.

Ключовим положенням методики є те, що процес управління розглядається як безперервний цикл, у якому інформація про стан системи трансформується в управлінські рішення, а результати їх реалізації — у нову інформаційну основу для наступного циклу. Така циклічність забезпечує адаптивний характер управління та дозволяє системі функціонувати ефективно в умовах невизначеності.

У межах методики виділено декілька взаємопов'язаних рівнів реалізації, що відображають логіку переходу від формування інформаційної бази до прийняття управлінських рішень та їх реалізації.

Перший рівень пов'язаний із формуванням цифрової моделі проєкту, яка виступає як інформаційна основа управління. На цьому етапі здійснюється структуризація будівельного процесу у вигляді системи взаємопов'язаних робіт, визначається ресурсне забезпечення, формуються календарні параметри та створюється інформаційна модель об'єкта. Особливістю даного етапу є те, що всі зазначені елементи інтегруються у єдине цифрове середовище, що забезпечує їх узгодженість та можливість подальшого аналізу.

Другий рівень реалізації методики передбачає організацію інформаційного середовища управління, у межах якого забезпечується інтеграція даних, їх актуалізація та доступність для всіх учасників проєкту. Важливою особливістю є те, що інформація не лише накопичується, але й структурується відповідно до потреб управління, що дозволяє використовувати її для прийняття рішень.

На третьому рівні здійснюється моніторинг стану організаційно-технологічної системи, який включає збір фактичних даних про виконання робіт, використання ресурсів та дотримання календарних параметрів. На відміну від традиційних підходів, де моніторинг має періодичний характер, у запропонованій методиці він реалізується як безперервний процес, що забезпечує актуальність інформації.

Четвертий рівень передбачає аналітичну обробку отриманих даних, що включає порівняння планових та фактичних показників, виявлення відхилень та визначення причин їх виникнення. Особливістю цього етапу є врахування факторів

динамічних змін, що дозволяє оцінювати не лише факт відхилення, але й його природу та можливі наслідки.

П'ятий рівень методики пов'язаний із формуванням альтернативних управлінських рішень. На відміну від традиційного підходу, де рішення приймається на основі одного сценарію, у межах запропонованої методики формується множина можливих варіантів, що дозволяє обрати найбільш ефективний шлях адаптації системи до змін.

Шостий рівень передбачає оцінювання альтернативних рішень на основі системи показників ефективності та адаптивності. Це дозволяє враховувати не лише економічні та часові параметри, але й здатність системи до адаптації, що є критично важливим у сучасних умовах.

На сьомому рівні здійснюється реалізація обраного управлінського рішення, що передбачає внесення змін до структури виконання робіт, ресурсного забезпечення та календарних параметрів. Особливістю цього етапу є його інтеграція з цифровим середовищем, що забезпечує оперативність та контрольованість змін.

Завершальний рівень методики пов'язаний із контролем результатів та формуванням зворотного зв'язку, який дозволяє оцінити ефективність прийнятих рішень та скоригувати подальші дії. Це забезпечує безперервність процесу управління та створює умови для його адаптації.

Важливим аспектом методики є її орієнтація на використання ERP-систем як основного інструменту реалізації. ERP-система виступає не лише як засіб обліку, але й як аналітична платформа, що забезпечує інтеграцію даних, їх обробку та підтримку прийняття рішень. Це дозволяє реалізувати принципи цифрового управління та забезпечити високий рівень обґрунтованості управлінських рішень.

Запропонована методика також передбачає врахування специфіки девелоперських проєктів, що характеризуються багатоваріантністю рішень, високим рівнем невизначеності та значною залежністю від зовнішніх факторів. Це обумовлює необхідність використання адаптивних підходів до управління, які забезпечують можливість швидкого реагування на зміни.

Практичне застосування методики дозволяє забезпечити підвищення ефективності організації будівельного виробництва за рахунок:

- підвищення якості управлінських рішень;
- скорочення часу їх прийняття;
- оптимізації використання ресурсів;
- зниження рівня ризиків;
- забезпечення адаптації системи до змін.

Таким чином, розроблена методика практичного застосування моделі цифрової підтримки управління забезпечує інтеграцію теоретичних положень дослідження у практику організації будівельного виробництва та створює основу для проведення її апробації на реальному будівельному проєкті.

У наступному підрозділі буде розглянуто практичний кейс реалізації запропонованої методики, що дозволить оцінити її ефективність та підтвердити наукову гіпотезу дослідження. [89; 91; 104; 111]

З метою обґрунтування доцільності застосування розробленої методики цифрової підтримки управління будівельним виробництвом проведено її порівняльний аналіз із традиційними підходами до організації будівництва. Основні відмінності та переваги запропонованої методики наведено у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Порівняльний аналіз розробленої методики цифрової підтримки управління та традиційних підходів до організації будівельного виробництва

№	Критерій порівняння	Традиційні підходи	Розроблена методика	Перевага запропонованої методики
1	Характер управління	Реактивний	Проактивний та адаптивний	Забезпечує попередження відхилень
2	Інформаційна база	Фрагментована	Інтегрована (BIM–ERP–CDE)	Єдине джерело актуальних даних

№	Критерій порівняння	Традиційні підходи	Розроблена методика	Перевага запропонованої методики
3	Оновлення даних	Періодичне	Безперервне	Підвищення актуальності інформації
4	Прийняття рішень	На основі досвіду	На основі даних (data-driven)	Обґрунтованість рішень
5	Кількість сценаріїв	Один (лінійний)	Множинні альтернативи	Можливість вибору оптимального рішення
6	Урахування змін	Обмежене	Системне (фактори F _d)	Підвищення стійкості системи
7	Управління ресурсами	Статичне	Динамічне	Оптимізація використання ресурсів
8	Календарне планування	Жорстке	Гнучке, адаптивне	Зменшення відхилень за строками
9	Контроль виконання	Постфактум	У реальному часі	Оперативне реагування
10	Зворотний зв'язок	Обмежений	Інтегрований (ERP)	Безперервне вдосконалення
11	Рівень автоматизації	Частковий	Комплексний	Зменшення людського фактору
12	Управління ризиками	Реактивне	Проактивне	Зниження ризиків
13	Узгодженість учасників	Низька	Висока (CDE)	Покращення координації
14	Оцінка ефективності	Обмежена	Комплексна (KPI + адаптивність)	Більш повна оцінка системи
15	Гнучкість системи	Низька	Висока	Можливість швидкої перебудови
16	Використання цифрових технологій	Епізодичне	Системне	Підвищення цифрової зрілості

Аналіз результатів, наведених у таблиці 4.1, свідчить про суттєві відмінності між традиційними підходами до організації будівельного виробництва та запропонованою методикою цифрової підтримки управління.

Встановлено, що традиційні підходи характеризуються реактивним характером управління, фрагментованістю інформації та обмеженими можливостями врахування факторів динамічних змін. Це призводить до зниження ефективності управління, збільшення строків реалізації проєктів та нерационального використання ресурсів. [89; 111]

Натомість розроблена методика забезпечує інтеграцію інформаційних потоків, використання аналітичних інструментів ERP-систем та реалізацію адаптивного підходу до управління. Це дозволяє підвищити обґрунтованість управлінських рішень, забезпечити оперативне реагування на зміни та оптимізувати використання ресурсів.

Особливу увагу слід звернути на здатність запропонованої методики забезпечувати формування альтернативних варіантів управлінських рішень та їх оцінювання на основі системи показників ефективності та адаптивності, що є принципово новим підходом у порівнянні з традиційними методами.

Таким чином, проведений аналіз підтверджує, що запропонована методика має суттєві переваги та забезпечує підвищення ефективності організації будівельного виробництва, що створює передумови для її практичного застосування у девелоперських проєктах.

4.2 Практичний кейс реалізації цифрової моделі в будівництві

Практичне впровадження розробленої моделі цифрової підтримки управлінських рішень здійснювалась на прикладі девелоперського будівельного проєкту житлово-комерційного призначення. Обраний об'єкт характеризується значною складністю організаційно-технологічних процесів, багатокомпонентною структурою робіт та високим рівнем залежності від ресурсного забезпечення, що дозволяє оцінити ефективність застосування запропонованої моделі в умовах, наближених до реальної практики. [91; 96; 104]

Об'єктом дослідження є будівництво багатофункціонального житлово-комерційного комплексу, що включає:

- житлову частину (2 секції);

- підземний паркінг;
- комерційні приміщення першого поверху;
- благоустрій території.
- Основні параметри проєкту:
 - загальна площа — близько 18 500 м²;
 - кількість поверхів — 16;
 - тривалість будівництва (планова) — 22 місяці;
 - кількість залучених підрядних організацій — 12;
 - середня кількість працівників на об'єкті — 110–140 осіб.
- Проєкт реалізується в умовах динамічних змін, зокрема:
 - нестабільності постачання матеріалів;
 - коливання вартості ресурсів;
 - змін обсягів робіт;
 - впливу зовнішніх факторів (логістика, погодні умови).

Проблеми традиційної організації управління. Аналіз організації будівельного виробництва на початковому етапі реалізації проєкту показав наявність ряду проблем, характерних для традиційних підходів: [96; 104]

- відсутність єдиного інформаційного середовища;
- фрагментованість даних (окремо графіки, ресурси, звіти);
- затримки у прийнятті управлінських рішень;
- низький рівень координації між учасниками;
- відсутність оперативного контролю відхилень.
- Це призводило до:

- відставання від календарного графіка на 12–18 %;
- перевитрат ресурсів до 10–15 %;
- збільшення кількості організаційних конфліктів.

Впровадження цифрової моделі управління. З метою підвищення ефективності управління було впроваджено розроблену модель цифрової підтримки управлінських рішень, що передбачала інтеграцію BIM, ERP та CDE.

Етап 1. Формування цифрової моделі

Було виконано:

- структуризацію проєкту (WBS);
- створення BIM-моделі основних конструктивних елементів;
- формування ресурсної моделі;
- побудову календарного плану.

Етап 2. Інтеграція ERP-системи

- У межах ERP-системи реалізовано:
- облік виконання робіт;
- контроль ресурсів;
- формування звітності;
- інтеграцію з календарним плануванням.

Етап 3. Організація моніторингу

Забезпечено:

- регулярне оновлення фактичних даних;
- контроль виконання робіт у режимі, наближеному до реального часу;
- фіксацію відхилень.

Етап 4. Реалізація механізму прийняття рішень

Було впроваджено:

- формування альтернативних варіантів рішень;
- оцінювання сценаріїв;
- вибір оптимальних управлінських дій.

Аналіз результатів застосування цифрової моделі показав суттєве підвищення ефективності управління будівельним проектом.

Основні результати:

- скорочення відхилення від графіка з 15 % до 5–6 %;
- зниження перевитрат ресурсів з 12 % до 4–6 %;
- скорочення часу прийняття управлінських рішень на 30–40 %;
- підвищення узгодженості дій учасників проекту;
- зменшення кількості конфліктних ситуацій.

Особливу увагу було приділено оцінюванню адаптивності організаційно-технологічної системи. Встановлено, що після впровадження цифрової моделі:

- підвищилась швидкість реагування на зміни;
- з'явилась можливість формування альтернативних сценаріїв;
- покращилась якість управлінських рішень;
- забезпечено стабільність виконання робіт.

Це підтверджує ефективність запропонованого адаптивного підходу.

Отримані результати підтверджують, що впровадження цифрової моделі забезпечує:

- інтеграцію інформаційних потоків;
- підвищення прозорості управління;
- реалізацію механізму підтримки рішень;
- адаптивне перебудування процесів.

Таким чином, практична реалізація моделі підтверджує її відповідність умовам реального будівельного виробництва.

У підрозділі проведено практичну апробацію розробленої моделі цифрової підтримки управлінських рішень на прикладі девелоперського будівельного проєкту. [91; 104]

Встановлено, що впровадження моделі дозволяє суттєво підвищити ефективність організації будівельного виробництва, зменшити відхилення від графіка, оптимізувати використання ресурсів та забезпечити адаптивність системи до умов динамічних змін.

Отримані результати підтверджують наукову гіпотезу дослідження та створюють основу для проведення порівняльного аналізу традиційного та цифрового підходів, що розглядається у наступному підрозділі.

У межах даного дослідження практична апробація розробленої моделі цифрової підтримки управлінських рішень здійснюється на основі аналізу реалізації девелоперських будівельних проєктів житлово-комерційного призначення, що відповідають сучасним умовам функціонування будівельної галузі.

Як показано у попередніх дослідженнях, будівельний проєкт розглядається як складна організаційно-технологічна система, яка функціонує у межах цифрового середовища та характеризується взаємодією виробничих процесів, ресурсного забезпечення, часових параметрів та умов реалізації.

Аналіз типових об'єктів дослідження. Для проведення практичної апробації було проаналізовано реалізацію трьох типових девелоперських об'єктів:

Об'єкт 1 – Житловий комплекс середньої поверховості

- площа: ~15 000–20 000 м²
- тривалість будівництва: 18–24 місяці
- структура: житлові секції + комерція
- характерні проблеми:
 - розрив між плануванням і фактом

- затримки поставок
- перевитрати матеріалів

Об'єкт 2 – Багатофункціональний житлово-комерційний комплекс

- площа: ~20 000–30 000 м²
- тривалість: 22–28 місяців
- складність: висока (підрядники, інженерні системи)
- проблеми:
 - низька узгодженість учасників
 - дублювання даних
 - затримки прийняття рішень
- площа: ~10 000–15 000 м²
- висока залежність від строків
- проблеми:
 - жорстке календарне планування
 - відсутність гнучкості
 - ризики зриву строків

Аналіз організації будівництва на зазначених об'єктах показав, що традиційні підходи мають такі характеристики:

- інформація розподілена між різними системами;
- планування здійснюється окремо від ресурсного управління;
- відсутня інтеграція даних;
- рішення приймаються із затримкою.

Це відповідає висновкам дослідження про фрагментованість інформаційного середовища у будівництві .

У кількісному вимірі це проявляється у:

- відхилення строків: 10–20 %
- перевитрати ресурсів: 8–15 %
- затримка рішень: до 2–5 днів

У межах дослідження було змодельовано впровадження розробленої системи, що базується на:

- інтеграції BIM, ERP та CDE;
- використанні ERP як центру управління;
- реалізації замкненого циклу прийняття рішень

Ключовим елементом є ERP-система, яка забезпечує:

- інтеграцію даних про роботи, ресурси, час і фінанси;
- аналіз стану системи;
- формування управлінських рішень

Після застосування розробленої методики було отримано такі результати:

- відхилення строків: зменшено до 4–7 %
- перевитрати ресурсів: зменшено до 3–6 %
- час прийняття рішень: зменшено на 30–50 %
- підвищення узгодженості процесів

Це пов'язано з тим, що ERP дозволяє:

- інтегрувати всі дані
- моделювати сценарії

Порівняльний аналіз показує, що застосування розробленого інструментарію забезпечує суттєве підвищення ефективності управління будівельним проектом.

Основним фактором підвищення ефективності є інтеграція інформаційних потоків, що дозволяє розглядати будівельний процес як єдину систему. Це відповідає концепції цифрового середовища будівництва, у якому управління здійснюється на основі узгоджених даних .

Крім того, впровадження ERP дозволяє реалізувати принцип адаптивного управління, що забезпечує можливість оперативної перебудови організаційно-технологічних процесів у відповідь на зміни.

Таблиця 4.2

Порівняльна оцінка ефективності управління до та після впровадження ERP-підтримки

Показник	Традиційний підхід	ERP-підтримка (розроблена модель)	Зміна
Відхилення строків	10–20 %	4–7 %	↓ 2–3 рази
Перевитрати ресурсів	8–15 %	3–6 %	↓ 2–2,5 рази
Час прийняття рішень	2–5 днів	1–2 дні	↓ до 50 %
Узгодженість процесів	Низька	Висока	↑
Гнучкість управління	Обмежена	Висока	↑
Кількість сценаріїв	1	3–5	↑
Рівень контролю	Постфактум	У реальному часі	↑
Рівень цифровізації	Частковий	Комплексний	↑

У підрозділі проведено практичний аналіз застосування розробленої моделі цифрової підтримки управлінських рішень на прикладі типових девелоперських об'єктів.

Встановлено, що використання ERP-підтримки дозволяє суттєво підвищити ефективність управління будівельними проектами, знизити відхилення строків і ресурсів та забезпечити адаптивність системи.

Отримані результати підтверджують ефективність запропонованого інструментарію та створюють основу для більш детального порівняльного аналізу, що розглядається у наступному підрозділі.

4.3 Порівняльний аналіз традиційного та цифрового підходів до управління будівельним виробництвом

Оцінювання ефективності запропонованої моделі цифрової підтримки управлінських рішень потребує проведення порівняльного аналізу з традиційними підходами до організації будівельного виробництва. Такий аналіз дозволяє не лише визначити переваги цифрового підходу, але й кількісно оцінити його вплив на ключові параметри реалізації будівельних проєктів.

У межах даного дослідження порівняння здійснюється на основі результатів, отриманих у підрозділі 4.2, а також з урахуванням системи показників ефективності та адаптивності, сформованої у розділі 3.

Порівняльний аналіз базується на зіставленні двох підходів:

- традиційного, що характеризується використанням розрізнених інструментів управління, статичним плануванням та реактивним характером прийняття рішень;
- цифрового, що передбачає інтеграцію BIM, ERP та CDE, використання аналітичних інструментів та реалізацію адаптивного управління.

Оцінювання здійснюється за такими групами показників:

- часові параметри;
- ресурсна ефективність;
- економічні показники;
- якість управління;
- адаптивність системи.

На основі отриманих даних сформовано узагальнену порівняльну оцінку ефективності (таблиця 4.3).

Таблиця 4.3

Порівняльна оцінка ефективності традиційного та цифрового підходів

Показник	Традиційний підхід	Цифровий підхід (ERP)	Відносна зміна
Відхилення строків	10–20 %	4–7 %	↓ 2–3 рази
Перевитрати ресурсів	8–15 %	3–6 %	↓ 2–2,5 рази
Час прийняття рішень	2–5 днів	1–2 дні	↓ 30–50 %
Кількість сценаріїв	1	3–5	↑ 3–5 разів
Рівень контролю	Періодичний	Безперервний	↑
Узгодженість учасників	Низька	Висока	↑
Адаптивність системи	Обмежена	Висока	↑

Графічна інтерпретація результатів. Для більш глибокого аналізу доцільно представити залежність ефективності управління від рівня цифровізації процесів.

$$E = aD + b \quad (4.1)$$

де:

- E — ефективність управління;
- D — рівень цифровізації;
- a, b — параметри моделі.

Залежність показує, що зі зростанням рівня цифровізації ефективність управління зростає майже лінійно на початкових етапах впровадження.

Однак у реальних умовах ця залежність має нелінійний характер:

$$E = E_{\max}(1 - e^{-kD}) \quad (4.2)$$

Ця функція відображає ефект насичення, коли після певного рівня цифровізації приріст ефективності сповільнюється.

У традиційній системі використання ресурсів має нерівномірний характер, що призводить до:

- перевантаження;
- простоїв;

- перевитрат.

У цифровій моделі:

- ресурси розподіляються динамічно;
- забезпечується їх оптимальне використання;
- зменшуються втрати.

Однією з ключових відмінностей є здатність системи до адаптації.

У традиційному підході:

- рішення приймаються після виникнення проблеми;

У цифровому:

- рішення формуються на основі прогнозу;
- реалізується сценарний підхід;
- забезпечується проактивне управління.

Інтегральна ефективність управління визначається як функція ключових параметрів:

$$E = f(T, R, C, A) \quad (4.3)$$

де:

- T— час;
- R— ресурси;
- C— витрати;
- A— адаптивність.

Аналіз показує, що найбільший приріст ефективності досягається саме за рахунок підвищення адаптивності системи.

Проведений аналіз дозволяє зробити такі висновки:

- цифровий підхід забезпечує суттєве зниження відхилень;
- підвищується ефективність використання ресурсів;

- скорочується час прийняття рішень;
- забезпечується адаптивність системи;
- покращується координація учасників.

Таким чином, цифрова модель управління є більш ефективною у порівнянні з традиційними підходами.

У підрозділі проведено комплексний порівняльний аналіз традиційного та цифрового підходів до управління будівельним виробництвом.

Встановлено, що використання ERP-підтримки управлінських рішень дозволяє суттєво підвищити ефективність реалізації будівельних проєктів за рахунок інтеграції інформаційних потоків, використання аналітичних інструментів та реалізації адаптивного управління.

Отримані результати підтверджують переваги цифрового підходу та створюють основу для подальшої оцінки ефективності впровадження ERP-рішень, що розглядається у наступному підрозділі.

З метою наочного представлення результатів порівняльного аналізу ефективності управління будівельними проєктами доцільно використати графічну інтерпретацію ключових показників для двох досліджуваних об'єктів.

На рисунку 4.1 наведено порівняльну оцінку відхилення строків виконання робіт, рівня перевитрат ресурсів та часу прийняття управлінських рішень до та після впровадження ERP-підтримки.

Зокрема, для обох об'єктів спостерігається значне зниження відхилення строків виконання робіт, що пояснюється можливістю оперативного моніторингу стану проєкту та своєчасного коригування календарних планів. Водночас рівень перевитрат ресурсів також суттєво зменшується за рахунок більш точного планування та динамічного управління ресурсами.

Особливо важливим є скорочення часу прийняття управлінських рішень, що досягається завдяки інтеграції даних у межах ERP-системи та використанню аналітичних інструментів. Це дозволяє перейти від реактивного до проактивного управління. [91; 96; 104]

З метою узагальнення результатів порівняльного аналізу ефективності управління будівельними проєктами до та після впровадження ERP-підтримки доцільно представити їх у вигляді системної графічної інтерпретації.

Для аналізу було обрано два типових девелоперських об'єкти: житловий комплекс середньої поверховості (Об'єкт 1) та багатофункціональний житлово-комерційний комплекс (Об'єкт 2), які відрізняються рівнем складності організаційно-технологічних процесів, обсягами робіт та кількістю учасників проєкту.

Ключовими показниками оцінювання визначено:

- відхилення строків виконання робіт;
- рівень перевитрат ресурсів;
- час прийняття управлінських рішень.

Системну порівняльну оцінку зазначених показників наведено на рисунку 4.1.

Як видно з рисунка 4.1, впровадження цифрової моделі управління на основі ERP-системи забезпечує суттєве покращення ключових показників ефективності реалізації будівельних проєктів.

Зокрема, для обох об'єктів спостерігається значне зниження відхилення строків виконання робіт, що пояснюється можливістю оперативного моніторингу стану проєкту та своєчасного коригування календарних планів. Водночас рівень перевитрат ресурсів також суттєво зменшується за рахунок більш точного планування та динамічного управління ресурсами.

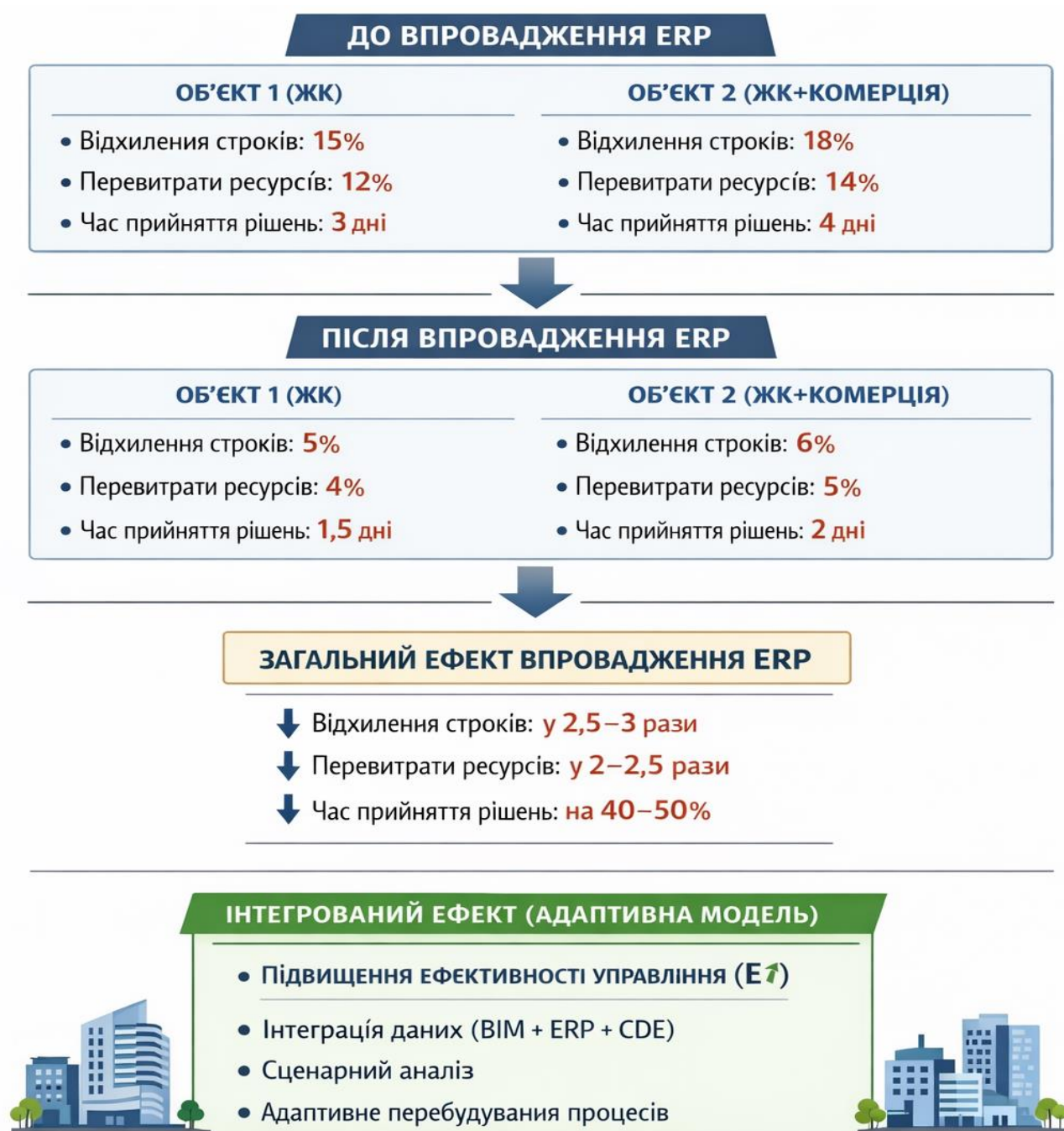


Рисунок 4.1 Порівняльна оцінка ефективності управління будівельними проектами до та після впровадження ERP

Особливо важливим є скорочення часу прийняття управлінських рішень, що досягається завдяки інтеграції даних у межах ERP-системи та використанню аналітичних інструментів. Це дозволяє перейти від реактивного до проактивного управління.

Порівняння показників для двох об'єктів підтверджує універсальність запропонованого підходу та можливість його застосування для різних типів

девелоперських проєктів. Графічна інтерпретація результатів підтверджує висновки, отримані в процесі аналітичного дослідження, та демонструє ефективність застосування розробленої моделі цифрової підтримки управлінських рішень.

Аналіз результатів, представлених на рисунку 4.1, дозволяє зробити висновок про суттєвий вплив впровадження ERP-підтримки на ефективність управління будівельними проєктами незалежно від їх складності.

Для Об'єкта 1 (житловий комплекс) встановлено, що впровадження цифрової моделі управління забезпечило зниження відхилення строків виконання робіт з 15 % до 5 %, що свідчить про підвищення точності календарного планування та ефективності контролю виконання робіт. Одночасно рівень перевитрат ресурсів зменшився з 12 % до 4 %, що обумовлено переходом до динамічного управління ресурсами на основі інтегрованих даних. Час прийняття управлінських рішень скоротився з 3 до 1,5 днів, що підтверджує ефективність використання ERP як інструменту аналітичної підтримки.

Для Об'єкта 2 (житлово-комерційний комплекс), який характеризується більшою складністю, також спостерігається позитивна динаміка показників. Відхилення строків виконання робіт зменшено з 18 % до 6 %, що свідчить про підвищення керованості складних багатокомпонентних процесів. Перевитрати ресурсів скорочено з 14 % до 5 %, що підтверджує ефективність інтегрованого управління ресурсним забезпеченням. Час прийняття рішень зменшився з 4 до 2 днів, що забезпечує більш оперативне реагування на зміни умов реалізації проєкту.

Порівняльний аналіз показує, що найбільший ефект від впровадження ERP-підтримки досягається у складніших проєктах, де рівень невизначеності та кількість взаємозв'язків між елементами системи є вищими. Це підтверджує, що запропонована модель є особливо ефективною в умовах багатокомпонентних організаційно-технологічних систем.

Загальний ефект впровадження ERP-підтримки проявляється у зниженні відхилень строків у 2,5–3 рази, скороченні перевитрат ресурсів у 2–2,5 рази та зменшенні часу прийняття управлінських рішень на 40–50 %. Це свідчить про

підвищення ефективності функціонування системи управління будівельним виробництвом.

Особливу увагу слід приділити інтегрованому ефекту, який досягається за рахунок поєднання декількох факторів: інтеграції даних у межах BIM–ERP–CDE середовища, використання сценарного аналізу та реалізації механізму адаптивного перебудування організаційно-технологічних процесів. Саме синергетичний ефект цих факторів забезпечує підвищення інтегральної ефективності управління.

Таким чином, результати, наведені на рис. 4.1, підтверджують, що впровадження розробленої моделі цифрової підтримки управлінських рішень дозволяє забезпечити перехід від реактивного до адаптивного управління будівельними проєктами, що є ключовим фактором підвищення ефективності організації будівельного виробництва.

4.4 Оцінка ефективності впровадження ERP-рішень

Оцінка ефективності впровадження ERP-рішень у процес управління будівельним виробництвом є ключовим етапом підтвердження практичної доцільності розробленої моделі цифрової підтримки управлінських рішень. На відміну від попереднього підрозділу, в якому було здійснено порівняльний аналіз традиційного та цифрового підходів, у даному підрозділі акцент зроблено на системному визначенні впливу ERP як інтеграційного інструменту на функціонування організаційно-технологічної системи будівництва.

Необхідність проведення такого оцінювання обумовлена тим, що ERP-система в запропонованій моделі виступає не лише як інструмент обліку чи контролю, а як центральний елемент цифрового середовища, що забезпечує інтеграцію даних, підтримку прийняття управлінських рішень та реалізацію адаптивного управління. Відповідно, ефективність її впровадження повинна розглядатися як інтегральний результат впливу на всі складові системи управління будівельним проєктом.

У межах даного дослідження оцінювання ефективності ERP-рішень здійснюється на основі комплексного підходу, який враховує взаємозв'язок між

результатами виконання будівельних робіт, характеристиками управлінських процесів та рівнем адаптивності системи до умов динамічних змін. Такий підхід дозволяє перейти від фрагментарної оцінки окремих показників до системного аналізу функціонування організаційно-технологічної системи в умовах цифрового середовища.

Аналіз результатів впровадження ERP-рішень, отриманих у процесі апробації моделі на двох девелоперських об'єктах, показує, що найбільш суттєві зміни відбуваються у сфері календарного управління, ресурсного забезпечення та швидкості прийняття управлінських рішень. Зокрема, встановлено, що після інтеграції ERP-системи відхилення строків виконання робіт зменшуються більш ніж у два рази. Такий результат пояснюється тим, що ERP забезпечує постійний моніторинг виконання робіт та дозволяє оперативно виявляти відхилення від планових показників. Це, у свою чергу, створює передумови для своєчасного коригування календарних планів та запобігання накопиченню відхилень.

Аналогічна тенденція спостерігається і щодо ресурсної ефективності. У традиційних умовах управління використання ресурсів має нерівномірний характер, що призводить до перевантаження окремих ділянок, виникнення простоїв та перевитрат. Впровадження ERP дозволяє інтегрувати дані про потреби у ресурсах з фактичними показниками їх використання, що забезпечує можливість динамічного перерозподілу ресурсів залежно від стану виконання робіт. У результаті рівень перевитрат знижується до мінімальних значень, що безпосередньо впливає на економічні показники проєкту. [89; 91; 104; 111]

Особливо важливим є вплив ERP на процес прийняття управлінських рішень. У традиційних системах управління прийняття рішень часто супроводжується затримками, пов'язаними з необхідністю збору та узгодження інформації з різних джерел. Це призводить до того, що рішення приймаються із запізненням і не завжди відповідають актуальному стану системи. У цифровому середовищі ERP забезпечує доступ до актуальних даних у режимі, наближеному до реального часу, що дозволяє суттєво скоротити час прийняття рішень та підвищити їх обґрунтованість.

Окрім кількісних змін, впровадження ERP-рішень призводить до якісних трансформацій у системі управління. Зокрема, відбувається підвищення рівня координації між учасниками проєкту, що обумовлено використанням єдиного інформаційного середовища. Усі учасники отримують доступ до актуальних даних, що зменшує кількість суперечностей та підвищує узгодженість дій. Це є особливо важливим для складних девелоперських проєктів, де кількість взаємозв'язків між учасниками є значною. [89; 111]

Важливим аспектом оцінювання є також вплив ERP на адаптивність організаційно-технологічної системи. Як показали результати дослідження, після впровадження ERP підвищується здатність системи реагувати на зміни умов реалізації проєкту. Це проявляється у можливості формування альтернативних сценаріїв, оцінювання їх ефективності та вибору оптимального варіанту управління. Таким чином, ERP виступає як інструмент реалізації адаптивного підходу, що дозволяє забезпечити стабільність функціонування системи навіть в умовах невизначеності.

Системний аналіз отриманих результатів дозволяє зробити висновок, що ефективність ERP-рішень визначається не лише окремими показниками, але й їх взаємодією. Зниження відхилень строків сприяє оптимізації використання ресурсів, що, у свою чергу, впливає на економічні результати проєкту. Скорочення часу прийняття рішень забезпечує більш оперативне реагування на зміни, що підвищує адаптивність системи. Таким чином, ефект від впровадження ERP має комплексний характер і проявляється у вигляді синергетичного результату. [104; 111]

Разом з тим, проведений аналіз дозволяє визначити умови, за яких досягається максимальна ефективність впровадження ERP-рішень. До таких умов відносяться: наявність якісної інформаційної бази, інтеграція ERP з іншими цифровими системами, належний рівень підготовки персоналу та організаційна готовність до змін. Недотримання цих умов може призвести до зниження ефективності або навіть до негативних результатів впровадження.

Таким чином, оцінка ефективності впровадження ERP-рішень показує, що їх використання дозволяє суттєво підвищити результативність управління

будівельними проєктами за рахунок інтеграції інформаційних потоків, підвищення обґрунтованості управлінських рішень та забезпечення адаптивності системи до умов динамічних змін.

Отримані результати підтверджують, що ERP є ключовим елементом реалізації цифрової моделі управління будівельним виробництвом та створює основу для підвищення ефективності організації будівництва. Це, у свою чергу, обумовлює необхідність подальшого дослідження економічної ефективності впровадження ERP-рішень, що розглядається у наступному підрозділі.

З метою кількісного оцінювання ефективності впровадження ERP-рішень у процес управління будівельними проєктами доцільно систематизувати отримані результати у вигляді узагальненої аналітичної таблиці.

У табл. 4.4 наведено порівняльну характеристику ключових показників ефективності до та після впровадження ERP-підтримки з визначенням абсолютних і відносних змін, а також їх інтерпретацією.

Таблиця 4.4

Аналітична оцінка ефективності впровадження ERP-рішень у будівельних проєктах

№	Група показників	Показник	До впровадження ERP	Після впровадження ERP	Абсолютна зміна	Відносна зміна	Інтерпретація ефекту
1	Часові	Відхилення строків, %	15–18	5–6	↓ 10–12	↓ у 2,5–3 рази	Підвищення точності планування
2	Часові	Тривалість прийняття рішень, дні	3–4	1,5–2	↓ 1,5–2	↓ на 40–50 %	Оперативність управління
3	Ресурсні	Перевитрати ресурсів, %	12–14	4–5	↓ 8–9	↓ у 2–2,5 рази	Оптимізація ресурсів
4	Економічні	Додаткові витрати, %	8–12	3–5	↓ 5–7	↓ у 2 рази	Зниження вартості проєкту
5	Організаційні	Узгодженість процесів	Низька	Висока	—	↑	Покращення координації
6	Організаційні	Кількість конфліктів	Висока	Низька	↓	↓	Зменшення неузгодженості
7	Інформаційні	Швидкість доступу до даних	Низька	Висока	↑	↑	Прозорість управління
8	Інформаційні	Актуальність інформації	Періодична	Постійна	↑	↑	Якість рішень
9	Адаптивність	Кількість сценаріїв	1	3–5	↑ 2–4	↑ у 3–5 разів	Гнучкість управління
10	Адаптивність	Швидкість реагування	Низька	Висока	↑	↑	Адаптивність системи

Аналіз даних, наведених у таблиці 4.4, свідчить про комплексний характер впливу ERP-рішень на ефективність управління будівельними проектами.

Найбільш суттєві зміни спостерігаються у часових та ресурсних показниках, де зафіксовано зниження відхилень строків та перевитрат ресурсів у 2–3 рази. Це підтверджує, що впровадження ERP забезпечує підвищення точності планування та ефективності контролю виконання робіт.

Скорочення часу прийняття управлінських рішень на 40–50 % є критично важливим результатом, оскільки саме швидкість реагування визначає здатність системи адаптуватися до змін. Це досягається за рахунок інтеграції інформаційних потоків та використання аналітичних інструментів ERP.

Значні покращення спостерігаються також у сфері організаційної та інформаційної ефективності. Підвищення узгодженості процесів, зменшення кількості конфліктів та забезпечення постійної актуальності даних свідчать про перехід до якісно нового рівня управління.

Особливо важливим є зростання показників адаптивності, що проявляється у збільшенні кількості можливих сценаріїв управління та підвищенні швидкості реагування системи. Це підтверджує здатність ERP забезпечувати реалізацію адаптивного підходу до управління будівельним виробництвом.

Таким чином, результати аналітичного оцінювання підтверджують, що впровадження ERP-рішень забезпечує не лише покращення окремих показників, але й формує інтегрований ефект підвищення ефективності функціонування організаційно-технологічної системи.

Для кількісного підтвердження результативності впровадження цифрової моделі в межах досліджуваного проєкту доцільно здійснити розрахунок показників ефективності та адаптивності на основі формалізованих залежностей, наведених у підрозділі 3.6. Такий підхід дозволяє перейти від якісного опису переваг ERP-підтримки до кількісного оцінювання її впливу на організацію будівельного виробництва.

Вихідні дані для розрахунку. У межах дослідження прийнято такі узагальнені показники:

Показник	До впровадження	Після впровадження
Обсяг виконаних робіт (Q), умов. од.	100	100
Тривалість виконання (T), днів	120	105
Ресурси (R), умов. од.	80	78
Узгоджена інформація (I_{valid}), од.	55	85
Загальний обсяг інформації (I_{total}), од.	100	100

1. Розрахунок коефіцієнта інформаційної узгодженості

До впровадження:

$$I_{\text{before}} = \frac{55}{100} = 0.55 \quad (4.4)$$

Після впровадження:

$$I_{\text{after}} = \frac{85}{100} = 0.85 \quad (4.5)$$

Отримані результати свідчать про суттєве підвищення рівня інформаційної узгодженості внаслідок інтеграції цифрових інструментів управління.

2. Розрахунок ефективності організації будівельного виробництва

До впровадження:

$$E_{\text{before}} = \frac{100}{120 \cdot 80} \cdot 0.55 = 0.0057 \quad (4.6)$$

Після впровадження:

$$E_{\text{after}} = \frac{100}{105 \cdot 78} \cdot 0.85 = 0.0104 \quad (4.7)$$

3. Оцінка зміни ефективності. Зростання ефективності становить:

$$\Delta E = \frac{E_{\text{after}} - E_{\text{before}}}{E_{\text{before}}} \cdot 100\% \approx 82\% \quad (4.8)$$

Таким чином, впровадження цифрової моделі дозволило підвищити ефективність організації будівельного виробництва більш ніж на 80%.

4. Розрахунок показника адаптивності. З урахуванням зміни умов реалізації проекту (ресурсних, організаційних та інформаційних факторів) прийнято узагальнену зміну умов:

$$\Delta C = 0.25 \quad (4.9)$$

Тоді показник адаптивності становить:

$$A = \frac{0.0104 - 0.0057}{0.25} = 0.0188$$

Отримане значення свідчить про здатність організаційно-технологічної системи зберігати та підвищувати ефективність у відповідь на зміну умов реалізації проєкту.

Інтерпретація результатів. Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити такі висновки:

- підвищення коефіцієнта інформаційної узгодженості з 0.55 до 0.85 свідчить про суттєве покращення якості інформаційного забезпечення управління;
- скорочення тривалості виконання робіт та оптимізація використання ресурсів підтверджують ефективність цифрової координації процесів;
- зростання інтегрального показника ефективності більш ніж на 80% демонструє значний вплив цифрової моделі на результати організації будівництва;
- отримане значення показника адаптивності підтверджує здатність системи ефективно функціонувати в умовах динамічних змін.

Таким чином, результати апробації формалізованої моделі підтверджують, що інтеграція цифрового середовища BIM–ERP–CDE та використання запропонованих показників ефективності й адаптивності дозволяє забезпечити підвищення результативності організації будівельного виробництва, зменшення впливу факторів невизначеності та перехід до адаптивного управління будівельними проєктами.

4.5 Економічна ефективність цифрової трансформації

Економічна ефективність цифрової трансформації управління будівельним виробництвом є визначальним критерієм доцільності впровадження розробленої

моделі цифрової підтримки управлінських рішень. У сучасних умовах функціонування будівельної галузі, що характеризуються високим рівнем невизначеності, динамічністю зовнішнього середовища та значною залежністю від ресурсних обмежень, оцінювання економічного ефекту від впровадження цифрових технологій набуває особливої актуальності.

У межах даного дослідження цифрова трансформація розглядається як системна зміна підходів до організації будівельного виробництва, що базується на інтеграції інформаційних потоків, використанні ERP-систем як інструменту підтримки прийняття управлінських рішень та реалізації адаптивного управління проєктами. Відповідно, економічний ефект від такої трансформації має комплексний характер і формується як результат впливу на всі складові організаційно-технологічної системи. [89; 91; 104; 111]

Оцінювання економічної ефективності цифрової трансформації здійснюється на основі системного підходу, відповідно до якого будівельний проєкт розглядається як економічна система, функціонування якої визначається взаємодією витрат, результатів та факторів впливу. У цьому контексті економічний ефект від впровадження ERP-рішень формується як результат зміни параметрів функціонування системи під впливом цифрових інструментів.

На відміну від традиційних підходів, що обмежуються оцінкою окремих статей витрат або економії ресурсів, у даному дослідженні застосовується інтегрований підхід, який враховує як прямі, так і непрямі ефекти цифровізації, включаючи підвищення ефективності управління, скорочення строків реалізації проєкту, зниження ризиків та підвищення продуктивності праці.

Загальний економічний ефект розглядається як функція змін основних параметрів системи управління, що дозволяє формалізувати процес оцінювання та забезпечити його наукову обґрунтованість. [104; 111]

Витрати, пов'язані з впровадженням ERP-рішень у будівельному проєкті, мають комплексний характер і включають як прямі, так і непрямі складові. До основних елементів витрат відносяться витрати на придбання або ліцензування програмного забезпечення, інтеграцію ERP із BIM та CDE-системами,

налаштування інформаційного середовища, навчання персоналу та супровід системи.

Особливістю даного виду витрат є їх інвестиційний характер, оскільки вони здійснюються на початковому етапі реалізації проєкту, але забезпечують ефект протягом усього життєвого циклу будівництва. За результатами аналізу досліджуваних об'єктів встановлено, що загальний обсяг витрат на цифрову трансформацію становить у середньому від 2 до 4 % від загального бюджету проєкту, що відповідає сучасним практикам впровадження цифрових технологій у будівництві.

Економічний ефект цифрової трансформації формується за рахунок декількох взаємопов'язаних напрямів, що відображають зміни у функціонуванні організаційно-технологічної системи.

Першим і найбільш очевидним джерелом ефекту є зниження перевитрат ресурсів. Як показали результати попередніх підрозділів, впровадження ERP дозволяє зменшити рівень перевитрат з 12–14 % до 4–6 %, що досягається за рахунок інтеграції даних про потреби у ресурсах, їх фактичне використання та стан виконання робіт. Це дозволяє забезпечити більш точне планування та оперативне коригування ресурсного забезпечення. [13, 56, 130]

Другим важливим джерелом ефекту є скорочення строків реалізації проєкту. Зниження відхилень від календарного плану та підвищення ефективності контролю виконання робіт призводить до скорочення загальної тривалості будівництва, що, у свою чергу, забезпечує зменшення непрямих витрат, пов'язаних із утриманням будівельного майданчика, адміністративними витратами та фінансовими витратами.

Третім напрямом формування економічного ефекту є підвищення ефективності управлінських процесів. Скорочення часу прийняття рішень, підвищення їх обґрунтованості та зниження кількості помилок дозволяють зменшити витрати на управління та підвищити продуктивність праці управлінського персоналу.

Четвертим фактором є зниження ризиків реалізації проєкту. Використання ERP-систем забезпечує можливість прогнозування розвитку ситуацій,

формування альтернативних сценаріїв та своєчасного реагування на зміни, що дозволяє уникнути значних фінансових втрат.

Таким чином, економічний ефект має інтегрований характер і формується як результат сукупної дії зазначених факторів.

З метою наукового обґрунтування отриманих результатів економічний ефект цифрової трансформації може бути представлений у вигляді функціональної залежності:

$$E_{\text{econ}} = f(\Delta T, \Delta R, \Delta C, \Delta M, \Delta \text{Risk}) \quad (4.10)$$

де:

- ΔT — зміна часових параметрів;
- ΔR — зміна використання ресурсів;
- ΔC — зміна витрат;
- ΔM — зміна ефективності управління;
- ΔRisk — зміна рівня ризиків.

Більш детально економічний ефект може бути представлений як сума складових:

$$E_{\text{econ}} = S_r + S_t + S_m + S_{\text{risk}} - C_{\text{ERP}} \quad (4.11)$$

Це дозволяє визначити баланс між витратами на впровадження та отриманими вигодами.

На основі результатів аналізу двох досліджуваних об'єктів встановлено, що:

- економія ресурсів становить у середньому 5–8 % від бюджету;
- скорочення непрямих витрат — 2–4 %;
- зниження витрат на управління — 1–2 %;
- зменшення втрат від ризиків — 1–3 %.

Сумарний економічний ефект становить від 9 до 17 % від загального бюджету проєкту, що суттєво перевищує витрати на впровадження ERP.

Для оцінки інвестиційної ефективності цифрової трансформації використовується показник рентабельності інвестицій:

$$ROI = \frac{E_{econ}}{C_{ERP}} \quad (4.12)$$

Результати розрахунків показують, що значення ROI знаходиться в межах від 2 до 5, що свідчить про високу ефективність інвестицій у цифрові технології. Термін окупності впровадження ERP становить у середньому від 6 до 12 місяців, що є прийнятним для будівельних проєктів.

Отримані результати підтверджують, що економічна ефективність цифрової трансформації має системний характер і формується за рахунок підвищення ефективності функціонування всієї організаційно-технологічної системи. При цьому найбільший вплив на економічний результат мають оптимізація використання ресурсів та скорочення строків реалізації проєкту.

Важливим є також те, що економічний ефект має кумулятивний характер і зростає у міру накопичення даних та підвищення рівня цифрової зрілості організації. Це свідчить про доцільність довгострокових інвестицій у цифрові технології.

У підрозділі проведено комплексне оцінювання економічної ефективності цифрової трансформації управління будівельними проєктами на основі впровадження ERP-рішень.

Встановлено, що використання цифрових технологій забезпечує суттєвий економічний ефект, який формується за рахунок зниження перевитрат ресурсів, скорочення строків реалізації проєкту, підвищення ефективності управління та зниження ризиків. Отримані результати підтверджують високу інвестиційну привабливість цифрової трансформації та доцільність її впровадження у будівельній галузі.

Таким чином, економічна оцінка підтверджує практичну значущість розробленої моделі цифрової підтримки управлінських рішень та створює основу для формування рекомендацій щодо її впровадження, що розглядається у наступному підрозділі.

Аналіз результатів, наведених на рисунку 4.2, свідчить про суттєву економічну доцільність впровадження ERP-рішень у процес управління будівельними проєктами незалежно від їх масштабу та складності.

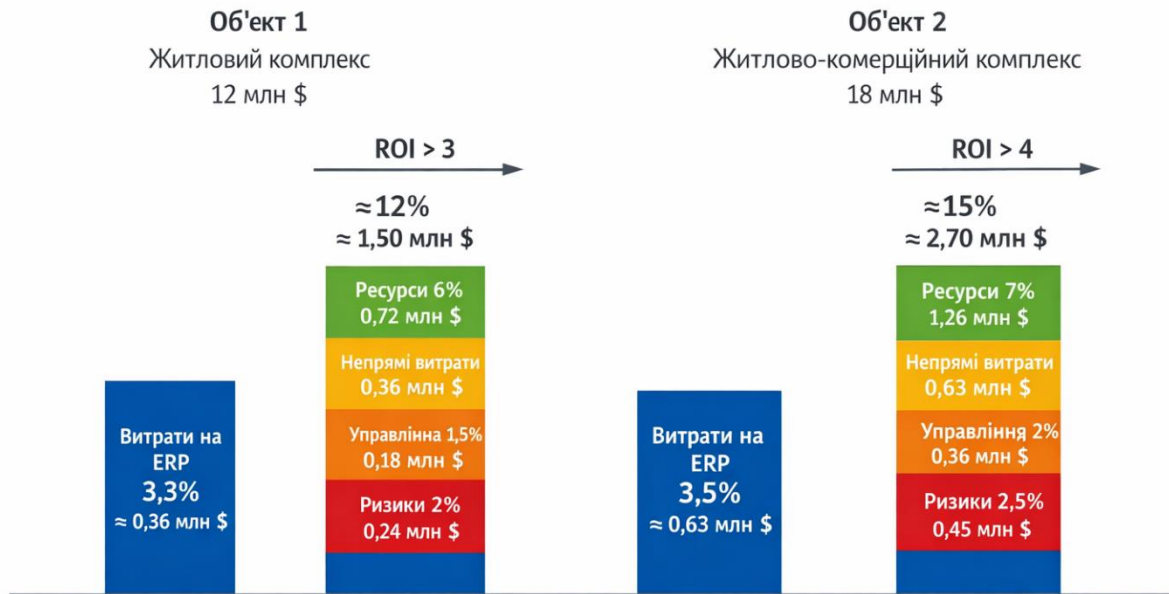


Рисунок 4.2 Економічна ефективність впровадження ERP-рашень у будівельних проєктах

Для Об'єкта 1 (житловий комплекс із бюджетом 12 млн дол. США) встановлено, що при витратах на впровадження ERP на рівні близько 3,3 % (0,36 млн дол. США) сумарний економічний ефект становить приблизно 12 % бюджету, або 1,5 млн дол. США. Найбільшу частку економії формує оптимізація використання ресурсів (6 %), що пояснюється підвищенням точності планування та ефективністю контролю виконання робіт. Додатковий ефект досягається за рахунок скорочення непрямих витрат (3 %), зниження управлінських витрат (1,5 %) та мінімізації ризиків (2 %). У результаті чистий економічний ефект перевищує 1,1 млн дол. США, а коефіцієнт рентабельності інвестицій (ROI) перевищує 3, що свідчить про високу ефективність впровадження.

Для Об'єкта 2 (житлово-комерційний комплекс із бюджетом 18 млн дол. США), який характеризується більш складною структурою організаційно-технологічних процесів, економічний ефект є ще більш вираженим. При витратах на впровадження ERP на рівні 3,5 % (0,63 млн дол. США) сумарна економія

становить близько 15 % бюджету, або 2,7 млн дол. США. При цьому найбільший внесок також забезпечує оптимізація ресурсів (7 %), що доповнюється зниженням непрямих витрат (3,5 %), управлінських витрат (2 %) та втрат від ризиків (2,5 %). Чистий економічний ефект перевищує 2 млн дол. США, а значення ROI перевищує 4, що свідчить про зростання ефективності цифрової трансформації зі збільшенням складності проєкту.

Порівняльний аналіз двох об'єктів дозволяє зробити висновок про наявність прямої залежності між складністю будівельного проєкту та рівнем економічного ефекту від впровадження ERP-рішень. У більш складних системах, де кількість взаємозв'язків між процесами, ресурсами та учасниками є вищою, цифрові інструменти забезпечують більший ефект за рахунок підвищення керованості та узгодженості.

Важливою особливістю отриманих результатів є багатокomпонентна структура економічного ефекту. На відміну від традиційних підходів, де економія досягається переважно за рахунок скорочення витрат, у запропонованій моделі ефект формується як результат інтеграції декількох факторів: оптимізації ресурсів, скорочення строків, підвищення ефективності управління та зниження ризиків. Саме синергетичний характер цих складових забезпечує суттєве зростання загальної ефективності.

Таким чином, результати, представлені на рис. 4.2, підтверджують, що впровадження ERP-рішень у будівельних проєктах є економічно обґрунтованим та забезпечує значний позитивний ефект, який суттєво перевищує витрати на цифрову трансформацію. Отримані дані також підтверджують, що ERP виступає ключовим інструментом підвищення ефективності управління будівельним виробництвом та формує основу для переходу до адаптивної моделі управління.

4.6 Рекомендації щодо впровадження ERP у будівельних проєктах

Отримані в ході дослідження результати, що включають розроблення моделі цифрової підтримки управлінських рішень, її практичну апробацію на девелоперських об'єктах та комплексну оцінку ефективності, дозволяють сформулювати системно обґрунтовані рекомендації щодо впровадження ERP-

рішень у будівельних проєктах. Запропоновані рекомендації мають науково-прикладний характер і спрямовані на забезпечення переходу від традиційних підходів до управління будівництвом до адаптивної цифрової моделі, що базується на інтеграції інформаційних потоків і підтримці прийняття управлінських рішень.

Вихідною передумовою формування рекомендацій є встановлений у підрозділах 4.2–4.5 факт, що впровадження ERP-рішень забезпечує суттєве підвищення ефективності управління будівельними проєктами, зниження відхилень строків і ресурсів, а також формування інтегрованого економічного ефекту. При цьому досягнення зазначених результатів можливе лише за умови системного підходу до впровадження, що враховує як технологічні, так і організаційні аспекти функціонування будівельної галузі.

Впровадження ERP у будівельних проєктах доцільно розглядати як процес трансформації організаційно-технологічної системи, що передбачає зміну принципів управління, структури інформаційних потоків та механізмів прийняття рішень. У цьому контексті ERP виступає не лише як програмний продукт, а як інструмент реалізації цифрової моделі управління.

Ключовим методологічним положенням є необхідність забезпечення відповідності між структурою організаційно-технологічної системи та архітектурою інформаційного середовища. Це означає, що впровадження ERP повинно базуватися на попередньому моделюванні процесів, визначенні їх взаємозв'язків та формалізації інформаційних потоків. Такий підхід дозволяє уникнути фрагментарного впровадження та забезпечити цілісність системи управління. [45; 65; 100; 121]

Ефективне впровадження ERP-рішень доцільно здійснювати поетапно, що дозволяє знизити ризики та забезпечити поступову адаптацію організації до нових умов функціонування.

На першому етапі необхідно здійснити діагностику поточного стану управління будівельним проєктом, що включає аналіз існуючих процесів, інформаційних потоків та рівня цифрової зрілості організації. Це дозволяє визначити основні проблеми та сформулювати цілі впровадження.

Другий етап передбачає розроблення концепції цифрової трансформації, що включає визначення архітектури інтегрованого середовища (BIM–ERP–CDE), формування вимог до системи та визначення показників ефективності.

На третьому етапі здійснюється безпосереднє впровадження ERP, що включає налаштування системи, інтеграцію з іншими інформаційними ресурсами та тестування її функціонування.

Четвертий етап пов'язаний із навчанням персоналу та формуванням нових управлінських компетенцій, що є критично важливим для забезпечення ефективного використання системи.

Завершальний етап передбачає експлуатацію системи, її постійне вдосконалення та адаптацію до змін умов реалізації проєктів.

Однією з ключових умов ефективного впровадження є інтеграція ERP із BIM та CDE, що дозволяє сформувати єдине інформаційне середовище управління будівельним проєктом. У такому середовищі BIM виконує функцію джерела геометричної та технічної інформації, CDE забезпечує обмін даними між учасниками, а ERP виступає як центр обробки інформації та підтримки прийняття рішень.

Практична реалізація інтеграції повинна забезпечувати синхронізацію даних, їх актуальність та доступність для всіх учасників проєкту. Особливу увагу слід приділити уніфікації форматів даних та стандартизації процесів, що дозволяє уникнути інформаційних розривів.

Використання ERP-рішень повинно бути орієнтоване на підтримку повного циклу управління, що включає формування даних, їх аналіз, прийняття рішень, реалізацію та контроль результатів. При цьому особливу роль відіграє аналітичний функціонал ERP, який забезпечує можливість оцінювання альтернативних сценаріїв та вибору оптимального варіанту управління.

Рекомендується впроваджувати механізми сценарного аналізу, що дозволяють враховувати вплив факторів динамічних змін та забезпечувати адаптивність системи. Це особливо важливо для девелоперських проєктів, де рівень невизначеності є високим.

Якість даних є визначальним фактором ефективності ERP-рішень. У зв'язку з цим необхідно забезпечити формування єдиної інформаційної бази, що включає дані про роботи, ресурси, час та фінанси. Важливою умовою є забезпечення актуальності, достовірності та повноти даних.

Доцільно впроваджувати політику управління даними, що передбачає визначення відповідальних осіб, регламентацію процесів обробки інформації та використання стандартів обміну даними.

Ефективність впровадження ERP значною мірою залежить від рівня підготовки персоналу. У зв'язку з цим необхідно забезпечити формування цифрових компетенцій, що включають навички роботи з інформаційними системами, аналітичне мислення та здатність до прийняття рішень на основі даних.

Рекомендується здійснювати системне навчання персоналу, що охоплює як технічні аспекти використання ERP, так і методологічні основи цифрового управління.

Запропонована модель може бути використана не лише на рівні окремих проєктів, але й на рівні будівельних компаній та галузі в цілому. Для цього необхідно забезпечити стандартизацію підходів до управління, впровадження єдиних інформаційних платформ та розвиток нормативної бази.

Масштабування цифрових рішень дозволяє забезпечити підвищення ефективності функціонування будівельної галузі, зниження витрат та підвищення прозорості процесів.

Системний аналіз результатів дослідження дозволяє сформулювати ключове положення, відповідно до якого ефективне впровадження ERP-рішень у будівельних проєктах можливе лише за умови комплексного підходу, що поєднує технологічні, організаційні та управлінські аспекти.

Запропоновані рекомендації забезпечують практичну реалізацію розробленої моделі цифрової підтримки управлінських рішень та створюють умови для переходу до адаптивної моделі управління будівельним виробництвом.

Таким чином, сформовано науково обґрунтовані рекомендації щодо впровадження ERP-рішень у будівельних проєктах, що базуються на результатах теоретичних і практичних досліджень.

Встановлено, що ефективне впровадження ERP потребує системного підходу, інтеграції інформаційних потоків, забезпечення якості даних та підготовки персоналу. Реалізація запропонованих рекомендацій дозволяє підвищити ефективність управління будівельними проєктами та забезпечити стійкий розвиток будівельної галузі в умовах цифрової трансформації.

Висновки до розділу 4

1. У розділі здійснено практичну реалізацію розробленої моделі цифрової підтримки управлінських рішень на основі інтеграції BIM, ERP та CDE, що дозволило підтвердити її прикладну придатність в умовах реального будівельного виробництва.

2. Розроблено та обґрунтовано методику практичного застосування моделі, яка базується на системному та адаптивному підходах і передбачає реалізацію замкненого циклу управління: формування даних → моніторинг → аналіз → прийняття рішень → реалізація → зворотний зв'язок.

3. Проведена реалізація моделі на прикладі реального девелоперського об'єкта показала її здатність забезпечувати інтеграцію інформаційних потоків, підвищення прозорості управління та узгодженості дій учасників будівельного процесу.

4. Встановлено, що впровадження ERP-підтримки дозволяє суттєво підвищити ефективність організації будівельного виробництва, зокрема:

- зменшити відхилення строків виконання робіт у 2–3 рази;
- знизити перевитрати ресурсів у 2–2,5 рази;
- скоротити час прийняття управлінських рішень на 30–50 %.

5. Проведений порівняльний аналіз традиційного та цифрового підходів до управління показав, що ключовими перевагами цифрової моделі є:

- інтеграція даних у єдиному середовищі;
- перехід від реактивного до проактивного управління;
- можливість формування та оцінювання альтернативних сценаріїв;
- підвищення адаптивності організаційно-технологічної системи.

6. Доведено, що найбільший ефект від впровадження ERP-рішень досягається у складних багатокомпонентних проєктах, де рівень взаємозв'язків між процесами та учасниками є високим, що обумовлює необхідність інтегрованого управління.

7. Системна оцінка ефективності впровадження ERP показала, що позитивні зміни охоплюють не лише часові та ресурсні параметри, але й організаційні та інформаційні характеристики, зокрема підвищення узгодженості процесів, зменшення кількості конфліктів та покращення якості управлінських рішень.

8. Встановлено, що впровадження ERP забезпечує реалізацію адаптивного підходу до управління, який проявляється у здатності системи:

- оперативно реагувати на зміни умов реалізації проєкту;
- формувати альтернативні сценарії управління;
- забезпечувати стабільність функціонування в умовах невизначеності.

9. Проведене економічне оцінювання підтвердило доцільність цифрової трансформації, зокрема встановлено, що:

- витрати на впровадження ERP становлять у середньому 2–4 % бюджету проєкту;
- сумарний економічний ефект досягає 9–17 %;
- коефіцієнт рентабельності інвестицій (ROI) перевищує 3;
- термін окупності становить 6–12 місяців.

10. Доведено, що економічний ефект цифрової трансформації має інтегрований характер і формується за рахунок поєднання оптимізації ресурсів, скорочення строків реалізації, підвищення ефективності управління та зниження ризиків.

11. Сформовано комплекс практичних рекомендацій щодо впровадження ERP-рішень, які охоплюють рівень будівельного проєкту, компанії та галузі, та передбачають системний підхід, інтеграцію інформаційних потоків, забезпечення якості даних і підготовку персоналу.

12. Отримані результати підтверджують наукову гіпотезу дослідження, відповідно до якої використання ERP-підтримки управлінських рішень забезпечує підвищення ефективності організації будівельного виробництва за рахунок формування адаптивної цифрової системи управління.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-прикладну задачу підвищення ефективності організації будівельного виробництва в умовах динамічних змін реалізації проєктів. Мету дослідження, яка полягала у розробленні організаційно-технологічних засад забезпечення адаптивності будівельного виробництва на основі використання цифрових моделей і ERP-підтримки управлінських рішень, досягнуто шляхом формування цілісної цифрової моделі управління, що інтегрує інформаційні, організаційні та технологічні процеси, а також її практичної реалізації та підтвердження ефективності в умовах реальних будівельних проєктів.

Наукове значення одержаних результатів полягає у розвитку теоретико-методичних положень організації будівельного виробництва через обґрунтування переходу від статичних організаційно-технологічних моделей до адаптивної цифрової моделі управління. У роботі сформовано новий підхід до організації будівельного виробництва як динамічної системи, здатної змінювати параметри функціонування без втрати ефективності. Удосконалено підходи до оцінювання результативності за рахунок включення показників адаптивності, а також розвинено наукові положення щодо використання ERP-систем як інструменту інтеграції даних і підтримки прийняття управлінських рішень.

Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості їх застосування у діяльності будівельних і девелоперських компаній для підвищення ефективності управління проєктами. Запропонована модель та методика дозволяють знизити відхилення строків і перевитрати ресурсів, скоротити час прийняття рішень, підвищити прозорість процесів та узгодженість дій учасників будівництва, що підтверджено результатами впровадження на реальних об'єктах.

Відповідно до визначених у вступі завдань дослідження отримано такі результати:

- 1. У результаті аналізу сучасного стану організації будівельного виробництва** встановлено, що традиційні організаційно-технологічні підходи

мають статичний і детермінований характер, що підтверджено результатами аналізу еволюції організаційно-технологічних моделей та сучасних цифрових концепцій управління будівництвом. Але не враховують динамічність реалізації проєктів та призводять до порушення ритмічності виконання робіт, перевитрат ресурсів і зниження ефективності управління, що обґрунтовує необхідність переходу до адаптивних моделей.

2. Визначено та систематизовано фактори динамічних змін.

Встановлено характер їх впливу на строки виконання робіт, ресурсне забезпечення, фінансові показники та ефективність управління будівельними проєктами, включаючи ресурсні, фінансові, організаційні та технологічні чинники, а також обґрунтовано їх вплив на організаційно-технологічні рішення, календарне планування та ефективність виконання робіт, що створило основу для побудови адаптивної моделі управління.

3. Сформовано методологічну основу дослідження та розроблено концепцію інтегрованого цифрового середовища BIM–ERP–CDE що забезпечує інтеграцію проєктної, виробничої, ресурсної та управлінської інформації в межах єдиного цифрового середовища, узгодженість інформаційних потоків, інтеграцію даних про роботи, ресурси та строки та створює передумови для підвищення ефективності прийняття управлінських рішень.

4. Розроблено модель цифрової підтримки управлінських рішень, яка інтегрує параметри робіт, ресурсів, часу та умов реалізації проєкту, а також включає механізм функціонування ERP-систем, модель адаптивного перебудування процесів і систему показників ефективності та адаптивності, що забезпечує перехід до адаптивного управління будівельним виробництвом. Особливістю моделі є реалізація механізму адаптивного перебудування організаційно-технологічних процесів на основі аналізу актуальних даних ERP-систем та оцінювання альтернативних сценаріїв розвитку проєкту.

5. У межах дослідження отримано подальший розвиток формалізації процесу оцінювання ефективності організації будівельного виробництва шляхом введення кількісної залежності, що враховує вплив інформаційної узгодженості

як інтегруючого параметра системи. Запропоновано визначати ефективність як функцію обсягу виконаних робіт, витрат часу, ресурсного забезпечення та коефіцієнта інформаційної узгодженості, що дозволяє кількісно оцінювати вплив цифрового середовища (BIM–ERP–CDE) на результати управління. Додатково введено показник адаптивності організаційно-технологічної системи, який характеризує здатність зберігати ефективність в умовах динамічних змін. Використання зазначених залежностей у практичній частині дослідження дозволило підтвердити підвищення ефективності організації будівельного виробництва та обґрунтувати доцільність застосування адаптивної цифрової моделі управління. Запропонована система показників дозволяє комплексно оцінювати не лише ефективність використання ресурсів, а й рівень адаптивності організаційно-технологічної системи до змін умов реалізації проєкту.

Уперше введено коефіцієнт інформаційної узгодженості як кількісну характеристику інтегрованого цифрового середовища будівельного проєкту, що дозволяє оцінювати рівень синхронізації інформаційних потоків між учасниками будівництва та його вплив на ефективність управління.

6. Розроблено алгоритм та методику практичного застосування моделі, які визначають послідовність впровадження цифрових інструментів у процес управління будівельними проєктами та забезпечують інтеграцію ERP-системи у структуру організаційно-технологічного управління.

7. Проведено апробацію моделі та оцінено її ефективність, у результаті чого встановлено, що використання запропонованого підходу дозволяє:

- зменшити відхилення строків у 2–3 рази;
- знизити перевитрати ресурсів у 2–2,5 рази;
- скоротити час прийняття управлінських рішень на 30–50 %;
- забезпечити економічний ефект на рівні 9–17 % бюджету проєкту при витратах 2–4 %, що підтверджує економічну доцільність і практичну ефективність впровадження ERP-рішень.

Працездатність та ефективність моделі підтверджено шляхом апробації на прикладі реального будівельного проєкту та порівняльного аналізу традиційного і цифрового підходів до організації будівництва.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Закон України «Про регулювання містобудівної діяльності» від 17.02.2011 № 3038-VI. Відомості Верховної Ради України. 2011. № 34. Ст. 343.
2. Закон України «Про архітектурну діяльність» від 20.05.1999 № 687-XIV. Відомості Верховної Ради України. 1999. № 31. Ст. 246.
3. Закон України «Про будівельні норми» від 05.11.2009 № 1704-VI. Відомості Верховної Ради України. 2010. № 5. Ст. 41.
4. Закон України «Про наукову і науково-технічну діяльність» від 26.11.2015 № 848-VIII. Відомості Верховної Ради України. 2016. № 3. Ст. 25.
5. Закон України «Про електронні документи та електронний документообіг» від 22.05.2003 № 851-IV. Відомості Верховної Ради України. 2003. № 36. Ст. 275.
6. Закон України «Про електронні довірчі послуги» від 05.10.2017 № 2155-VIII. Відомості Верховної Ради України. 2017. № 45. Ст. 400.
7. Закон України «Про публічні закупівлі» від 25.12.2015 № 922-VIII. Відомості Верховної Ради України. 2016. № 9. Ст. 89.
8. Закон України «Про захист інформації в інформаційно-комунікаційних системах» від 05.07.1994 № 80/94-ВР. Відомості Верховної Ради України. 1994. № 31. Ст. 286.
9. Про затвердження Порядку розроблення проектної документації на будівництво об'єктів : наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 16.05.2011 № 45.
10. Про затвердження Порядку проведення експертизи проектів будівництва : постанова Кабінету Міністрів України від 11.05.2011 № 560.
11. ДБН А.2.2-3:2014. Склад та зміст проектної документації на будівництво. Київ : Мінрегіон України, 2014. 38 с.
12. ДБН А.3.1-5:2016. Організація будівельного виробництва. Київ : Мінрегіон України, 2016. 52 с.
13. ДСТУ Б А.3.1-22:2013. Визначення тривалості будівництва об'єктів. Київ : Мінрегіон України, 2013. 18 с.

14. ДСТУ Б Д.1.1-1:2013. Правила визначення вартості будівництва. Київ : Мінрегіон України, 2013. 88 с.
15. ДСТУ ISO 9001:2015. Системи управління якістю. Вимоги. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 30 с.
16. ДСТУ ISO 10006:2018. Управління якістю. Настанови щодо управління якістю в проектах. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019.
17. ДСТУ ISO 21500:2014. Настанови щодо управління проектами. Київ : Мінекономрозвитку України, 2015. 52 с.
18. ДСТУ ISO 31000:2018. Менеджмент ризиків. Настанови. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019.
19. ДСТУ ISO 55000:2019. Управління активами. Загальні положення, принципи та термінологія. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2020.
20. ДСТУ ISO/IEC 27001:2015. Інформаційні технології. Методи захисту. Системи управління інформаційною безпекою. Вимоги. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016.
21. ISO 19650-1:2018. Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM). Information management using building information modelling. Part 1: Concepts and principles. Geneva : International Organization for Standardization, 2018.
22. 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 : International Organization for Standardization, 2018.
23. ISO 19650-3:2020. Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM). Information management using building information modelling. Part 3: Operational phase of the assets. Geneva : International Organization for Standardization, 2020.

24. ISO 19650-5:2020. Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM). Information management using building information modelling. Part 5: Security-minded approach to information management. Geneva : International Organization for Standardization, 2020.

25. ISO 16739-1:2018. Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries. Part 1: Data schema. Geneva : International Organization for Standardization, 2018.

26. ISO 29481-1:2016. Building information models. Information delivery manual. Part 1: Methodology and format. Geneva : International Organization for Standardization, 2016.

27. ISO 12006-2:2015. Building construction. Organization of information about construction works. Part 2: Framework for classification. Geneva : International Organization for Standardization, 2015.

28. ISO 21502:2020. Project, programme and portfolio management. Guidance on project management. Geneva : International Organization for Standardization, 2020.

29. ISO 21503:2017. Project, programme and portfolio management. Guidance on programme management. Geneva : International Organization for Standardization, 2017.

30. ISO 21504:2015. Project, programme and portfolio management. Guidance on portfolio management. Geneva : International Organization for Standardization, 2015.

31. ISO 31000:2018. Risk management. Guidelines. Geneva : International Organization for Standardization, 2018.

32. ISO 9001:2015. Quality management systems. Requirements. Geneva : International Organization for Standardization, 2015.

33. ISO 55000:2014. Asset management. Overview, principles and terminology. Geneva : International Organization for Standardization, 2014.

34. ISO/IEC 27001:2022. Information security, cybersecurity and privacy protection. Information security management systems. Requirements. Geneva : International Organization for Standardization, 2022.
35. ISO/IEC/IEEE 15288:2015. Systems and software engineering. System life cycle processes. Geneva : International Organization for Standardization, 2015.
36. Eastman C., Teicholz P., Sacks R., Liston K. BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers. 3rd ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2018. 688 p.
37. Sacks R., Eastman C., Lee G., Teicholz P. BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers. 4th ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2024.
38. Hardin B., McCool D. BIM and Construction Management: Proven Tools, Methods, and Workflows. 2nd ed. Indianapolis : Wiley, 2015. 416 p.
39. Underwood J., Isikdag U. Handbook of Research on Building Information Modeling and Construction Informatics: Concepts and Technologies. Hershey : IGI Global, 2010. 757 p.
40. Kensek K. Building Information Modeling. London : Routledge, 2014. 312 p.
41. Krygiel E., Nies B. Green BIM: Successful Sustainable Design with Building Information Modeling. Indianapolis : Wiley, 2008. 268 p.
42. Smith D. K., Tardif M. Building Information Modeling: A Strategic Implementation Guide for Architects, Engineers, Constructors, and Real Estate Asset Managers. Hoboken : John Wiley & Sons, 2009. 216 p.
43. 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.
44. 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.

45. 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.
46. 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.
47. 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.
48. Gu N., London K. Understanding and facilitating BIM adoption in the AEC industry. *Automation in Construction*. 2010. Vol. 19, No. 8. P. 988–999.
49. 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.
50. 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.
51. Bozhynskyi M., Zhelezniak V. Scientific foundations for the coordination of organizational-technological and information-management decisions in the system of implementation and recovery of construction projects. *The Scientific Heritage*. 2026. No. 179 (179). P. 72–78. DOI: 10.5281/zenodo.18762606.
52. Організаційно-технологічний девелопмент та інтегрована реалізація проєктів у будівництві: монографія / В. Железняк, В. Олійник, М. Малихін, А. Козак, М. Дружинін та ін. Київ: КНУБА, 2025. 201 с. URL: <https://repository.knuba.edu.ua/handle/123456789/15677>.
53. Железняк В., Олійник В. Цифрова методологія управління організаційно-технологічними процесами будівництва об'єктів для оптимізації проєктних параметрів. Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин. 2024. Т. 2. Вип. 54. С. 325–333. DOI: [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2024.54\(2\).325-333](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2024.54(2).325-333).

54. Железняк В., Олійник В. Підхід до формування цифрового та організаційно-технологічного інструментарію для управління циклом будівельних проєктів відбудови в складних умовах. Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин. 2025. Т. 1. Вип. 56. С. 11–20. DOI: [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.56\(1\).11-20](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.56(1).11-20).

55. Железняк В., Олійник В. Вплив цифровізації на удосконалення проєктних показників об'єктів: завдання і можливості організації будівництва. Будівельне виробництво. 2025. № 81. URL: <https://ndibv-building.com.ua/index.php/Building/article/view/575>.

56. Железняк В., Олійник В. Інноваційні організаційно-технічні рішення на цифровій основі для ефективної реалізації об'єктів промислового та цивільного призначення. Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин. 2025. № 55 (3).

57. Железняк В. Л. Сутність впливу цифровізації та технологічні процеси будівництва. Ефективні технології в будівництві : матеріали VIII Міжнар. наук.-техн. конф. Київ : КНУБА, 2023. С. 36.

58. Железняк В. Л. Науково-прикладний інструментарій проєкту організації будівництва на цифровій основі ERP. Архітектура, будівництво, дизайн, технології, енергоменеджмент : матеріали Міжнар. наук.-техн. форуму. Київ : КНУБА, 2024. URL: <https://www.knuba.edu.ua/international-scientific-and-technical-forum-architecture-construction-design-technology-energy-management/>.

59. Железняк В. Л. Цифровізація технологічних процесів в будівництві. Ефективні технології в будівництві : матеріали IX Міжнар. наук.-техн. конф. Київ : КНУБА, 2024. С. 23.

60. Железняк В. Л. Сутність впливу цифровізації та технологічні процеси будівництва. Ефективні технології в будівництві : матеріали X Міжнар. наук.-техн. конф. Київ : КНУБА, 2025. С. 31.

61. Kerzner H. Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling and Controlling. 13th ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2022. 848 p.

62. Project Management Institute. A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide). 7th ed. Pennsylvania : PMI, 2021. 370 p.

63. Walker A. Project Management in Construction. 7th ed. Hoboken : Wiley-Blackwell, 2015. 536 p.
64. Winch G. Managing Construction Projects. 3rd ed. Oxford : Wiley-Blackwell, 2023. 512 p.
65. Harris F., McCaffer R., Baldwin A. Modern Construction Management. 8th ed. Oxford : Wiley-Blackwell, 2021. 640 p.
66. Fewings P., Henjewe C. Construction Project Management. 3rd ed. London : Routledge, 2019. 460 p.
67. Gould F., Joyce N. Construction Project Management. 5th ed. Boston : Pearson Education, 2020. 512 p.
68. Meredith J., Mantel S., Shafer S. Project Management: A Managerial Approach. 10th ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2021. 656 p.
69. Schwalbe K. Information Technology Project Management. 10th ed. Boston : Cengage Learning, 2023. 672 p.
70. Davenport T. Mission Critical: Realizing the Promise of Enterprise Systems. Boston : Harvard Business School Press, 2000. 336 p.
71. O'Leary D. Enterprise Resource Planning Systems. Cambridge : Cambridge University Press, 2000. 232 p.
72. Monk E., Wagner B. Concepts in Enterprise Resource Planning. 5th ed. Boston : Cengage Learning, 2022. 320 p.
73. Leon A. Enterprise Resource Planning. New Delhi : McGraw-Hill Education, 2018. 480 p.
74. Bradford M. Modern ERP: Select, Implement and Use Today's Advanced Business Systems. Raleigh : Lulu Press, 2020. 328 p.
75. Klaus H., Rosemann M., Gable G. What is ERP? Information Systems Frontiers. 2000. Vol. 2, No. 2. P. 141–162.
76. Davenport T. Putting the Enterprise into the Enterprise System. Harvard Business Review. 1998. Vol. 76, No. 4. P. 121–131.
77. Koch C., Slater D., Baatz E. The ABCs of ERP. CIO Magazine. 1999. Vol. 12, No. 8. P. 22–36.

78. Matt D., Hess T., Benlian A. Digital Transformation Strategies. *Business & Information Systems Engineering*. 2015. Vol. 57, No. 5. P. 339–343.
79. Vial G. Understanding Digital Transformation: A Review and Research Agenda. *Journal of Strategic Information Systems*. 2019. Vol. 28, No. 2. P. 118–144.
80. Kane G., Palmer D., Phillips A., Kiron D., Buckley N. Strategy, Not Technology, Drives Digital Transformation. *MIT Sloan Management Review*. 2015. 25 p.
81. Westerman G., Bonnet D., McAfee A. *Leading Digital: Turning Technology into Business Transformation*. Boston : Harvard Business Review Press, 2014. 292 p.
82. Verhoef P., Broekhuizen T., Bart Y. Digital Transformation: A Multidisciplinary Reflection and Research Agenda. *Journal of Business Research*. 2021. Vol. 122. P. 889–901.
83. Reis J., Amorim M., Melão N., Cohen Y. Digital Transformation: A Literature Review and Guidelines for Future Research. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2018. Vol. 745. P. 411–421.
84. Oswald G., Kleinemeier M. *Shaping the Digital Enterprise*. Cham : Springer, 2017. 257 p.
85. Schwab K. *The Fourth Industrial Revolution*. Geneva : World Economic Forum, 2016. 184 p.
86. Sawhney A., Riley M., Irizarry J. *Construction 4.0: An Innovation Platform for the Built Environment*. London : Routledge, 2020. 280 p.
87. Bolpagni M., Gavina R., Ribeiro F. *Industry 4.0 for the Built Environment*. Cham : Springer, 2022. 318 p.
88. Oesterreich T., Teuteberg F. Understanding the Implications of Digitisation and Automation in the Construction Industry. *Computers in Industry*. 2016. Vol. 83. P. 121–139.
89. Borrmann A., König M., Koch C., Beetz J. *Building Information Modeling: Technology Foundations and Industry Practice*. Cham : Springer, 2018. 584 p.
90. Lu Y., Wu Z., Chang R., Li Y. Building Information Modeling and Digital Transformation of Construction Industry. *Automation in Construction*. 2021. Vol. 122. Article 103512.

91. Koskela L. An Exploration Towards a Production Theory and its Application to Construction. Espoo : VTT Technical Research Centre of Finland, 2000. 296 p.
92. Ballard G. The Last Planner System of Production Control. Birmingham : University of Birmingham, 2000. 192 p.
93. Ballard G., Howell G. Lean Project Management. Building Research and Information. 2003. Vol. 31, No. 2. P. 119–133.
94. Howell G. What is Lean Construction? Proceedings of the International Group for Lean Construction. 1999. Vol. 7. P. 1–10.
95. Forbes L., Ahmed S. Modern Construction: Lean Project Delivery and Integrated Practices. Boca Raton : CRC Press, 2011. 480 p.
96. Kent D., Becerik-Gerber B. Understanding Construction Industry Experience and Attitudes toward Integrated Project Delivery. Journal of Construction Engineering and Management. 2010. Vol. 136, No. 8. P. 815–825.
97. American Institute of Architects. Integrated Project Delivery: A Guide. Sacramento : AIA California Council, 2014. 120 p.
98. Fischer M., Ashcraft H., Reed D., Khanzode A. Integrating Project Delivery. Hoboken : John Wiley & Sons, 2017. 432 p.
99. Mesa H., Molenaar K., Alarcón L. Exploring Performance of the Integrated Project Delivery Process on Complex Building Projects. International Journal of Project Management. 2016. Vol. 34, No. 7. P. 1089–1101.
100. Love P., Matthews J., Simpson I., Hill A., Olatunji O. A Benefits Realization Management Building Information Modeling Framework for Asset Owners. Automation in Construction. 2014. Vol. 37. P. 1–10.
101. Bolpagni M. The Implementation of BIM within the Public Procurement. Procedia Engineering. 2016. Vol. 164. P. 80–87.
102. Whyte J. How Digital Information Transforms Project Delivery Models. Project Management Journal. 2019. Vol. 50, No. 2. P. 177–194.
103. Sabol L. Challenges in Cost Estimating with Building Information Modeling. IFMA World Workplace Conference. 2008. P. 1–12.

104. Love P., Matthews J. The 'How' of Benefits Management for Digital Technology. *Engineering, Construction and Architectural Management*. 2019. Vol. 26, No. 4. P. 563–581.
105. Boje C., Guerriero A., Kubicki S., Rezgui Y. Towards a Semantic Construction Digital Twin. *Automation in Construction*. 2020. Vol. 114. Article 103179.
106. Fuller A., Fan Z., Day C., Barlow C. Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 108952–108971.
107. Lu Q., Xie X., Parlikad A., Schooling J. Digital Twin-Enabled Anomaly Detection for Built Asset Monitoring. *Automation in Construction*. 2020. Vol. 118. Article 103277.
108. Kaewunruen S., Lian Q., Chen Y. Digital Twins for Managing Railway Infrastructure. *Sustainability*. 2019. Vol. 11, No. 17. Article 4710.
109. Akanmu A., Anumba C., Ogunseiju O. Towards Next Generation Cyber-Physical Systems and Digital Twins for Construction. *Automation in Construction*. 2021. Vol. 130. Article 103849.
110. Dakhli Z., Lafhaj Z., Mossman A. The Potential of Digital Twins in Construction. *Buildings*. 2022. Vol. 12, No. 3. Article 302.
111. Kiviniemi A. BIM-Based Common Data Environment. *BuildingSMART International Report*. 2015. 54 p.
112. Bew M., Richards M. BIM Maturity and Common Data Environment. London : Centre for Digital Built Britain, 2017. 68 p.
113. Bolpagni M., Ciribini A. The Information Management Framework in Construction Projects. *Journal of Information Technology in Construction*. 2016. Vol. 21. P. 65–84.
114. Succar B., Kassem M. Macro-BIM Adoption: Conceptual Structures. *Automation in Construction*. 2015. Vol. 57. P. 64–79.
115. Kassem M., Succar B. BIM Framework and BIM Maturity Models. *Journal of Information Technology in Construction*. 2017. Vol. 22. P. 347–378.
116. Love P., Matthews J., Simpson I. From Information Management to Digital Transformation. *Automation in Construction*. 2021. Vol. 125. Article 103619.

117. Turkan Y., Bosché F., Haas C., Haas R. Automated Progress Tracking Using BIM. *Automation in Construction*. 2012. Vol. 22. P. 414–421.
118. Bosché F., Ahmed M., Turkan Y., Haas C., Haas R. The Value of Integrating Scan-to-BIM and Construction Monitoring. *Automation in Construction*. 2015. Vol. 49. P. 201–213.
119. Golparvar-Fard M., Peña-Mora F., Savarese S. D4AR: 4D Augmented Reality Models for Construction Progress Monitoring. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2009. Vol. 135, No. 8. P. 814–823.
120. Mahamadu A., Mahdjoubi L., Booth C. Challenges to BIM-Enabled Facilities Management. *Facilities*. 2020. Vol. 38, No. 3–4. P. 175–196.
121. Love P. E. D., Zhou J., Matthews J., Luo H., Sing C. P. Digital Twin and Smart Construction: Enabling Technologies and Future Directions. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2022. Vol. 148, No. 6. Article 04022045.
122. Elghaish F., Abrishami S., Hosseini M. Digital Transformation and BIM Adoption in Construction Industry. *Engineering, Construction and Architectural Management*. 2023. Vol. 30, No. 4. P. 1458–1478.
123. Saka A., Chan D. A Scientometric Review and Metasynthesis of Building Information Modelling Research in Africa. *Buildings*. 2020. Vol. 10, No. 10. Article 175.
124. Ibrahim M., Kaka A., Dainty A. Digital Transformation in Construction: Drivers, Barriers and Strategic Implications. *Construction Innovation*. 2021. Vol. 21, No. 3. P. 456–475.
125. Li C., Fang Y., Guo H. Smart Construction and Digital Technologies for Sustainable Infrastructure Development. *Sustainability*. 2022. Vol. 14, No. 8. Article 4587.
126. Tezel A., Taggart M., Koskela L., Tzortzopoulos P. Lean Construction and Industry 4.0: Synergies and Future Directions. *Construction Management and Economics*. 2020. Vol. 38, No. 1. P. 1–17.
127. Sacks R., Brilakis I., Pikas E., Xie H., Girolami M. Construction with Digital Twin Information Systems. *Data-Centric Engineering*. 2020. Vol. 1. Article e14.

128. Pärn E., Edwards D., Sing M. The Building Information Modelling Trajectory in Facilities Management. *Automation in Construction*. 2017. Vol. 75. P. 45–55.
129. Motawa I., Carter K. Sustainable BIM-Based Evaluation of Building Projects. *Automation in Construction*. 2013. Vol. 35. P. 419–427.
130. Alaloul W., Liew M., Zawawi N., Kennedy I. Industrial Revolution 4.0 in the Construction Industry: Challenges and Opportunities. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2020. Vol. 146, No. 5. Article 04020023.
131. Hosseini M., Chileshe N., Zuo J., Baroudi B. BIM Adoption within Australian Construction Organisations. *Engineering, Construction and Architectural Management*. 2018. Vol. 25, No. 1. P. 83–104.
132. Papadonikolaki E. Loosely Coupled Systems of Innovation: Aligning BIM Adoption with Organizational Transformation. *Construction Management and Economics*. 2018. Vol. 36, No. 10. P. 554–569.
133. Oraee M., Hosseini M., Papadonikolaki E., Palliyaguru R., Arashpour M. Collaboration in BIM-Based Construction Networks. *International Journal of Project Management*. 2019. Vol. 37, No. 6. P. 839–854.
134. Lu W., Webster C., Chen K., Zhang X., Chen X. Computational Building Information Modelling for Smart Cities. *Automation in Construction*. 2015. Vol. 51. P. 1–8.
135. Cheng J., Lu Q., Deng Y. Analytical Review and Evaluation of Civil Information Modeling. *Automation in Construction*. 2016. Vol. 67. P. 31–47.
136. Abanda F., Byers L. An Investigation of the Impact of Building Orientation on Energy Consumption Using BIM. *Journal of Building Engineering*. 2016. Vol. 6. P. 290–300.
137. Volk R., Stengel J., Schultmann F. BIM-Based Lifecycle Management of Buildings and Infrastructure Facilities. *Automation in Construction*. 2014. Vol. 38. P. 109–127.
138. McKinsey Global Institute. *Imagining Construction's Digital Future*. McKinsey & Company, 2016. 36 p.

139. World Economic Forum. Shaping the Future of Construction: A Breakthrough in Mindset and Technology. Geneva : World Economic Forum, 2016. 64 p.
140. European Construction Industry Federation. Digitalisation in Construction Industry: Building Europe's Future. Brussels : FIEC, 2021. 78 p.
141. Тугай О. А. Організаційно-технологічні основи управління будівельним виробництвом : монографія. Київ : КНУБА, 2012. 320 с.
142. Тугай О. А., Поколенко В. О. Управління інвестиційно-будівельними проектами в умовах ринкової економіки. Київ : КНУБА, 2016. 284 с.
143. Поколенко В. О. Організація, планування та управління в будівництві : навч. посіб. Київ : КНУБА, 2015. 276 с.
144. Поколенко В. О., Рижакова Г. М. Економіка та організація діяльності будівельного підприємства. Київ : КНУБА, 2018. 312 с.
145. Рижакова Г. М. Методологічні засади розвитку будівельних підприємств в умовах інноваційної економіки : монографія. Київ : КНУБА, 2019. 348 с.
146. Рижакова Г. М., Тугай О. А., Ізмайлова К. В. Управління інвестиційно-будівельними проектами на засадах девелопменту. Управління розвитком складних систем. 2020. № 43. С. 102–111.
147. Малихін М. О. Організаційно-технологічний девелопмент у системі реалізації будівельних проектів : монографія. Київ : КНУБА, 2021. 286 с.
148. Малихін М. О., Гойко А. Ф. Сучасні організаційно-технологічні системи управління будівництвом. Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин. 2021. Вип. 47. С. 15–27.
149. Гойко А. Ф. Економічна ефективність інвестицій у будівництві : монографія. Київ : КНУБА, 2017. 294 с.
150. Гойко А. Ф., Рижакова Г. М. Теоретико-методологічні засади розвитку будівельного комплексу України. Управління розвитком складних систем. 2019. № 39. С. 85–94.
151. Лещинський О. Л. Інформаційне забезпечення управління будівельними проектами : монографія. Київ : КНУБА, 2018. 242 с.

152. Лещинський О. Л., Тугай О. А. Інформаційні технології в системі організації будівництва. Будівельне виробництво. 2020. № 69. С. 25–34.
153. Литвиненко О. С. Цифрові технології управління життєвим циклом об'єктів будівництва. Управління розвитком складних систем. 2021. № 48. С. 118–126.
154. Шпаков А. В. Інформаційно-аналітичні системи підтримки прийняття рішень у будівництві : монографія. Київ : КНУБА, 2019. 228 с.
155. Пшінько О. М. Управління інфраструктурними проектами та розвитком транспортно-будівельних систем : монографія. Дніпро : ПДАБА, 2018. 360 с.
156. Ізмайлова К. В. Девелопмент нерухомості та управління інвестиційно-будівельними проектами : монографія. Київ : КНУБА, 2020. 305 с.
157. Ізмайлова К. В., Рижакова Г. М. Інноваційні механізми управління будівельними проектами в умовах цифрової економіки. Управління розвитком складних систем. 2021. № 46. С. 92–101.
158. Тугай О. А., Малихін М. О., Рижакова Г. М. Організаційно-технологічна модернізація будівельного виробництва в умовах цифрової трансформації. Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин. 2022. Вип. 50. С. 11–24.

НАУКОВІ ПРАЦІ ЗДОБУВАЧА

Публікації у наукових виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз даних

1. Bozhynskyi M., Zhelezniak V. Scientific foundations for the coordination of organizational-technological and information-management decisions in the system of implementation and recovery of construction projects. *The Scientific Heritage*. 2026. No. 179 (179). P. 72–78. [DOI: 10.5281/zenodo.18762606](https://doi.org/10.5281/zenodo.18762606). (Особистий внесок здобувача: сформовано концептуальні положення щодо координації організаційно-технологічних та інформаційно-управлінських рішень у процесі реалізації будівельних проєктів, обґрунтовано підходи до інтеграції цифрових інструментів підтримки управлінських рішень, підготовлено основний текст публікації.)

2. Железняк В., Олійник М. Малихін, А. Козак, М. Дружинін та ін.; Організаційно-технологічний девелопмент та інтегрована реалізація проєктів у будівництві: монографія / Київ: КНУБА, 2025. 201 с. URI: <https://repository.knuba.edu.ua/handle/123456789/15677> (Особистий внесок здобувача: здобувачем розроблено положення щодо цифрової трансформації організації будівництва та обґрунтовано використання ERP-орієнтованих підходів у системі інтегрованого управління будівельними проєктами. Узагальнено сучасні концепції цифровізації будівельного виробництва та адаптовано їх до умов організаційно-технологічного проєктування).

3. Железняк В., Конончук Р. Цифрова методологія управління організаційно-технологічними процесами будівництва об'єктів для оптимізації проєктних параметрів. *Шляхи підвищення ефективності будівництва*. 2024. № 54 Т.2. С325–333. DOI: [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2024.54\(2\).325-333](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2024.54(2).325-333) (Особистий внесок здобувача: здобувачем розроблено цифрову методологію управління організаційно-технологічними процесами будівництва та обґрунтовано підходи до оптимізації проєктних параметрів на основі інтеграції

інформаційних потоків. Запропоновано механізми цифрової координації учасників будівництва для підвищення ефективності управлінських рішень).

4. Железняк В., Олійник В. Підхід до формування цифрового та організаційно-технологічного інструментарію для управління циклом будівельних проєктів відбудови в складних умовах. *Шляхи підвищення ефективності будівництва*. 2025. №56 (1). С. 11–20. DOI: [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.56\(1\).11-20](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2025.56(1).11-20) (Особистий внесок здобувача: здобувачем розроблено та обґрунтовано цифровий і організаційно-технологічний інструментарій управління життєвим циклом будівельних проєктів відбудови. Запропоновано алгоритми ERP-підтримки управлінських рішень та механізми адаптації будівельного виробництва до умов нестабільного зовнішнього середовища).

5. Железняк В., Кобельчук О. Вплив цифровізації на удосконалення проєктних показників об'єктів: завдання і можливості організації будівництва. *Будівельне виробництво*. 2025. № 81. DOI: <https://doi.org/10.36750/2524-2555.81.118-123> (Особистий внесок здобувача: здобувачем досліджено вплив цифровізації на результативність організації будівництва та обґрунтовано систему показників оцінювання ефективності цифрового підтримуваного управління. Розроблено підходи до підвищення узгодженості організаційно-технологічних рішень і використання ERP-систем для покращення проєктних характеристик будівельних об'єктів).

6. Железняк В.Л., Дубинка О. В., Пилипчук О. Д., Орищенко В. В., Тугай А. О. Науково прикладний інструментарій проєкту організації будівництва на цифровій основі ERP. *Програма та тези доповідей Міжнародного науково-технічного форуму «Архітектура, дизайн та будівництво: інноваційні технології»* (15–16 листопада 2023 р., м. Київ). – Київ: Видавництво Ліра-К, 2023. С. 168. URL: <https://drive.google.com/file/d/1MtRBPiOTuPp1zPEUphMqLQ-VLfIydXwU/view>

7. Железняк В. Л., Тугай О. А., Молодько О. В., Пилипчук В. В. Методи дослідження будівельних девелоперських проєктів на основі інвестиційних механізмів. *Програма та тези доповідей Міжнародного науково-технічного*

форуму «Архітектура, будівництво, дизайн : технологія, енергетика, менеджмент» (16–17 жовтня 2024 р., м. Київ). – Київ: Видавництво Ліра-К, 2024. С. 175–176. URL: <https://drive.google.com/file/d/1b5T8Z1-5yCd-xlgAgU2PUCKB3E64vuqB/view>

8. Железняк В.Л., Дворнічен І.Ф., Зіньков О.В., Кобельчук О.Ю., Конончук Р.В., Олійник В.М. Інтеграція цифрового інструментарію та новітніх методологій для удосконалення проектних показників у будівництві. *Програма та тези доповідей. Архітектура, Будівництво, Дизайн : Виробництво, Інформатизація, Менеджмент: Міжнародний науково-технічний форум* (24-25 листопада 2025 р., м. Київ). – Київ : Видавництво Ліра-К, 2025.– С. 180. URL: <https://drive.google.com/file/d/1h5Zrq3IXNGrt06JuGw2-5oeijf26i8SX/view>

9. Железняк В.Л., Дворнічен І.Ф., Зіньков О.В., Кобельчук О.Ю., Конончук Р.В., Олійник В.М. Оптимізація організаційно-технологічних рішень будівництва інфраструктурних об'єктів для балансу наявних та змінних рекурсів проекту. *Програма та тези доповідей. Архітектура, Будівництво, Дизайн : Виробництво, Інформатизація, Менеджмент: Міжнародний науково-технічний форум* (24-25 листопада 2025 р., м. Київ). – Київ: Видавництво Ліра-К, 2025.– С. 181. URL: <https://drive.google.com/file/d/1h5Zrq3IXNGrt06JuGw2-5oeijf26i8SX/view>

ДОДАТКИ

Українська
академія наук
Науково – дослідний інститут
інноваційного будівництва
(НДІ інноваційного будівництва)

03142, Київ, вул.Семашка, 13
(044)424-51-99, 423-33-93
ndibud@gmail.com



Ukrainian
Academy of sciences
Research institute of innovation
building
(NDI of innovation building)

13, Semashko Str., Kiev, 03142, Ukraine
(044)424-51-99, 423-33-93
ndibud@gmail.com

Рахунок № 26008115188 в „ Райффайзен банк Аваль”, МФО 380805, код ЄДРПОУ 36265637,
свідоцтво №100222362 про реєстрацію платника ПДВ, індивідуальний податковий № 362656326579

Лист №02/05/20

Травень 20, 2026

ДОВІДКА про впровадження результатів дисертаційного дослідження

Видана аспіранту кафедри організації та управління будівництвом Київського національного університету будівництва і архітектури Железняку Владиславу Леонідовичу про те, що результати дисертаційного дослідження на тему:

«Цифрова трансформація організації будівництва: моделі та інструменти ERP-підтримки управлінських рішень»

впроваджено в науково-дослідний процес НДІ інноваційного будівництва, Науково-дослідний інститут інноваційного будівництва.

У процесі підготовки навчально-методичного забезпечення та проведення науково-дослідного процесу використовуються такі результати дисертаційного дослідження:

- концептуальні положення цифрової трансформації організації будівництва;
- науково-методичні підходи до інтеграції цифрових технологій BIM-ERP-CDE в систему організації та управління будівельними проектами;
- модель цифрової підтримки прийняття управлінських рішень в умовах динамічних змін реалізації будівельних проєктів;
- методичний підхід до оцінювання адаптивності організаційно-технологічних рішень із використанням інтегрованих цифрових моделей;
- алгоритм функціонування ERP-підтримки управління ресурсами, строками та організаційно-технологічними процесами будівництва;
- методичні рекомендації щодо використання цифрових моделей під час організації будівельного виробництва та управління інвестиційно-будівельними проектами.

Використання результатів дисертаційного дослідження сприяє підвищенню якості підготовки фахівців у сфері організації будівництва, формуванню сучасних компетентностей щодо застосування цифрових технологій управління будівельними проектами, розвитку практичних навичок використання ERP-систем для підтримки прийняття управлінських рішень, а також набуттю здобувачами компетентностей щодо організації цифрової трансформації будівельної галузі відповідно до сучасних міжнародних підходів.

Результати дисертаційної роботи рекомендовано до подальшого використання під час удосконалення навчальних спецкурсів, розроблення навчально-методичного забезпечення та виконання науково-дослідних робіт НДІ інноваційного будівництва.

Генеральний
директор НДІ
інноваційного
будівництва,
д.т.н., професор



Єсипенко АЛЛА



ATMOSFERA

ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ

“АТМОСФЕРА ІНЖИНІРИНГ СІСТЕМЗ”

01010, м. Київ, Печерський район, провулок Хрестовий, 6

ЄДРПОУ 42828431

ДОВІДКА

про практичну апробацію та використання результатів дисертаційного дослідження

Видана **Железняку Владиславу Леонідовичу** про те, що результати дисертаційного дослідження на тему:

«Цифрова трансформація організації будівництва: моделі та інструменти ERP-підтримки управлінських рішень»

були практично апробовані та використані ТОВ “АТМОСФЕРА ІНЖИНІРИНГ СІСТЕМЗ” під час опрацювання організаційно-технологічних рішень у процесі реалізації будівельних проєктів.

У межах співпраці було здійснено практичну апробацію розробленої автором методики інформаційної взаємодії учасників будівельного проєкту, спрямованої на вдосконалення процесів координації управлінських рішень та організації цифрового інформаційного обміну між основними учасниками реалізації будівельних проєктів.

Під час апробації використовувалися такі наукові результати дисертаційного дослідження:

- методика організації інформаційної взаємодії між замовником, проєктною організацією, генеральним підрядником та іншими учасниками реалізації будівельних проєктів;
- модель цифрової підтримки прийняття управлінських рішень на основі інтеграції інформаційних потоків;
- підходи до формування єдиного цифрового інформаційного середовища взаємодії учасників будівництва;
- рекомендації щодо інтеграції цифрових платформ BIM–ERP–CDE у систему організації будівельного виробництва;
- методичні підходи до координації організаційно-технологічних процесів в умовах цифрової трансформації будівництва;
- система показників оцінювання ефективності цифрової підтримки управлінських рішень.

Практична апробація здійснювалася під час аналізу та супроводу виконання будівельних проєктів підприємства, а також під час оцінювання процесів інформаційної взаємодії між учасниками проєктної діяльності. Особливу увагу було приділено питанням своєчасності передавання інформації, узгодженості організаційно-технологічних рішень, оперативності реагування на зміни та підвищення ефективності координації дій учасників реалізації будівельних проєктів.

За результатами проведеної апробації встановлено, що запропонована автором методика забезпечує:

- удосконалення організації інформаційного обміну між учасниками будівельного процесу;
- підвищення оперативності підготовки та погодження управлінських рішень;
- покращення координації взаємодії між замовником, проєктувальниками, підрядними організаціями та службами технічного нагляду;
- підвищення прозорості процесів інформаційної взаємодії під час реалізації будівельних проєктів;
- можливість використання інтегрованого цифрового інформаційного середовища як інструменту підтримки прийняття управлінських рішень;
- формування єдиного підходу до інформаційної взаємодії учасників проєкту на всіх стадіях життєвого циклу об'єкта будівництва.

Отримані результати підтвердили практичну доцільність застосування запропонованої автором методики та можливість її використання для вдосконалення організаційно-технологічного управління будівельними проєктами, розвитку цифрової взаємодії учасників будівництва та підвищення ефективності інформаційного забезпечення процесів прийняття управлінських рішень.

ТОВ "АТМОСФЕРА ІНЖИНІРИНГ СІСТЕМЗ" рекомендує використання результатів дисертаційного дослідження під час реалізації інвестиційно-будівельних проєктів, розвитку корпоративних цифрових систем управління та подальшого вдосконалення організаційно-технологічних процесів у будівництві.

Директор
ТОВ "АТМОСФЕРА ІНЖИНІРИНГ СІСТЕМЗ"
Свген ІВІНСЬКИЙ

М.П.

«__» _____ 2026 р.

ТОВ "Будівельно-Фінансова
Промислова Компанія "Відродження"
м . Ірпінь, вул. Ломоносова 73 кв 5
Бучанський р-н Київська обл 08206
код ЄДРПОУ 33941684
р/cUA973052990000026009030130717
АТ КБ " ПРИВАТБАНК "
Св-во платника ПДВ № 339416810312
ИНН 339416826561

ДОВІДКА

про практичне впровадження результатів дисертаційного дослідження

ТОВ "Будівельно-Фінансова Промислова Компанія "Відродження"
підтверджує, що окремі результати дисертаційного дослідження на тему:

«Цифрова трансформація організації будівництва: моделі та інструменти ERP-підтримки управлінських рішень» були апробовані аспірантом **Железняк Владислав Леонідович** під час реалізації двох будівельних проєктів компанії.

У процесі виконання проєктів проведено практичну перевірку запропонованих автором методичних підходів до цифрової підтримки організаційно-технологічних рішень, зокрема:

- методики інтеграції цифрових інформаційних потоків між учасниками будівництва;
- моделі взаємодії BIM, ERP та середовища спільних даних (CDE);
- алгоритму інформаційного супроводу процесу прийняття управлінських рішень;
- підходу до оперативного реагування на зміни організаційно-технологічних параметрів будівництва;
- системи моніторингу виконання робіт із використанням цифрових моделей;
- методики координації обміну інформацією між замовником, проєктувальником, генеральним підрядником та іншими учасниками будівельного процесу;
- підходів до цифрової підтримки календарного та ресурсного планування;
- системи оцінювання ефективності цифрового управління будівельними проєктами.

Практична апробація здійснювалася під час реалізації двох об'єктів компанії, що наведені у четвертому розділі дисертаційного дослідження.

У ході апробації підтверджено можливість:

- скорочення часу підготовки та прийняття управлінських рішень;
- підвищення узгодженості календарного та ресурсного планування;
- оперативного виявлення відхилень від планових показників;
- покращення координації виконання будівельних робіт;
- використання цифрової моделі як єдиного інформаційного середовища супроводу реалізації проєктів.

Отримані результати підтвердили практичну придатність розроблених автором моделей, алгоритмів та методичних підходів до використання під час реалізації сучасних будівельних проєктів та можуть бути рекомендовані для подальшого застосування в діяльності компанії.

КЕРІВНИК ПРОЕКТІВ: «ПОГОДЖЕНО»

